

ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ ΑΡΤΕΜΙΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΥΠΟΘΕΤΙΚΟΥ
ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΜΙΚΡΟ ΑΡΘΡΩΤΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ
ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Τομέας: Πυρηνικής Τεχνολογίας

Επιβλέπων: Μητράκος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2024

GRIGOROPOULOU CHRYSOULA ARTEMIS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

ASSESSMENT OF RADIOLOGICAL
IMPACTS DUE TO A
HYPOTHETICAL NUCLEAR
ACCIDENT IN A SMALL MODULAR
REACTOR IN GREECE

Department of Nuclear Engineering

Supervisor: Dimitrios Mitrakos, Assistant Prof.



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.

Γρηγοροπούλου Χρυσούλα Άρτεμις

Περιεχόμενα

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Περίληψη..... | 6 |
| 1. | Abstract..... | 7 |
| 2. | Εισαγωγή | 8 |
| 3. | SMRs: Προοπτικές, Ασφάλεια και Ερευνητικές Προσεγγίσεις..... | 10 |
| 3.1 | Εισαγωγή στους SMR..... | 10 |
| 3.2 | Πλεονεκτήματα αντιδραστήρων SMR..... | 14 |
| 3.3 | Ανάλυση πιθανού ατυχήματος σε SMR | 15 |
| 3.4 | Ερευνητικές εργασίες για SMR..... | 16 |
| 4. | Μοντελοποίηση και Δεδομένα | 17 |
| 4.1 | Όρος πηγής..... | 17 |
| 4.1.1 | Μεθοδολογίες υπολογισμού όρου πηγής | 17 |
| 4.1.2 | Έκλυση και μεταφορά του αερολύματος στο περίβλημα | 23 |
| 4.2 | Ατμοσφαιρική διασπορά..... | 26 |
| 4.3 | Εναπόθεση..... | 28 |
| 4.4 | Μετεωρολογικά δεδομένα..... | 30 |
| 4.5 | Υπολογισμός δόσεων | 31 |
| 4.5.1 | Εξωτερική δόση από έκθεση σε ακτινοβολία γ από το πλούμιο (cloud shine) | 31 |
| 4.5.2 | Εξωτερική δόση από έκθεση σε ακτινοβολία γ από την εναπόθεση (ground shine)..... | 32 |
| 4.5.3 | Εσωτερική δόση λόγω εισπνοής (inhalation)..... | 33 |
| 5. | Ανάλυση Ραδιολογικών Επιπτώσεων: Μεθοδολογία, Αποτελέσματα και Χαρτογράφηση Ραδιενεργών Στοιχείων σε Προσομοίωση Πυρηνικού Ατυχήματος | 34 |
| 5.1 | Μεθοδολογία..... | 34 |
| 5.1.1 | Εφαρμογή του JRODOS..... | 34 |
| 5.1.2 | Στατιστική επεξεργασία με Matlab | 35 |
| 5.1.3 | Χαρτογράφηση αποτελεσμάτων | 35 |
| 5.2 | Αποτελέσματα και Χαρτογράφηση | 36 |
| 5.2.1 | Απευθείας εξωτερική ακτινοβολία από το νέφος | 36 |
| 5.2.2 | Απευθείας εξωτερική ακτινοβολία από το έδαφος..... | 38 |
| 5.2.3 | Αθροιστική δόση στον θυρεοειδή..... | 40 |
| 5.2.4 | Αθροιστική ενεργός δόση κατά τη φάση διέλευσης του νέφους..... | 42 |
| 5.2.5 | Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος σε παιδιά ενός έτους..... | 44 |
| 5.2.6 | Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος σε ενήλικες | 46 |
| 5.2.7 | Συγκέντρωση καϊσίου στο έδαφος (ξηρή εναπόθεση) | 48 |
| 5.2.8 | Συγκέντρωση καϊσίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) | 50 |
| 5.3 | Ενδεικτική προσομοίωση δυσμενέστερης ημερομηνίας..... | 53 |
| 5.3.1 | Συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων στο νέφος..... | 53 |
| 5.3.2 | Συγκέντρωση καϊσίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) | 57 |
| 5.3.3 | Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας από το έδαφος | 58 |
| 5.3.4 | Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας από το νέφος..... | 59 |
| 5.3.5 | Αθροιστική δόση στον θυρεοειδή..... | 60 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.6 | Δόση στον θυρεοειδή λόγω εισπνοής..... | 61 |
| 5.3.7 | Ενεργός δόση από το έδαφος σε ένα έτος, σε ενήλικες..... | 62 |
| 5.3.8 | Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος, σε ενήλικες | 63 |
| 6. | Συμπεράσματα | 64 |
| 7. | Κατάλογος Πινάκων..... | 66 |
| 8. | Κατάλογος Διαγραμμάτων | 67 |
| 9. | Κατάλογος Εικόνων | 68 |
| 10. | Κατάλογος Σχημάτων | 70 |
| 11. | Κατάλογος Αναφορών | 71 |

1. Περίληψη

Η ασφάλεια στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας απαιτεί συνεχή επίβλεψη, ανάλυση και βελτιώσεις των διαδικασιών και των συστημάτων. Η πρόληψη και η προετοιμασία για πιθανά ατυχήματα αποτελούν θεμελιώδες μέρος της πυρηνικής ασφάλειας. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών και λογισμικών προσομοίωσης μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη των επιπτώσεων και την ανάληψη αποτελεσματικών μέτρων προστασίας.

Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν ελκύσει σοβαρό ενδιαφέρον και ήδη αντιδραστήρες ύδατος, τύπου iPWR είναι σε προχωρημένο στάδιο σχεδιασμού, αδειοδότησης ή και κατασκευής. Λόγω του μικρού τους μεγέθους και άλλων χαρακτηριστικών ασφάλειας θεωρείται ότι οι επιπτώσεις καθώς και η ανάγκη απόκρισης σε έκτακτη ανάγκη θα είναι μικρές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκει να εκτιμήσει τις ραδιολογικές επιπτώσεις ενός υποθετικού ατυχήματος σε μικρό αρθρωτό πυρηνικό αντιδραστήρα (SMR). Ως ενδεικτική τοποθεσία θεωρείται η περιοχή της Πτολεμαΐδας, στο σημείο όπου σήμερα λειτουργεί η λιγνιτική μονάδα «Πτολεμαΐδα 5». Χρησιμοποιώντας δεδομένα για αντιδραστήρα τύπου iPWR και μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή της Πτολεμαΐδας για το πρώτο εξάμηνο του 2021, προσομοιώθηκαν 174 πιθανά σενάρια ατυχημάτων με χρήση του λογισμικού JRODOS. Τα αποτελέσματα υποβλήθηκαν σε στατιστική επεξεργασία με χρήση MATLAB, και παρουσιάστηκαν μέσω χαρτογράφησης στο πρόγραμμα QGIS. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι μέσες και οι μέγιστες δόσεις δεν υπερβαίνουν τα διεθνή επίπεδα αναφοράς, με εξαίρεση αυτές στο θυρεοειδή. Ωστόσο, ακόμα και οι τελευταίες υπερβαίνουν τα επίπεδα αναφοράς μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις εντός των ορίων της εγκατάστασης. Όπως συμπεραίνεται, ένας μικρός αρθρωτός αντιδραστήρας αναμένεται να έχει πολύ μικρές απαιτήσεις σχετικά με τη θέσπιση και διατήρηση ζώνης έκτακτης ανάγκης εκτός των ορίων της εγκατάστασης.

1. Abstract

Safety in the field of nuclear energy requires continuous monitoring, analysis and improvements of processes and systems. Prevention and preparation for possible accidents are a fundamental part of nuclear safety. The use of advanced technologies and simulation software can help anticipate impacts and take effective protection measures. Small modular reactors (SMRs) have attracted serious interest and iPWR water reactors are already at an advanced stage of design, licensing and/or construction. Due to their small size and other safety features, it is assumed that the impact as well as the need to respond to an emergency will be small.

This diploma thesis assesses the radiological impact of a hypothetical accident in a small modular nuclear reactor (SMR). An indicative location is considered to be the area of Ptolemaida, where the lignite plant "Ptolemaida 5" is currently operating. Using data for an iPWR reactor and meteorological data for the Ptolemaida area for the first half of 2021, 174 possible accident scenarios were simulated using JRODOS software. The results were statistically processed using MATLAB, and presented through mapping in the QGIS software. The results show that average and maximum doses do not exceed international reference levels, with the exception of thyroid levels. However, even the latter exceed the reference levels only at very short distances within the boundaries of the installation. As concluded, a small modular reactor is expected to have very small requirements regarding the establishment and maintenance of an emergency zone outside the boundaries of the facility.

2. Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο, η ανάγκη για ολοένα και αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα. Σύμφωνα με την ετήσια αναφορά «Global Energy Outlook» του 2023, προβλέπεται πως η παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας πρόκειται να αυξηθεί σε ποσοστό μεταξύ 62 και 185% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2021. Η ανεξάρτητη από πηγές ορυκτών καυσίμων παραγωγή ενέργειας παρουσιάζεται ως κεντρική προτεραιότητα, όχι μόνο για την ικανοποίηση των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, αλλά και για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τη διασφάλιση της βιωσιμότητας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η πυρηνική ενέργεια αναδύεται ως μία αποτελεσματική και «καθαρή» εναλλακτική, αφού προσφέρει υψηλή ενεργειακή απόδοση χωρίς τις εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με τα ορυκτά καύσιμα. Ειδικά οι νέοι, μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον, λόγω πιθανών σημαντικών πλεονεκτημάτων, όπως η κλιμακωτή κατασκευή και ευελιξία στην εγκατεστημένη ισχύ και η αυξημένη ασφάλεια. Ειδικότερα, οι αντιδραστήρες αυτοί αναμένεται να έχουν μικρότερες πιθανές επιπτώσεις λόγω ατυχήματος με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι είναι δυνατό να εξεταστεί η εγκατάστασή τους κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Τα πυρηνικά ατυχήματα αντιπροσωπεύουν έναν σοβαρό παράγοντα κινδύνου στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Αν και είναι σχετικά σπάνια, όταν συμβούν, μπορούν να έχουν εκτεταμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Τα ατυχήματα αυτά μπορούν να προκαλέσουν διαρροή ραδιενεργού υλικού, με τις συνέπειες να εξαρτώνται από την κλίμακα του ατυχήματος και τα μέτρα που θα ληφθούν για τον έλεγχό του. Σημαντικά πυρηνικά ατυχήματα όπως αυτά του Τσερνόμπιλ στην Ουκρανία το 1986 και της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία το 2011 έχουν υπογραμμίσει την ανάγκη για την εκτίμηση του εύρους των πιθανών επιπτώσεων μετά από ένα αντίστοιχο συμβάν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι ραδιολογικές συνέπειες λόγω υποθετικού πυρηνικού ατυχήματος σε μικρό αρθρωτό αντιδραστήρα τύπου iPWR στην Ελλάδα. Ως ενδεικτική τοποθεσία του πυρηνικού σταθμού θεωρήθηκε η λιγνιτική μονάδα της ΔΕΗ «Πτολεμαΐδα 5», η οποία βρίσκεται 108 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της Θεσσαλονίκης. Οι υπολογισμοί των ενδεχόμενων συγκεντρώσεων και δόσεων πραγματοποιούνται για μια ακτίνα 200 χιλιομέτρων από τον σταθμό με χρήση του λογισμικού JRODOS. Ο στόχος μας ήταν να εκτιμήσουμε τη διακύμανση των επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των καιρικών συνθηκών σε πραγματική τοποθεσία. Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα που καλύπτουν το πρώτο εξαμήνο του 2021, προσφέροντας έτσι μια αντιπροσωπευτική εικόνα της καιρικής δυναμικής που επηρεάζει τη διασπορά της ραδιενέργειας σε διάφορες συνθήκες. Για τον όρο πηγής χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις από μελέτη του Τομέα, στην οποία λαμβάνονται

υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά αυτών των αντιδραστήρων, που σχετίζονται με αυξημένη κατακράτηση της ραδιενέργειας στο περίβλημα και επομένως μείωση της συνολικής έκλυσης.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του ατυχήματος στο λογισμικό JRODOS, που αποτελεί ένα εξειδικευμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Το JRODOS ενσωματώνει διάφορες μεθόδους και μοντέλα για τη μοντελοποίηση της διασποράς των ραδιονουκλιδίων, λαμβάνοντας υπόψη τις μετεωρολογικές συνθήκες και άλλους παράγοντες όπως η τοποθεσία και ο όρος πηγής. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του JRODOS. Στην τελική φάση, πραγματοποιείται η χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων με χρήση του λογισμικού QGIS. Αυτή η διαδικασία αποτυπώνει σε χάρτες τις μέσες και τις μέγιστες συγκεντρώσεις και δόσεις που προέκυψαν από την προηγούμενη ανάλυση με MATLAB.

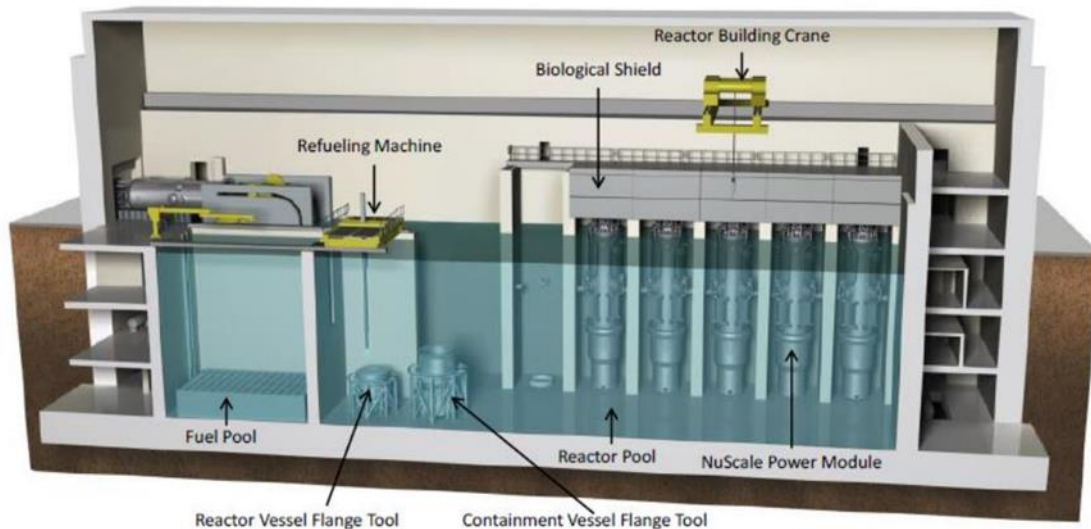
Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται οι μέσες και οι μέγιστες δόσεις για τις διάφορες κατηγορίες, όπως απευθείας εξωτερική ακτινοβολία και εισπνοή από το νέφος, απευθείας εξωτερική ακτινοβολία από το έδαφος και η αθροιστική δόση στον θυρεοειδή κατά τη διέλευση του νέφους και κατά το πρώτο έτος μετά το ατύχημα. Παράλληλα εκτιμώνται και οι μέσες και μέγιστες συγκεντρώσεις διάφορων ραδιονουκλιδίων στο έδαφος. Η εκτίμηση των μέσων τιμών καταδεικνύει τις πιο πιθανές τιμές που μπορεί να προκύψουν, ενώ οι μέγιστες καλύπτουν τη δυσμενέστερη περίπτωση. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια σαφή κατανόηση των ανώτατων ορίων ραδιενεργών επιπτώσεων που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε περίπτωση ανάλογου ατυχήματος. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αποτελεσμάτων για ενδεικτική πορεία και διασπορά του ραδιενεργού νέφους για τη δυσμενέστερη ημερομηνία αυτού του εξαμήνου κατά την οποία προκύπτει η δυσμενέστερη έκθεση του πληθυσμού.

Στο Κεφάλαιο 3, δίνονται κάποια στοιχεία για τους αντιδραστήρες SMR και τις πιθανές συνέπειες από ατυχήματα. Στο Κεφάλαιο 4, εξετάζονται όλες οι παράμετροι της μοντελοποίησης, ο όρος πηγής, οι υπολογισμοί της ατμοσφαιρικής διασποράς και εναπόθεσης, και τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Κεφάλαιο 5, αναλύονται λεπτομερώς η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της έρευνας, παρουσιάζοντας τους σχετικούς χάρτες. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη.

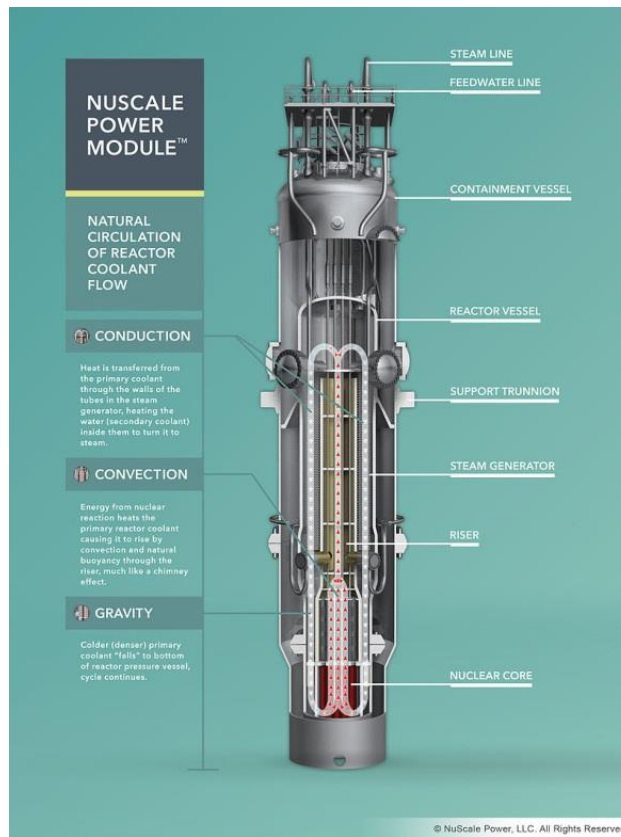
3. SMRs: Προοπτικές, Ασφάλεια και Ερευνητικές Προσεγγίσεις

3.1 Εισαγωγή στους SMR

Η υψηλή δαπάνη που απαιτείται για την επένδυση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης ισχύος, σε συνδυασμό με τους εκτεταμένους χρόνους ανέγερσής τους, έχει προκαλέσει ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό εναλλακτικών λύσεων με πιο οικονομικό κόστος και μικρότερη κατασκευή. Αυτοί οι νέοι αντιδραστήρες, γνωστοί ως μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (Small Modular Reactors - SMR), προορίζονται να κατασκευάζονται σε εργοστάσια (μέσα σε 1.5-2.5 χρόνια) και να μεταφέρονται ως πλήρη συστήματα για εγκατάσταση σε διάφορες τοποθεσίες. Η ισχύς ενός τέτοιου αντιδραστήρα ξεκινά από λιγότερο από 100 MWe και φτάνει έως και περίπου 300 MWe. Ένας σταθμός μπορεί να σχηματίζεται από τον συνδυασμό πολλαπλών τέτοιων αντιδραστήρων, προκειμένου να καλυφθούν αυξημένες απαιτήσεις ισχύος (Εικόνα 3.1). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ο όρος "αρθρωτός" αντιδραστήρας. Η εταιρεία NuScale SMR έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην ανάπτυξη αντιδραστήρων PWR προς αυτή την κατεύθυνση. Στα σχέδιά της, οι αντιδραστήρες αυτοί έχουν περίβλημα ύψους 23m και διάμετρο 4.5m, διαστάσεις πολύ μικρότερες σε σύγκριση με τους συμβατικούς LWR (Light Water Reactors - Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος) που έχουν περίβλημα ύψους 60m και διάμετρο 45m.



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση σταθμού με μονάδες NuScale (Πηγή: The NuScale Design, NuScale Power, 2016)



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα του αντιδραστήρα NuScale Power Module (50 MWe). Ο αντιδραστήρας της NuScale είναι ο πρώτος αντιδραστήρας SMR, ο σχεδιασμός του οποίου εγκρίθηκε για εμπορική χρήση στις Ηνωμένες πολιτείες. (Πηγή: Wikipedia)

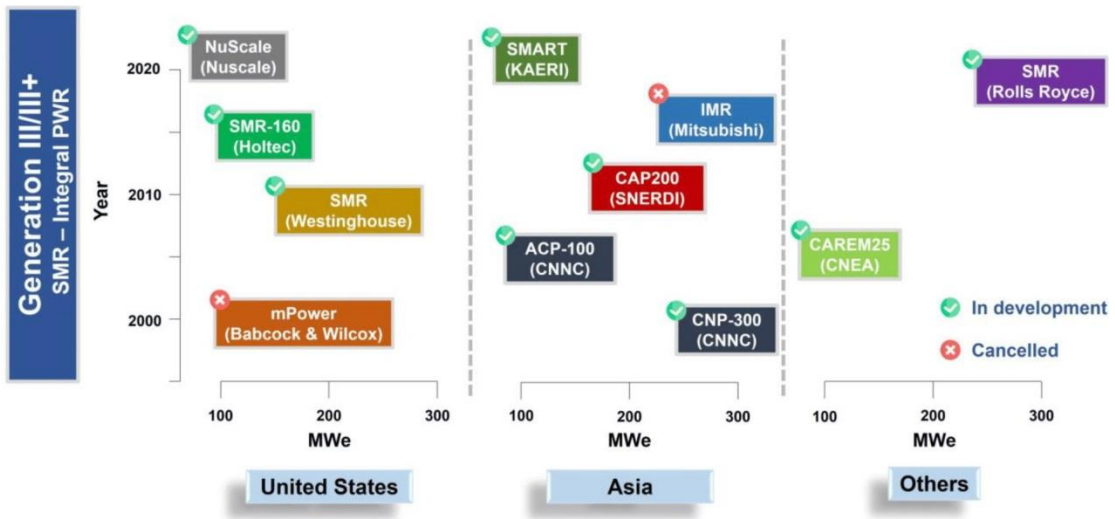
Επιπλέον, οι SMR έχουν μειώσει τις απαιτήσεις για ανεφοδιασμό σε καύσιμα. Σύμφωνα με την IAEA (International Atomic Energy Agency- Διεθνής Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας) οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε SMR ενδέχεται να απαιτούν ανεφοδιασμό κάθε τρία έως επτά χρόνια, σε σύγκριση με ένα έως δύο χρόνια για τους συμβατικούς σταθμούς. Ορισμένοι SMR έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν έως και 30 χρόνια χωρίς ανεφοδιασμό. Ο λιγότερο συχνός ανεφοδιασμός μειώνει τους κινδύνους που ενέχει η μεταφορά ραδιενεργού υλικού. Παράλληλα, μειώνει τον χρόνο κατα το οποίο ο αντιδραστήρας βρίσκεται εκτός λειτουργίας, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή χρήσης (capacity factor)

Υπάρχουν περισσότερα από 80 σχέδια για SMR παγκοσμίως αυτή τη στιγμή. Τα περισσότερα από αυτά βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης και μερικά θεωρείται ότι μπορούν να αναπτυχθούν βραχυπρόθεσμα. Υπάρχουν επί του παρόντος τέσσερις SMR σε προχωρημένο στάδιο κατασκευής στην Αργεντινή (Εικόνα 3.3), την Κίνα και τη Ρωσία, και αρκετές υπάρχουσες και νεοεισερχόμενες χώρες στην πυρηνική ενέργεια διεξάγουν έρευνα και ανάπτυξη αντιδραστήρων SMR. Αντιπροσωπευτικοί σχεδιασμοί σε

προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης παρουσιάζονται στην εικόνα 3.4. Η ΙΑΕΑ συντονίζει τις προσπάθειες των κρατών μελών για την ανάπτυξη αντιδραστήρων SMR διαφόρων τύπων, υιοθετώντας συστηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό και την ανάπτυξη βασικών τεχνολογιών γενικής εφαρμογής. Ο στόχος είναι η επίτευξη της ανταγωνιστικότητας και της αξιόπιστης απόδοσης των αντιδραστήρων αυτών. Η υπηρεσία τους βοηθά επίσης να αντιμετωπίσουν κοινά ζητήματα υποδομών που θα μπορούσαν να διευκολύνουν την ανάπτυξη των SMR.



Εικόνα 3.3: Ο αντιδραστήρας CAREM της Αργεντινής, ένας από τους πρώτους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες υπό κατασκευή. Είναι ένας iPWR 100 MWt (27 MWe μικτού) παλαιότερου σχεδιασμού (ανακοινώθηκε για πρώτη φορά το 1984). Διαθέτει 12 γεννήτριες ατμού μέσα στο δοχείο πίεσης (Πηγή: CNEA).



Εικόνα 3.4: Τρέχουσα κατάσταση σχεδίων SMR-iPWR (Πηγή: Bibliometric Review and Technical Summary of PWR Small Modular Reactors, 2023)

3.2 Πλεονεκτήματα αντιδραστήρων SMR

Λόγω πολλών ενθαρρυντικών πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών αντιδραστήρων ισχύος, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες, έχουν τραβήξει την προσοχή. Έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν σημαντική συνιστώσα της πυρηνικής τεχνολογίας και να συμβάλουν στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και στην μείωση των εκπομπών άνθρακα στον ενεργειακό τομέα. Επί του παρόντος, πολλά σχέδια έχουν παραχθεί ή αναπτύσσονται σε πολλά έθνη, συχνά με διεθνή συνεργασία (π.χ. IAEA 2018). Οι SMR ελαφρού ύδατος είναι μια γενική ομάδα σχεδιασμών που πιθανότατα πρόκειται να αναπτυχθούν σύντομα (Black et al. 2019). Οι αντιδραστήρες iPWR (integrated Pressurized Water Reactor) είναι ένας τύπος από αυτούς που έχουν ωριμάσει σε σημείο που μπορούν να αναπτυχθούν. Για παράδειγμα, το NRC των ΗΠΑ έχει ήδη πιστοποιήσει τον σχεδιασμό του αντιδραστήρα iPWR της NuScale (U.S. NRC 2020a). Σύμφωνα με το αισιόδοξο σενάριο των NEA/OECD (OECD 2016), οι SMR ενδέχεται να επιτύχουν μερίδιο έως και 21 GWe το 2035, και να αντιπροσωπεύουν το 9% της συνολικής νέας πυρηνικής παραγωγικής ικανότητας παγκοσμίως μεταξύ 2020 και 2035.

Τα οφέλη των SMR περιλαμβάνουν βελτιωμένη ασφάλεια, χαμηλότερο κόστος και πιο ευέλικτη ανάπτυξη, καθώς και πιθανές εφαρμογές εκτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Sainati et al. 2015; Locatelli et al. 2017; Black et al. 2019; Roulstone et al. 2020; Mignaca and Locatelli 2020). Τα ακριβή οικονομικά τους κόστη είναι προς το παρόν άγνωστα, αλλά εάν τα ανταγωνιστικά τους πλεονεκτήματα - όπως λιγότερα απρόοπτα συμβάντα, ταχύτεροι χρόνοι κατασκευής και μαζική παραγωγή - ισχύσουν, το κόστος τους ανά kWh μπορεί να είναι ισοδύναμο ή και μικρότερο από αυτό των μεγάλων αντιδραστήρων (Locatelli et al. 2014; OECD 2016). Σύμφωνα με τους Mancini et al. (2014), το NRC των ΗΠΑ (2016) και τον OECD (2021), μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε μικρότερες ζώνες έκτακτης ανάγκης, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος δημιουργίας και διατήρησης σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Όπως έχει προβλεφθεί (π.χ., U.S.NRC 2016; EPRI 2014), θα ήταν δυνατή η εγκατάσταση αντιδραστήρων SMR για τηλεθέρμανση πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές (Leurent et al. 2018) ή η άμεση χρήση τους για την αντικατάσταση μονάδων άνθρακα οι οποίες έχουν αποσυρθεί (Sainati et al. 2015; Ramana et al. 2013). Η ταχεία επίτευξη ενός βαθμού εναρμόνισης (π.χ. διεθνώς) σχετικά με τις προσεγγίσεις και τις απαιτήσεις αδειοδότησης (Sainati et al. 2015; US NRC 2016; U.S.NRC 2020b), μεταξύ άλλων στον τομέα της διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, αποτελεί σημαντικό παράγοντα που θα μπορούσε να στηρίξει την επιτυχή ανάπτυξη των SMR.

3.3 Ανάλυση πιθανού ατυχήματος σε SMR

Με τη χρήση κατάλληλων παραδοχών για τη χρονική εξέλιξη των ατμοσφαιρικών εκπομπών σε υποθετικό σοβαρό ατύχημα, μπορεί να υπολογιστεί το απαιτούμενο μέγεθος των ζωνών έκτακτης ανάγκης (π.χ. IAEA 2013). Σύμφωνα με το NRC των ΗΠΑ (NRC 2020b, U.S. NRC 2016), οι αντιδραστήρες SMR μπορούν να αξιολογηθούν όσον αφορά τις επιπτώσεις ατυχημάτων και την προετοιμασία έκτακτης ανάγκης λαμβάνοντας υπόψη τον πραγματικό κίνδυνο (risk informed approach), ο οποίος ενδέχεται να είναι μειωμένος ως αποτέλεσμα των καινοτόμων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών τους και της πιθανότητας μικρότερου όρου πηγής σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ισχύος τους, η οποία είναι μία τάξη μεγέθους χαμηλότερη σε σύγκριση με έναν μεγάλο αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα μια αναλογικά χαμηλότερη ποσότητα ραδιενέργειας διαθέσιμη για απελευθέρωση. Επιπλέον, ο σχεδιασμός τους προσφέρει τη δυνατότητα για έναν όρο πηγής ατυχήματος ακόμη χαμηλότερο από αυτόν που υπολογίζεται, απλώς σταθμίζοντας την ισχύ τους. Αυτό συνδέεται με ορισμένα εγγενή παθητικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού τους (π.χ. IAEA 2018, Zeliang et al. 2020) που μπορεί να μειώσει τις εκλύσεις ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό είναι ο μεγαλύτερος λόγος επιφάνειας εξωτερικού περιβλήματος προς όγκο (Carless et al. 2019, NEI 2012) που ευνοεί την εναπόθεση ραδιενέργειας στο περίβλημα. Η ραδιενεργός αραίωση ή εναπόθεση εντός του κτηρίου του αντιδραστήρα των iPWR, που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, αναμένεται να μειώσει περαιτέρω τις εκλύσεις ραδιενέργειας. Θα μπορούσαν επίσης να αναμένονται χαμηλότερες ραδιολογικές συνέπειες, λόγω των διαφορών στην ακολουθία των γεγονότων σοβαρών ατυχημάτων στους SMR. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας της απουσίας εξωτερικών σωληνώσεων στο δοχείο, μια μεγάλη διαρροή λόγω ατυχήματος απώλειας ψυκτικού (LBLOCA) που εξετάζεται επί του παρόντος για αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) ενδέχεται να μην είναι πιθανή σε iPWR (NEI 2012; Mehboob και Aljohani 2018). Ως αποτέλεσμα, εναλλακτικά σενάρια ατυχημάτων, με μικρότερη απώλεια ψυκτικού (SBLOCA), θεωρούνται ως πιο πιθανά (NEI 2012). Αυτό το είδος ατυχήματος θα είχε αργή εξέλιξη (Li et al. 2017; Skolik et al. 2021), με αποτέλεσμα καθυστερημένες και πιθανώς μειωμένες εκπομπές στο περίβλημα και στην ατμόσφαιρα. Οι πιστοποιήσεις ασφάλειας και οι διεξοδικές προσομοιώσεις με μεγάλους κώδικες συστήματος και κώδικες σοβαρών ατυχημάτων μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις ακολουθίες ατυχημάτων. Μέρη της ανάλυσης ατυχημάτων ενός iPWR είναι διαθέσιμα στο κοινό στα έγγραφα ασφάλειας για την πιστοποίηση σχεδιασμού του NuScale iPWR (Campbell et al. 2019).

3.4 Ερευνητικές εργασίες για SMR

Έχουν γίνει πολλές μελέτες σχετικά με την ανάλυση ατυχημάτων και τις προσομοιώσεις για μεγάλους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR), συμπεριλαμβανομένων εξελιγμένων σχεδίων (π.χ., Dvorzhak et al. 2016; Ding et al. 2018; Mehboob και Aljohani 2018; Sun et al. 2018; Zhao et al. 2015). Αντίστοιχες εργασίες για SMR, από την άλλη πλευρά, είναι πολύ λιγότερες. Οι Skolik et al. (2021) χρησιμοποίησαν τον κώδικα RELAP/SCDAPSIM για την ανάλυση SBLOCA για μια ακολουθία ατυχημάτων iPWR που περιελάμβανε βλάβη των συστημάτων ψύξης έκτακτης ανάγκης και των συστημάτων απαγωγής της παραμένουσας θερμότητας, με αποτέλεσμα την τήξη του πυρήνα σε 4,8 ώρες. Οι Kim et al. (2011) και Li et al. (2017) χρησιμοποίησαν τον κώδικα σοβαρών ατυχημάτων MELCOR για να προσομοιώσουν διάφορα είδη ατυχημάτων απώλειας ψυκτικού σε iPWR. Η τελευταία εργασία διερεύνησε ένα συμβάν απώλειας ψυκτικού που προκλήθηκε από έναν έντονο σεισμό, και συγχρόνως ολική απώλεια της τελικής καταβόθρας θερμότητας (UHS) λόγω βλάβης στο περίβλημα. Τα μοντέλα προέβλεπαν τήξη του πυρήνα και ρήξη του δοχείου του αντιδραστήρα από το μάγμα που προέκυψε από την ανάμειξη λιωμένων πυρηνικών καυσίμων και άλλων υλικών του πυρηνικού αντιδραστήρα (corium). Πρόσφατα, δημοσιεύθηκαν μερικές μελέτες σχετικά με την εκτίμηση των ραδιολογικών επιπτώσεων και των σχετικών ζωνών έκτακτης ανάγκης των SMR. Οι Hummel et al. (2020) διερεύνησαν τις ραδιολογικές επιπτώσεις διαφόρων σχεδίων SMR. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τη συνολική ενεργότητα στις εκτιμήσεις των Li et al. (2017) για τον iPWR, υποθέτοντας συνολική διάρκεια έκλυσης: 1 ώρα, 36 ώρες και 72 ώρες. Οι Carless et al. (2019) υπέθεσαν σχετικά μικρό χρόνο έκλυσης και χρησιμοποίησαν τιμές για τους συντελεστές απορρύπανσης του περιβάλλοντος που αποκτήθηκαν από την πειραματική επαλήθευση της συμπεριφοράς αερολύματος μετά από ατύχημα σε iPWR που πραγματοποιήθηκε από το EPRI (Electric Power Research Institute). Οι παραπάνω δύο εργασίες χρησιμοποίησαν διαφορετικούς όρους πηγής, αλλά και οι δύο χρησιμοποίησαν το μοντέλο ευθύγραμμου νέφους Gauss για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής διασποράς.

4. Μοντελοποίηση και Δεδομένα

4.1 Όρος πηγής

4.1.1 Μεθοδολογίες υπολογισμού όρου πηγής

Γενικά, ο υποθετικός όρος πηγής μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την εκτίμησή του. Μια προσέγγιση θα μπορούσε να είναι η εκτίμηση του όρου πηγής με βάση αριθμητικά δεδομένα που προκύπτουν από λεπτομερείς, μηχανιστικούς υπολογισμούς, χρησιμοποιώντας κώδικες σοβαρών ατυχημάτων. Εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλους αντιδραστήρες, χρησιμοποιώντας κλάσματα έκλυσης του πυρήνα και συντελεστές για αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWRs). Η μοναδική διαφορά είναι ότι το απόθεμα ραδιονουκλιδίων στην καρδιά του αντιδραστήρα καθίσταται ανάλογο της ισχύος ενός μικρού αρθρωτού αντιδραστήρα (SMR). Τέλος, υπάρχει η “υβριδική” επιλογή προσέγγισης (NEI, 2012), βασισμένη στον συνδυασμό της τυπικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται για μεγάλους αντιδραστήρες με κάποιες βασικές παραμέτρους προσαρμοσμένες, ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού των SMR.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο όρος πηγής που χρησιμοποιούμε έχει προκύψει μέσω υβριδικής προσέγγισης, καθώς για τον υπολογισμό του λήφθηκαν υπόψη και χαρακτηριστικά των iPWR. Αυτό σημαίνει ότι συνυπολογίζουμε την αυξημένη παθητική κατακράτηση του αερολύματος εντός του περιβλήματος του iPWR λόγω του σημαντικά μεγαλύτερου λόγου επιφάνειας προς όγκο. Αυτή η πτυχή ενσωματώνεται χρησιμοποιώντας δεδομένα ταχύτητας εναπόθεσης που προκύπτουν από εκτενή πειραματική και υπολογιστική μελέτη σχετικά με τη συμπεριφορά του αερολύματος υπό συνθήκες που αντιπροσωπεύουν αυτές του περιβλήματος ενός iPWR, που πραγματοποιήθηκε από το EPRI (Electric Power Research Institute) το 2014 και το 2018 (EPRI 2014, EPRI 2018a,b). Εκτός από την ενισχυμένη κατακράτηση αερολύματος, η προσέγγιση συμπεριλαμβάνει το διαφορετικό προβλεπόμενο χρονικό πλαίσιο ενός σοβαρού ατυχήματος σε έναν iPWR. Η επιλογή των συνθηκών βασίζεται σε εκτιμήσεις για το εύρος των θερμοϋδραυλικών παραμέτρων στο περίβλημα από αναλύσεις ατυχημάτων που είναι διαθέσιμες στην ανοιχτή βιβλιογραφία και σε ρυθμιστικές αξιολογήσεις της U.S.NRC για αντιδραστήρες iPWR.

Η διαρροή του κελύφους κατά τη διάρκεια του ατυχήματος καθορίζει άμεσα τον ρυθμό απελευθέρωσης ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διαρροές του κελύφους εξαρτώνται από την πίεση. Στη βιβλιογραφία, ένα συχνά χρησιμοποιούμενο ποσοστό για τη διαρροή του κελύφους πυρηνικών αντιδραστήρων, συμπεριλαμβανομένων των SMR, είναι ίσο με 0,1% ανά ημέρα (U.S.NRC 2004, Mehboud and Aljohani 2018, Carless et al. 2019). Η τιμή που καθορίζεται στην αξιολόγηση ασφάλειας της U.S.NRC για τον σχεδιασμό iPWR είναι ίση με 0,2% ανά ημέρα. Επιπλέον,

ως αποτέλεσμα της αυξημένης πίεσης που προκαλείται από το παραγόμενο υδρογόνο, η U.S. NRC διαπίστωσε ότι ακόμη και πολύ υψηλότερες τιμές μεταξύ 0,6 και 0,7% θα μπορούσαν να επιτευχθούν και να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του ατυχήματος. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την τελευταία αξιολόγηση, εδώ χρησιμοποιείται μια αυξημένη τιμή του ρυθμού διαρροής του κελύφους, ίση με 0,65% του όγκου του περιβλήματος ανά ημέρα για ολόκληρη τη διάρκεια της έκλυσης.

Το απόθεμα των ραδιονουκλιδίων για iPWR εκτιμάται με βάση το απόθεμα στον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα Surry (2640 MWth), που χρησιμοποιήθηκε στην Έκθεση State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) της U.S.NRC (2013). Η παραπάνω ενεργότητα σταθμίζεται για ισχύ 160 MWth. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 68 ραδιονουκλιδίων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς (Εικόνα 4.1) καθώς και η συνολική ενεργότητα για καθένα στον πυρήνα στην καρδιά του αντιδραστήρα (Εικόνα 4.2). Πρέπει να αναγνωριστεί ότι αυτή είναι μόνο μια προσέγγιση του πραγματικού αποθέματος του πυρήνα σε έναν iPWR. Για μια πιο ακριβή υπόθεση, προηγμένοι κώδικες, όπως ο ORIGEN (Croff et al. 1980), θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά.

Ο υπολογισμός του όρου πηγής εκτελείται με βάση εκτεταμένη ανάλυση της εξέλιξης του ατυχήματος, όπως αυτά που περιγράφονται στην U.S.NRC (Campbell et al. 2019) , αναφορικά με αντιδραστήρες τύπου iPWR . Η έρευνα εστιάζει σε περιστατικά Small Break Loss of Coolant Accidents (Ατυχήματα απώλειας ψυκτικού - SBLOCA) που εκδηλώνονται με γρήγορη πρόοδο προς την τήξη του πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται ατυχήματα που προκαλούνται από διαρροή σε αγωγό του συστήματος χημικού ελέγχου (Chemical and Volume Control System - CVCS), είτε εντός είτε εκτός του κελύφους, καθώς και από αποτυχία των βαλβίδων εκτόνωσης του αντιδραστήρα (Reactor Vent Valves - RVV). Τα περιστατικά που προκαλούνται από τη διαρροή της γραμμής CVCS παρουσιάζουν την ταχύτερη μετάβαση στη φάση τήξης του πυρήνα ανάμεσα στα σενάρια που εξέτασε η NRC των ΗΠΑ (τα οποία ταιριάζουν με αυτά στα έγγραφα ασφάλειας για την αίτηση πιστοποίησης σχεδιασμού αντιδραστήρα). Το αν η διαρροή συμβαίνει εντός ή εκτός του περιβλήματος δεν φαίνεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη διαδικασία τήξης του πυρήνα.

Η διάρκεια των φάσεων του ατυχήματος φαίνεται στην εικόνα 4.3. Η πρόοδος της τήξης του πυρήνα σε αυτά τα περιστατικά εμφανίζει σημαντική καθυστέρηση, περίπου 4 και 9 ώρες για τα ατυχήματα CVCS και RVV αντίστοιχα. Επιπλέον, η διάρκεια της φάσης εντός του αντιδραστήρα, όπου απελευθερώνονται τα περισσότερα νουκλίδια, είναι επίσης εκτεταμένη. Συνολικά, αναμένεται ότι το ατύχημα και η έκλυση του πυρήνα θα κινηθούν πολύ πιο αργά από ό, τι συμβαίνει συνήθως σε μεγάλους LWR. Η πιο αργή πρόοδος του ατυχήματος και η καθυστέρηση στην έκλυση αυξάνουν τη ραδιενεργή διάσπαση των νουκλιδίων μικρής ημιζωής. Η καθυστέρηση στην έναρξη της τήξης του πυρήνα προσφέρει περισσότερο χρόνο για την ασφαλή υλοποίηση μιας αποτελεσματικότερης απόκρισης.

Οι Li et al. (2017) χρησιμοποίησαν τον κώδικα MELCOR για τη διεξαγωγή και αναφορά ολοκληρωμένων προσομοιώσεων ενός σοβαρού ατυχήματος iPWR. Αυτή η έρευνα εξετάζει μια διαφορετική κατάσταση όπου ένας ακραίος σεισμός εκτός σχεδιασμού προκαλεί μία ρήξη στο περίβλημα με αποτέλεσμα μια σταδιακή διαρροή νερού από το περίβλημα. Σε αυτή την προσομοίωση, η φάση της τήξης του πυρήνα εντός του δοχείου πίεσης αρχίζει περίπου στις 17 ώρες. Στις 127,1 ώρες, το μάγμα που προκύπτει από την ανάμειξη λιωμένων πυρηνικών καυσίμων και άλλων υλικών του πυρηνικού αντιδραστήρα διαπερνά το δοχείο του αντιδραστήρα.

Διπλωματική εργασία – Γρηγοροπούλου Χρυσούλα Άρτεμις

| time(s) | 3600 | 7200 | 10800 | 14400 | 18000 | 36000 | 54000 | 72000 | 90000 | 108000 | 120000 |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| time(h) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 33.33333 |
| 'Kr85' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.86E+08 | 3.96E+10 | 2.22E+12 | 2.59E+12 | 2.59E+12 | 2.59E+12 | 2.58E+12 | 1.72E+12 |
| 'Kr85m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.26E+09 | 5.68E+11 | 2.39E+13 | 1.39E+13 | 6.42E+12 | 2.96E+12 | 1.37E+12 | 4.72E+11 |
| 'Kr87' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.80E+09 | 2.21E+11 | 5.33E+12 | 5.91E+11 | 3.94E+10 | 2.63E+09 | 1.76E+08 | 1.05E+07 |
| 'Kr88' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.93E+09 | 1.04E+12 | 3.77E+13 | 1.48E+13 | 4.39E+12 | 1.30E+12 | 3.85E+11 | 8.99E+10 |
| 'Xe133' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.78E+10 | 7.98E+12 | 4.43E+14 | 5.05E+14 | 4.90E+14 | 4.76E+14 | 4.63E+14 | 3.01E+14 |
| 'Xe135' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.30E+10 | 1.76E+12 | 8.55E+13 | 7.08E+13 | 4.84E+13 | 3.31E+13 | 2.26E+13 | 1.09E+13 |
| 'Xe135m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.69E+05 | 2.32E+07 | 1.84E+08 | 8.97E+03 | 1.81E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Cs134' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.24E+09 | 1.07E+11 | 3.32E+11 | 9.35E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Cs136' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.17E+09 | 3.86E+10 | 1.20E+11 | 3.35E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Cs137' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.29E+09 | 7.57E+10 | 2.35E+11 | 6.60E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Rb86' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.00E+07 | 1.32E+09 | 4.10E+09 | 1.15E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Rb88' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.60E+06 | 4.32E+07 | 1.22E+08 | 4.96E-03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ba139' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.53E+09 | 4.35E+10 | 2.92E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ba140' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.94E+10 | 3.25E+11 | 9.15E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Sr89' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.20E+10 | 1.82E+11 | 5.14E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Sr90' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.83E+09 | 1.39E+10 | 3.93E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Sr91' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.08E+10 | 1.71E+11 | 3.92E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Sr92' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.04E+10 | 8.40E+10 | 1.12E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ba137m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.93E-19 | 1.01E-18 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'I131' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.06E+10 | 7.82E+11 | 2.95E+12 | 8.21E+04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'I132' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.30E+09 | 3.43E+11 | 1.27E+12 | 1.50E+04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'I133' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.79E+10 | 1.44E+12 | 5.40E+12 | 1.38E+05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'I134' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.14E+09 | 7.55E+10 | 2.72E+11 | 7.95E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'I135' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.72E+10 | 1.02E+12 | 3.83E+12 | 7.95E+04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te127' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.57E+09 | 2.93E+10 | 6.70E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te127m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.79E+08 | 6.44E+09 | 1.82E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te129' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.32E+09 | 1.03E+10 | 5.24E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te129m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.75E+09 | 2.27E+10 | 6.41E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te131m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.62E+09 | 7.93E+10 | 2.10E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te132' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.65E+10 | 6.31E+11 | 1.74E+04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Te131' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.13E+07 | 4.41E+08 | 1.14E-01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Rh105' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.48E+09 | 2.04E+10 | 5.47E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ru103' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.25E+09 | 3.51E+10 | 9.93E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ru105' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.55E+09 | 1.26E+10 | 2.28E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ru106' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.29E+09 | 1.07E+10 | 3.03E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Rh103m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.20E+08 | 1.70E+09 | 5.74E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Rh106' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.80E-133 | 8.44E-133 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Nb95' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.82E+08 | 3.15E+09 | 8.92E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Co58' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.42E+04 | 3.65E+05 | 1.03E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Co60' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.45E+05 | 2.02E+06 | 5.73E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Mo99' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.03E+09 | 4.15E+10 | 1.14E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Tc99m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.93E+09 | 2.39E+10 | 4.86E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Nb97' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.86E+07 | 3.02E+08 | 1.63E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ce141' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.97E+08 | 7.41E+09 | 2.09E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ce143' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.74E+08 | 6.38E+09 | 1.70E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Ce144' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.32E+08 | 5.22E+09 | 1.48E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Np239' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.98E+09 | 8.23E+10 | 2.25E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pu238' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.54E+06 | 1.27E+07 | 3.60E-01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pu239' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.77E+05 | 1.46E+06 | 4.14E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pu240' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.16E+05 | 1.79E+06 | 5.06E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pu241' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.27E+07 | 5.18E+08 | 1.47E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Zr95' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.66E+08 | 3.02E+09 | 8.56E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Zr97' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.13E+08 | 2.58E+09 | 6.48E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Am241' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.54E+04 | 2.10E+05 | 5.94E-03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Cm242' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.42E+06 | 6.96E+07 | 1.97E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Cm244' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.36E+05 | 6.90E+06 | 1.96E-01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'La140' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.91E+08 | 3.23E+09 | 8.70E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'La141' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.86E+08 | 1.51E+09 | 2.56E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'La142' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.86E+07 | 4.63E+08 | 3.52E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Nd147' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.49E+08 | 1.23E+09 | 3.47E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pr143' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.41E+08 | 2.82E+09 | 7.93E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Y90' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.32E+06 | 1.03E+07 | 4.51E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Y91' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.90E+08 | 2.40E+09 | 6.78E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Y92' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.39E+08 | 1.12E+09 | 1.81E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Y93' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.60E+08 | 2.13E+09 | 4.97E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Y91m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.74E+06 | 4.39E+07 | 1.13E-01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pr144' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.80E+04 | 1.24E+05 | 4.22E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 'Pr144m' | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.82E-04 | 2.31E-03 | 1.17E-17 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

Εικόνα 4.1: Όρος πηγής

| Radionuclide | Bq | | Radionuclide | Bq |
|--------------|----------|--|--------------|----------|
| Kr-85 | 1.92E+15 | | Ru-106 | 9.12E+16 |
| Kr-85m | 5.26E+16 | | Rh-103m | 3.00E+17 |
| Kr-87 | 1.04E+17 | | Rh-106 | 1.02E+17 |
| Kr-88 | 1.39E+17 | | Nb-95 | 3.37E+17 |
| Xe-133 | 3.95E+17 | | Co-58 | 3.12E+12 |
| Xe-135 | 1.17E+17 | | Co-60 | 1.73E+13 |
| Xe-135m | 8.40E+16 | | Mo-99 | 3.70E+17 |
| Cs-134 | 2.81E+16 | | Tc-99m | 3.28E+17 |
| Cs-136 | 1.02E+16 | | Nb-97 | 3.41E+17 |
| Cs-137 | 1.99E+16 | | Ce-141 | 3.17E+17 |
| Rb-86 | 3.49E+14 | | Ce-143 | 2.96E+17 |
| Rb-88 | 1.41E+17 | | Ce-144 | 2.23E+17 |
| Ba-139 | 3.61E+17 | | Np-239 | 3.69E+18 |
| Ba-140 | 3.50E+17 | | Pu-238 | 5.41E+14 |
| Sr-89 | 1.94E+17 | | Pu-239 | 6.23E+13 |
| Sr-90 | 1.48E+16 | | Pu-240 | 7.62E+13 |
| Sr-91 | 2.44E+17 | | Pu-241 | 2.21E+16 |
| Sr-92 | 2.61E+17 | | Zr-95 | 3.23E+17 |
| Ba-137m | 1.90E+16 | | Zr-97 | 3.26E+17 |
| I-131 | 1.81E+17 | | Am-241 | 2.23E+13 |
| I-132 | 2.66E+17 | | Cm-242 | 7.43E+15 |
| I-133 | 3.75E+17 | | Cm-244 | 7.36E+14 |
| I-134 | 4.22E+17 | | La-140 | 3.69E+17 |
| I-135 | 3.58E+17 | | La-141 | 3.32E+17 |
| Te-127 | 1.69E+16 | | La-142 | 3.21E+17 |
| Te-127m | 2.75E+15 | | Nd-147 | 1.33E+17 |
| Te-129 | 5.07E+16 | | Pr-143 | 3.03E+17 |
| Te-129m | 9.71E+15 | | Y-90 | 1.56E+16 |
| Te-131m | 3.72E+16 | | Y-91 | 2.56E+17 |
| Te-132 | 2.79E+17 | | Y-92 | 2.68E+17 |
| Te-131 | 1.66E+17 | | Y-93 | 3.01E+17 |
| Rh-105 | 1.89E+17 | | Y-91m | 1.43E+17 |
| Ru-103 | 3.00E+17 | | Pr-144 | 2.36E+17 |
| Ru-105 | 2.05E+17 | | Pr-144m | 3.30E+15 |

Εικόνα 4.2: Συνολική ενεργότητα στην καρδιά του iPWR στην αρχή του ατυχήματος (Πηγή: Progress in Nuclear Energy, Dimitris Mitrakos, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2022)

| | Phase duration (hr) | | |
|-------------|----------------------|-----------------|------------------|
| | Gas phase | In-vessel phase | Release delay |
| CVCS | 0.7 | 2.3 | 3.9 |
| RVV | 1 | 9.7 | 8.8 |
| | Release fraction (%) | | Group |
| Source Term | 0.05 | 0.95 | Noble Gases |
| | 0.05 | 0.35 | Halogens |
| | 0.05 | 0.25 | Alkali Metals |
| | 0 | 0.05 | Tellurium Metals |
| | 0 | 0.02 | Ba, Sr |
| | 0 | 0.0025 | Noble Metals |
| | 0 | 0.0005 | Cerium Group |
| | 0 | 0.0002 | Lanthanides |

Εικόνα 4.3: Ποσοστά έκλυσης και διάρκεια φάσεων του ατυχήματος (Πηγή: Progress in Nuclear Energy, Dimitris Mitrakos, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2022)

4.1.2 Έκλυση και μεταφορά του αερολύματος στο περίβλημα

Η εκτίμηση του όρου πηγής βασίζεται στον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης της αερομεταφερόμενης ραδιενέργειας εντός του δοχείου του περιβλήματος (CV). Θεωρείται ότι μόλις απελευθερωθούν ραδιονουκλίδια από το καύσιμο, αναμειγνύονται άμεσα και ομοιόμορφα εντός του περιβλήματος. Δεν λαμβάνεται υπόψη αραίωση ή εναπόθεση μέσα στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Με βάση αυτές τις υποθέσεις, η διατήρηση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = (-\lambda_i^{decay} - \lambda^{leak} - \lambda^{dep})q_i(t) + \dot{Q}_i(t), \quad i = 1 \dots n_n, \text{ εξ. (4.1)}$$

Όπου:

$q_i(t)$: συγκέντρωση του προϊόντος σχάσης i (από συνολικά n_n νουκλίδια) εντός του περιβλήματος (Bq/m^3)

$\dot{Q}_i(t)$: ρυθμός έκλυσης του προϊόντος σχάσης από τον πυρήνα στο περίβλημα ($\text{Bq}/\text{m}^3\text{s}$). Σύμφωνα με την U.S.NRC, θεωρείται σταθερός σε κάθε φάση. Υπολογίζεται ως το πηλίκο της εκλυόμενης ενεργότητας σε κάθε φάση προς την διάρκεια της φάσης αυτής (Πίνακας 3.3)

λ_i^{decay} : σταθερά διάσπασης του προϊόντος σχάσης i

λ^{leak} : ρυθμός διαρροής ανά όγκο περιβλήματος (s^{-1})

λ^{dep} : ρυθμός απομάκρυνσης του αερολύματος στο περίβλημα, λόγω εναπόθεσης (s^{-1})

Οι ρυθμοί απομάκρυνσης υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση, όπου u^{gr} , u^{th} και u^{df} είναι οι ταχύτητες εναπόθεσης λόγω βαρυτικής καθίζησης, θερμοφόρισης και διάχυσης, αντίστοιχα.

$$\lambda^{dep} = u^{gr} \frac{S_{floor}}{V} + (u^{th} + u^{df}) \frac{S_{cv}}{V}, \text{ εξ. (4.2)}$$

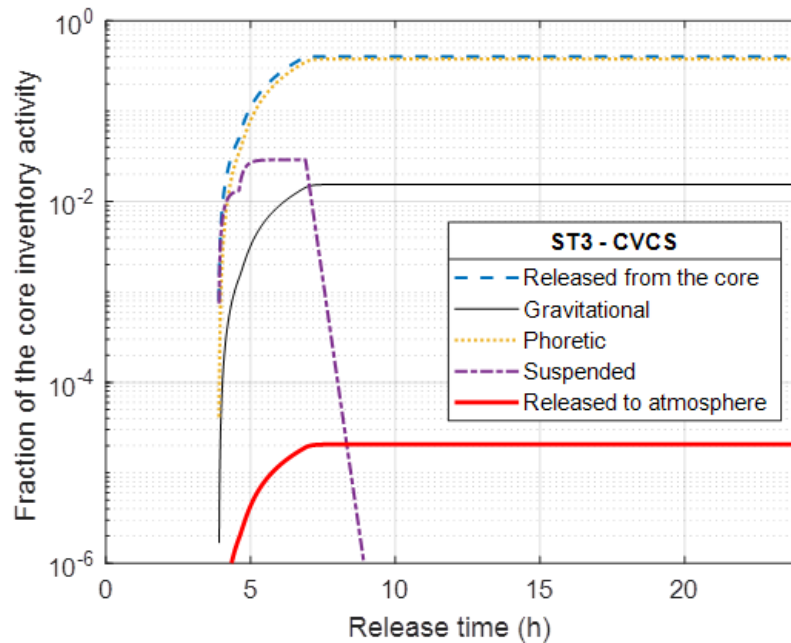
Διαφορετικές επιφάνειες εναπόθεσης εντός του περιβλήματος συνδέονται με τους διάφορους μηχανισμούς εναπόθεσης. Για παράδειγμα, η βαρυτική καθίζηση λαμβάνεται υπόψη μόνο για το δάπεδο του περιβλήματος (S_{floor}), ενώ οι φορητικοί μηχανισμοί για την επιφάνεια της ψυχόμενης επιφάνειας συγκράτησης (S_{cv}), δηλαδή την εξωτερική επιφάνεια του δακτυλίου του περιβλήματος συν την επιφάνεια του δαπέδου. Οι επιφάνειες υπολογίστηκαν με βάση κυλινδρική γεωμετρία για τον αντιδραστήρα και το περίβλημα, με διαστάσεις που παρουσιάζονται από τον IAEA το 2018 (Πίνακας 4.4.). Ο

ελεύθερος όγκος (V) του περιβλήματος λήφθηκε ίσος με αυτόν που χρησιμοποιείται από τους Campbell et al. (2019).

| | |
|--|----------------------|
| Power | 160 MWth |
| RV (diameter x height) | 3.0 m x 17.8 m |
| CV (diameter x height) | 4.4 m x 23.1 m |
| Annulus floor area, S_{floor} | 22.3 m ² |
| CV internal deposition area (side + floor), S_{cv} | 319.3 m ² |
| CV free volume, V | 180 m ³ |

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς για έναν τυπικό iPWR (Πηγή: Progress in Nuclear Energy, Dimitris Mitrakos, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2022)

Η εξίσωση (4.1) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης κάθε ραδιονουκλιδίου στο περίβλημα, από την οποία μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ο ρυθμός έκλυσης στην ατμόσφαιρα ($= q_i(t)\lambda^{leak}V$). Η επαναιώρηση στο περίβλημα δεν λαμβάνεται υπόψη στο ανωτέρω μοντέλο απομάκρυνσης αερολύματος στο περίβλημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποτίμηση του όρου πηγής στην ατμόσφαιρα. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για το ποσοστό επαναιώρησης στη συγκράτηση ενός iPWR, αμελούμε αυτόν τον μηχανισμό υποθέτοντας, ωστόσο, ότι οι αβεβαιότητες που εμπλέκονται αντισταθμίζονται από τον βαθμό συντηρητισμού στη συνολική προσέγγιση.



Διάγραμμα 4.5: Ισορροπία ιωδίου σε ατύχημα τύπου CVCS (Πηγή: Progress in Nuclear Energy, Dimitris Mitrakos, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2022)

Στο διάγραμμα 4.5 παρουσιάζεται η ισορροπία του ιωδίου στο περίβλημα για τους διάφορους εμπλεκόμενους μηχανισμούς (οι φορητικές επιδράσεις περιλαμβάνουν μόνο θερμοφόρηση). Η συμβολή παρουσιάζεται ξεχωριστά για τους δύο διαφορετικούς μηχανισμούς εναπόθεσης, δηλαδή τη θερμοφόρηση και τη βαρυτική καθίζηση. Για την εναπόθεση αερολυμάτων, η διαδικασία εξελίσσεται σε πολύ μικρότερο χρονικό πλαίσιο και με χαμηλότερες τιμές, λόγω του γρήγορου ρυθμού - μεγαλύτερου από μία τάξη μεγέθους από αυτόν της έκλυσης του πυρήνα-, γεγονός που οδηγεί σε γρήγορη εξάντληση των αιωρούμενων αερολυμάτων. Τα αερολύματα εναποτίθενται πολύ ταχύτερα από ό,τι διαρρέουν εκτός περιβλήματος, οδηγώντας στην ταχεία ολοκλήρωση της έκλυσης.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.5, η θερμοφόρηση είναι μακράν ο κυρίαρχος μηχανισμός, επιτρέποντας μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα της ραδιενέργειας να απελευθερωθεί τελικά στην ατμόσφαιρα. Μετά την ολοκλήρωση της έκλυσης από τον πυρήνα, παρατηρείται απότομη μείωση της αιωρούμενης ραδιενέργειας στο περίβλημα όπως φαίνεται από την κάθετη ευθεία γραμμή. Η συμβολή της βαρυτικής καθίζησης είναι περισσότερο από τάξη μεγέθους χαμηλότερη, λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας εναπόθεσης, αλλά κυρίως λόγω της σημαντικά χαμηλότερης περιοχής εναπόθεσης (Πίνακας 4.4). Λόγω της πολύ αποτελεσματικής κατακράτησης αερολυμάτων στο περίβλημα με θερμοφόρηση, μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα της διαθέσιμης ραδιενέργειας τελικά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

4.2 Ατμοσφαιρική διασπορά

Για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής μεταφοράς και διασποράς του ραδιενεργού νέφους που εκλύεται χρησιμοποιείται το λογισμικό JRODOS. Το JRodos είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης μετά από έκλυση ραδιενεργού υλικού στο περιβάλλον. Περιλαμβάνει εξελιγμένα μοντέλα προσομοίωσης για την πρόβλεψη και την ανάλυση των περιβαλλοντικών, υγειονομικών και οικονομικών επιπτώσεων.

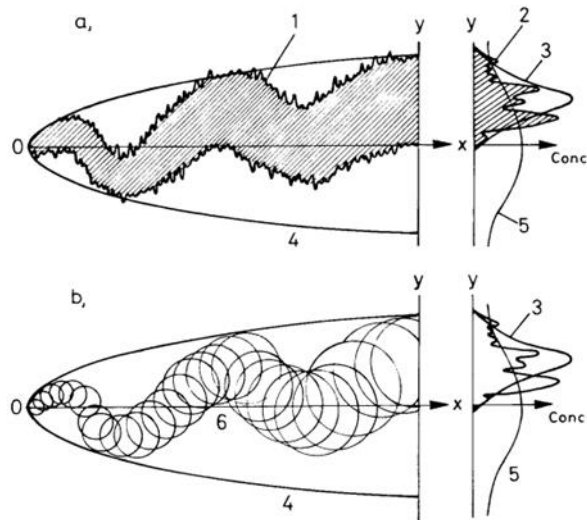
Το JRODOS χρησιμοποιεί παγκόσμιες βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικές με το περιβάλλον, τη γεωγραφία, την τοπολογία, και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι βάσεις δεδομένων εμπεριέχουν εκτενείς πληροφορίες για το έδαφος, τη χρήση της γης, τα ύδατα, και άλλα στοιχεία που επηρεάζουν τη διασπορά των ραδιενεργών ουσιών.

Όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα, το JRODOS διαθέτει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς και προγνώσεις καιρού από μετεωρολογικά μοντέλα. Αυτά τα δεδομένα είναι σημαντικά για τον υπολογισμό της κατεύθυνσης και της ταχύτητας της ροής του αέρα, που παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά του ραδιενεργού υλικού.

Το JRODOS χρησιμοποιεί διάφορα μοντέλα για να παρέχει προβλέψεις και αναλύσεις σχετικά με τη διασπορά ραδιενεργών ουσιών σε σενάρια έκτακτης ανάγκης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους ειδικούς να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση πολυπλοκότερες και ρεαλιστικότερες προσομοιώσεις των δυνητικών επιπτώσεων.

Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, το μοντέλο ατμοσφαιρικής διασποράς που χρησιμοποιήθηκε ήταν το RIMPUFF (Risø Mesoscale Puff). Το RIMPUFF είναι ένα Lagrange μοντέλο που προσομοιώνει τη διασπορά ουσιών που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, για την αξιολόγηση των επιπτώσεων εκπομπών από βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή πυρηνικά ατυχήματα, λαμβάνοντας υπόψη μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η ταχύτητα, η κατεύθυνση του ανέμου και η ατμοσφαιρική ευστάθεια. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη διαφορετικά είδη εδάφους.

Η προσέγγιση του μοντέλου RIMPUFF θεωρεί υποτμήματα της έκλυσης, υποθετικά “ruffs”. Κατά τη μεταφορά τους, σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου σε ένα καθορισμένο πλέγμα, τα υποτμήματα διασπείρονται στην ατμόσφαιρα ακολουθώντας κατανομή Gauss (Εικόνα 4.6). Με την έκλυση των διαδοχικών υποτμημάτων, το RIMPUFF μπορεί να προσομοιώσει χρονικά μεταβαλλόμενες εκλύσεις.



Εικόνα 4.6: Προσομοίωση ατμοσφαιρικής διασποράς τμημάτων της έκλυσης (puffs). (α) Συμπεριφορά του πλουμίου, (β) βραχυπρόθεσμη προσομοίωση (Πηγή: S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999)

Για να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις και οι δόσεις σε κάθε (x_g, y_g, z_g) σημείο του πλέγματος, θα πρέπει να αθροιστεί η συνεισφορά όλων των τμημάτων του σημείου, σε κάθε χρονικό βήμα. Η συγκέντρωση $[Bq/m^3]$ σε ένα σημείο (x_g, y_g, z_g) του πλέγματος, για το υπομήμα έκλυσης i , προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$C_{i(xg,yg,zg)} = \frac{Q(i)}{(2\pi)^{3/2} * s(i)_{xy}^2 * s(i)_z} * \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_g - x_c(i)}{s(i)_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{y_g - y_c(i)}{s(i)_{xy}} \right)^2 \right] \right\} * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_g - z_c(i)}{s(i)_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2z_{inv} - z_c(i)}{s(i)_z} \right)^2 \right] \quad \text{εξ. (4.3)}$$

Όπου

$Q(i)$: η 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} : το ύψος αναστροφής, και

$s(i)_{xy}, s(i)_z$: παράμετροι διασποράς σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντίστοιχα, με $s(i)_{xy}, s(i)_z > 0$

4.3 Εναπόθεση

Η εναπόθεση αποτελεί ένα σημαντικό φαινόμενο στο πλαίσιο πυρηνικών ατυχημάτων, προσδιορίζοντας τον τρόπο που οι ραδιενεργές ουσίες εναποτίθενται και ρυπαίνουν το έδαφος κατά τη μεταφορά τους. Η εναπόθεση δημιουργεί ένα ραδιενεργό αποτύπωμα κατά το πέρασμά της, μειώνοντας την ενεργότητα στο νέφος. Η ξηρή εναπόθεση (dry deposition) συμβαίνει όταν τα ραδιονουκλίδια εναποτίθενται στο έδαφος ή σε αντικείμενα απουσία βροχής ή άλλων ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, ενώ η υγρή εναπόθεση (wet deposition) περιλαμβάνει την κατάθεση τους με τη μορφή υγρών σωματιδίων μέσω της αλληλεπίδρασής τους με το νερό των κατακρημνίσεων ή των ίδιων των σύννεφων. Κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η κλιματική και γεωγραφική διαμόρφωση, καθώς και οι υδρολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν τη διασπορά και την κατανομή των ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον.

Ο υπολογισμός της ξηρής εναπόθεσης περιλαμβάνει την εξέταση διαφόρων παραγόντων. Χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως μέγεθος, πυκνότητα και σχήμα, επηρεάζουν την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσής τους. Οι μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η ατμοσφαιρική σταθερότητα, παίζουν κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της μεταφοράς και διάχυσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Το JRODOS λαμβάνει υπόψη αυτούς τους παράγοντες για να μοντελοποιήσει την εναπόθεση των ραδιενεργών σωματιδίων. Επίσης, διακρίνει τις διάφορες επιφάνειες με βάση τα χαρακτηριστικά τους (π.χ., τραχύτητα, τύπο υλικού) για τους απαιτούμενους υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, μοντελοποιεί την ξηρή εναπόθεση χρησιμοποιώντας την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d (m/s), που θεωρείται περίπου 1 mm/s , καθώς και την ροή εναπόθεσης F_d (Bq/m^2s) που υπολογίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης επί την συγκέντρωση στο επίπεδο του εδάφους.

Όσον αφορά την υγρή εναπόθεση (wet deposition), τα στερεά και αέρια σωματίδια εντός του πλουμίου, εναποτίθενται στην επιφάνεια της Γης μέσω βροχοπτώσεων. Αυτή η διαδικασία επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, μέγεθος, πυκνότητα και όγκος, καθώς και από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν π.χ. ένταση της βροχόπτωσης. Η μοντελοποίηση της υγρής εναπόθεσης στο JRODOS γίνεται με τη βοήθεια του συντελεστή εκκαθάρισης λ (s^{-1}) ο οποίος εξαρτάται από την ένταση της βροχόπτωσης:

$$\lambda = \Lambda I^\alpha, \text{ εξ. (4.4)}$$

Όπου ο συντελεστής σάρωσης Λ κυμαίνεται μεταξύ $[3 \times 10^{-5}, 3 \times 10^{-3}]$ και ο εκθέτης α μεταξύ $[0.5, 1]$.

Στην παρούσα έκδοση του RIMPUFF χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τιμές για τις αντίστοιχες παραμέτρους εναπόθεσης:

| Ομάδα ισotόπου | 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 | $8.0E-5 \times \Lambda^{0.8}$ |

Πίνακας 4.7: Ομάδα ισotόπων και παράμετροι εναπόθεσης (Πηγή: S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999)

4.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Το JRODOS βασίζεται σε ένα ολοκληρωμένο σύνολο μετεωρολογικών δεδομένων για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων και αξιολογήσεων, στο πλαίσιο πυρηνικών ή ραδιολογικών συμβάντων. Βασικές μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα του ανέμου, την κατεύθυνση του ανέμου και την ατμοσφαιρική ευστάθεια καθώς και τις πιθανές βροχοπτώσεις. Αυτά τα δεδομένα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της διασποράς και της μεταφοράς ατμοσφαιρικών ρύπων, προσφέροντας κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις στις γύρω περιοχές. Η θερμοκρασία και η σταθερότητα της ατμόσφαιρας επηρεάζουν την κατακόρυφη κίνηση των ρύπων, ενώ η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου καθορίζουν την οριζόντια εξάπλωσή τους.

Στο πλαίσιο του JRODOS, η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) αποτελεί πολύτιμη πηγή μετεωρολογικών δεδομένων. Η NOAA είναι μια ομοσπονδιακή υπηρεσία των ΗΠΑ υπεύθυνη για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη του καιρού, του κλίματος, των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Με έδρα την Ουάσινγκτον, DC, η NOAA διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην παροχή ακριβών και έγκαιρων μετεωρολογικών πληροφοριών, στην έκδοση μετεωρολογικών προβλέψεων, προειδοποιήσεων για καταιγίδες και στη διεξαγωγή κλιματικής έρευνας.

Η NOAA χρησιμοποιεί ένα τεράστιο δίκτυο δορυφόρων, ωκεάνιων σημαντήρων, μετεωρολογικών αερόστατων και επίγειων μετεωρολογικών σταθμών για τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων από διάφορες πηγές. Αυτές οι συσκευές συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία, την υγρασία, την πίεση του αέρα, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου και άλλους σχετικούς παράγοντες.

Για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν προγνωστικά δεδομένα τα οποία έχουν επανεξεταστεί και καλύπτουν διάστημα έξι μηνών, από 01-01-2021 έως 30-06-2021, και τα οποία λήφθηκαν από τους NOMADS servers του NOAA.

4.5 Υπολογισμός δόσεων

4.5.1 Εξωτερική δόση από έκθεση σε ακτινοβολία γ από το πλούμιο (cloud shine)

Η ενεργός δόση από εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γ από το πλούμιο (ακτινοβολία νέφους) αναφέρεται στην απευθείας εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γ που προέρχεται από το νέφος. Η ενεργός δόση υπολογίζεται με βάση τη συνολική επίδραση της ακτινοβολίας γ στο σώμα, λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης.

Ο ρυθμός δόσης ακτινοβολίας γ υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση, σε Gy/s:

$$d(Q, E_y, \sigma_y, \sigma_z, H, R_{xy}) = 2K\sigma_{en}E \int_{x=-\infty}^{\infty} \int_{y=0}^{\infty} \int_{z=-\infty}^{\infty} \frac{B(\mu r)}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \chi(x, y, z) dx dy dz, \text{ εξ. (4.5)}$$

Όπου:

Q: ραδιενέργεια από ένα τμήμα έκλυσης [Bq]

E_y : 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 [m^2/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/m^3] η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \text{ εξ. (4.6)}$$

4.5.2 Εξωτερική δόση από έκθεση σε ακτινοβολία γ από την εναπόθεση (ground shine)

Η εξωτερική δόση από έκθεση σε ακτινοβολία γ από την εναπόθεση περιλαμβάνει την εκτίμηση της δόσης που προκύπτει από εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γ που εκπέμπεται από ραδιενεργά σωματίδια που εναποτίθενται σε επιφάνειες και στο έδαφος μέσω διαδικασιών υγρής και ξηρής εναπόθεσης. Για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης λαμβάνεται υπόψη η διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων καθώς και η παραγωγή των θυγατρικών τους, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\lambda_i Q_i(t) + \lambda_i f_{j,i} \sum_{j=1}^{i-1} Q_j(t) - G_i(t) Q_i(t), \text{ εξ. (4.7)}$$

Όπου:

t = ο χρόνος μεταφοράς

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

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

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

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

4.5.3 Εσωτερική δόση λόγω εισπνοής (inhalation)

Λόγω του ραδιενεργού πλουμίου, τα ραδιενεργά σωματίδια μπορούν να απορροφηθούν από τους ανθρώπους μέσω της αναπνοής τους. Τα σωματίδια αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία κατά την παραμονή τους στο σώμα, γεγονός που οδηγεί σε εσωτερική έκθεση. Η δόση λόγω εισπνοής δίνεται από τη σχέση:

$$D_{inh} = C_{air} * I_{inh} * g_{inh} * R_{inh}, \text{ εξ. (4.8)}$$

Όπου:

D_{inh} = η δόση από την εισπνοής (Sv)

C_{air} = η χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση στον αέρα (Bq h m⁻³)

I_{inh} = ο ρυθμός εισπνοής (m³ h⁻¹)

g_{inh} = ο συντελεστής δόσης για εισπνοή (Sv Bq⁻¹)

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

5. Ανάλυση Ραδιολογικών Επιπτώσεων: Μεθοδολογία, Αποτελέσματα και Χαρτογράφηση Ραδιενεργών Στοιχείων σε Προσομοίωση Πυρηνικού Ατυχήματος

5.1 Μεθοδολογία

5.1.1 Εφαρμογή του JRODOS

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης, χρησιμοποιείται το εργαλείο JRODOS (Real-time On-line DecisiOn Support). Σαν αρχικό βήμα, πρέπει να γίνει η εισαγωγή κάποιων δεδομένων στο πρόγραμμα. Ενδεικτικά, για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του JRODOS θα χρειαστεί η παροχή δεδομένων όπως ο όρος πηγής, οι γεωγραφικές συντεταγμένες της πηγής, οι ημερομηνίες της περιόδου που μελετάται, τα μετεωρολογικά δεδομένα, η διάρκεια έκλυσης, η διάρκεια πρόγνωσης, το χρονικό βήμα πρόγνωσης και η ακτίνα μελέτης γύρω από την πηγή. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε η διάρκεια έκλυσης ίση με 30,33 ώρες, διάρκεια πρόγνωσης ίση με 60 ώρες με το χρονικό βήμα πρόγνωσης 1 ώρα. Η περιοχή μελέτης εκτείνεται σε ακτίνα 200 χιλιομέτρων. Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, δημιουργείται ένα αρχείο εισόδου, τύπου XML, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα, που είναι η εκτέλεση του εργαλείου “Statistics Output” του JRODOS, για την εκτίμηση της πιθανής διακύμανσης των ραδιολογικών επιπτώσεων λόγω της επίδρασης των διαφορετικών καιρικών συνθηκών σε διάστημα έξι μηνών.

Ειδικότερα, το εργαλείο “Statistics Output” χρησιμοποιείται ώστε να δημιουργηθούν επεξεργάσιμα δεδομένα για κάθε εικονική προσομοίωση που λαμβάνει χώρα κάθε ημέρα της περιόδου που εξετάζεται (174 ημέρες για τους πρώτους έξι μήνες του 2021). Η υποθετική έκλυση ξεκινάει σε μια τυχαία χρονική στιγμή κάθε ημέρα και, καθώς τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι διαφορετικά, μεταβάλλονται και τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς και διασποράς του νέφους. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται 174 σειρές δεδομένων, μία για κάθε σενάριο (δηλαδή ημέρα έκλυσης) σε μορφή πίνακα με 61 στήλες (κάθε στήλη παρουσιάζει τα αποτελέσματα για κάθε ώρα μετά την έναρξη της έκλυσης) και 8056 σειρές (σημεία του χωρικού πλέγματος).

5.1.2 Στατιστική επεξεργασία με Matlab

Το δεύτερο βήμα της μεθοδολογίας για την ανάλυση των ραδιολογικών επιπτώσεων ενός υποθετικού πυρηνικού ατυχήματος, αποτελεί η στατιστική επεξεργασία των 174 σειρών δεδομένων που προέκυψαν από το εργαλείο "Statistics Output". Η επεξεργασία αυτή θα επιτευχθεί με τη χρήση προγράμματος σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab, ώστε να υπολογιστεί η μέση και η μέγιστη εκάστοτε δόση ή συγκέντρωση που εξετάζεται.

Για κάθε δόση ή συγκέντρωση έχει ήδη δημιουργηθεί ένας φάκελος που περιέχει 174 αρχεία σε μορφή πίνακα, όπως προαναφέρθηκε. Καθώς διερευνάται η αθροιστική δόση για κάθε σημείο του πλέγματος, θα επιλεγεί, μέσω Matlab, αποκλειστικά η τελευταία στήλη κάθε αρχείου, δηλαδή η στήλη που αντιστοιχεί στην 60η ώρα πρόγνωσης. Ακολούθως, θα προκύψει ένας νέος πίνακας με 8056 σειρές και 174 στήλες που περιλαμβάνει τη συνολική έκθεση για κάθε σενάριο έκλυσης, δηλαδή για κάθε μια από τις 174 εκλύσεις, για κάθε ημέρα του εξαμήνου που εξετάστηκε.

Τέλος, δημιουργείται ο πίνακας, μέσω Matlab, που αποτελείται από 4 στήλες (A/A σημείο πλέγματος, γεωγραφική τετμημένη σημείου, γεωγραφική τεταγμένη σημείου, τιμή δόσης ή συγκέντρωσης) και 8056 σειρές (μία για κάθε σημείο του χωρικού πλέγματος). Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται για τις μέγιστες και τις μέσες δόσεις ή συγκεντρώσεις.

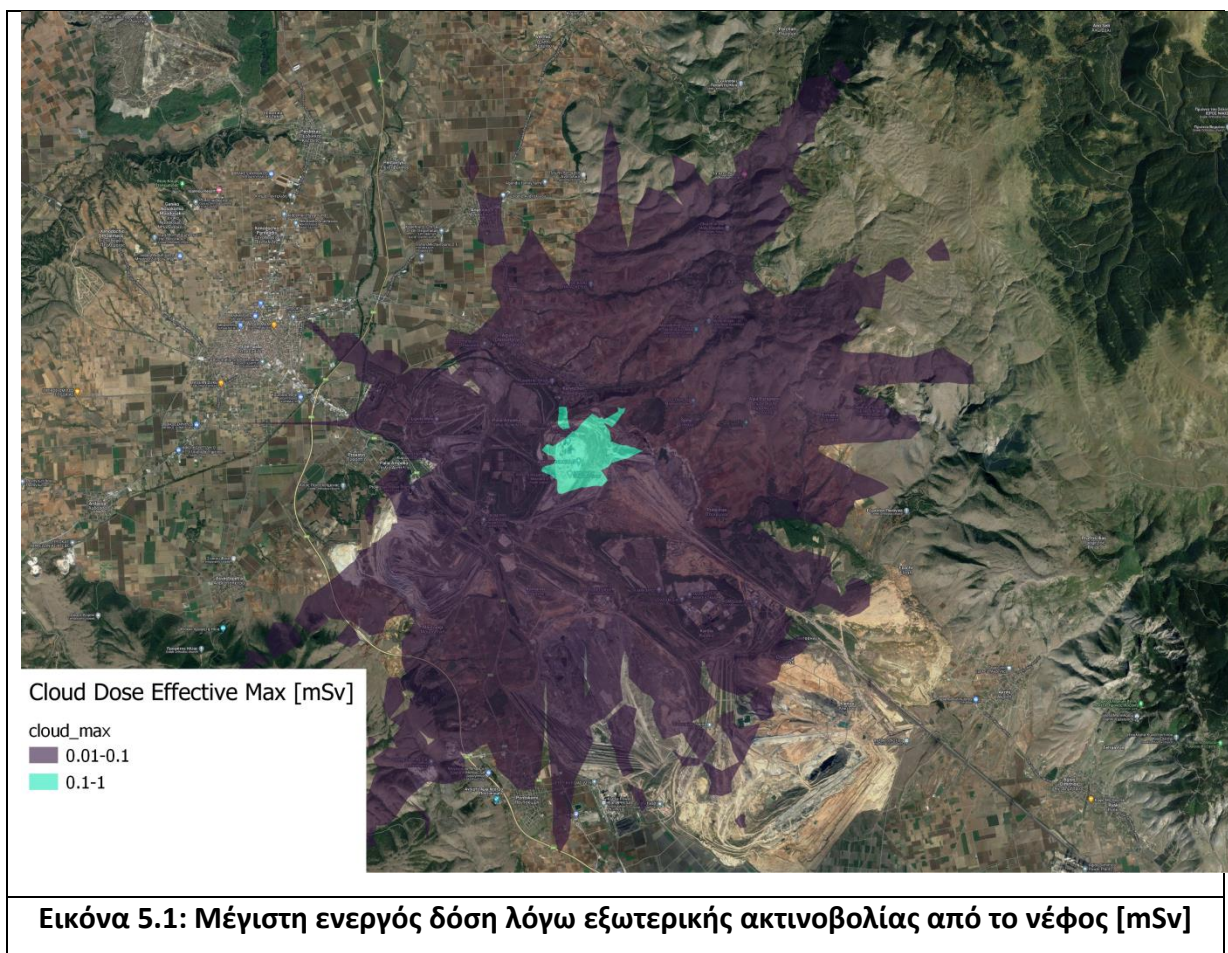
5.1.3 Χαρτογράφηση αποτελεσμάτων

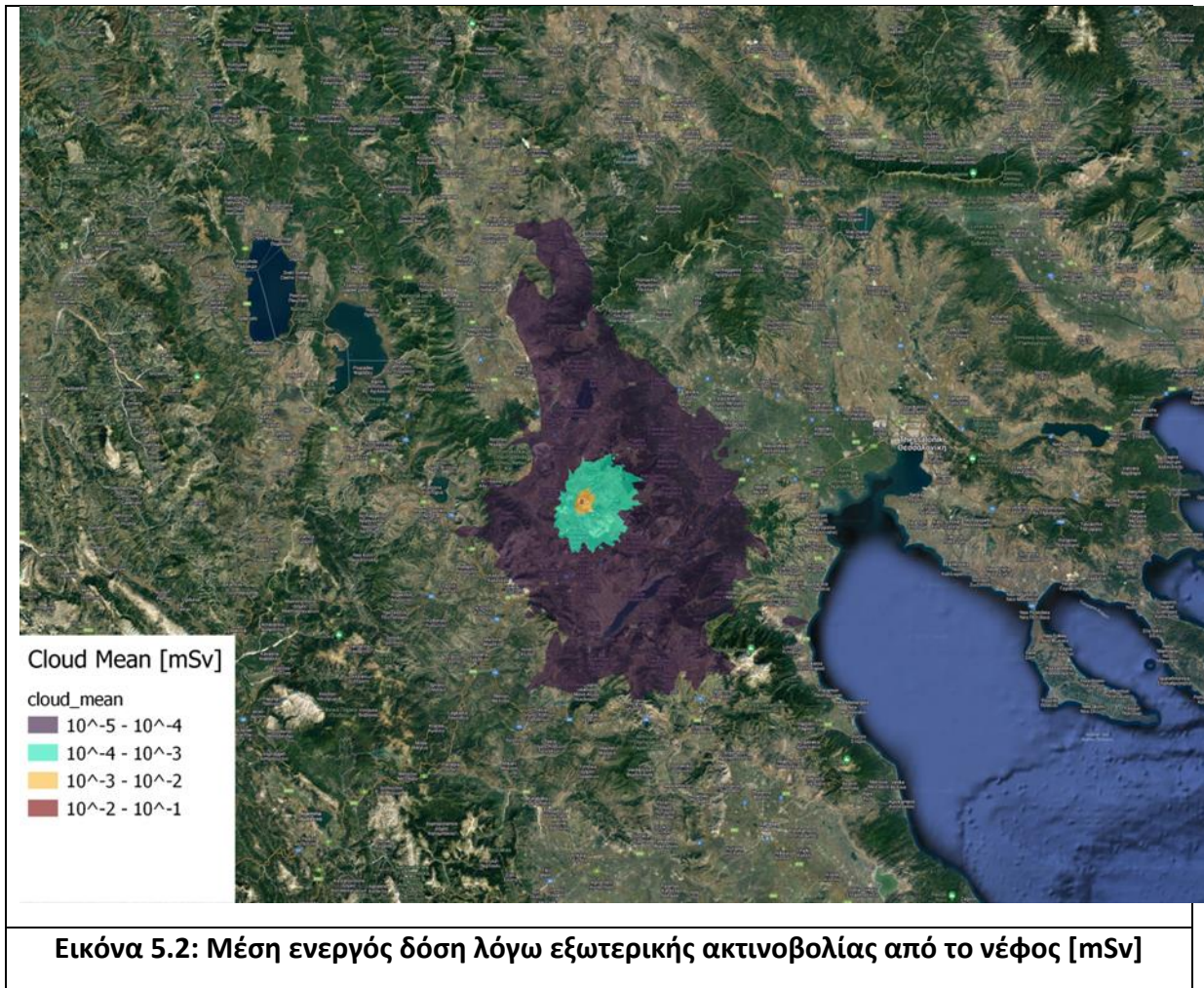
Το τελευταίο βήμα της μεθοδολογίας αποτελεί η χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων, η οποία πραγματοποιείται με το πρόγραμμα QGIS. Το QGIS, ή Quantum GIS, είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν, να επεξεργάζονται, να οπτικοποιούν, να αναλύουν και να δημοσιεύουν γεωχωρικές πληροφορίες. Η προσθήκη στοιχείων όπως υπομνήματα, κλίμακες, και άλλα γεωγραφικά στοιχεία επιτρέπει την εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το QGIS δίνει την δυνατότητα εξαγωγής των χαρτών σε διάφορες μορφές αρχείων, όπως shapefiles, GeoTIFF και αρχεία KML.

Αρχικά, αποθηκεύουμε τις τιμές σε ένα αρχείο κειμένου σε μορφή CSV. Στη συνέχεια, εισάγουμε αυτό το αρχείο στο Data Source Manager του QGIS και χρησιμοποιούμε το εργαλείο "Generate Contours" προκειμένου να αποτυπώνονται τα δεδομένα σε μορφή contours. Για μια ακριβέστερη αναπαράσταση, επιλέγουμε λογαριθμική κλίμακα, ενώ μέσω της επιλογής "Layer Properties" προσαρμόζουμε τα σύμβολα, τα χρώματα και τις κλάσεις τιμών. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη ανάδειξη των διαφορών και των περιοχών ενδιαφέροντος. Τέλος, με τη χρήση του "New Print Layout", μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα υπόμνημα, προσθέτοντας τυχόν απαραίτητες λεζάντες, κλίμακες και γενικές πληροφορίες για το περιεχόμενο του χάρτη. Η εξαγωγή του χάρτη σε εικόνα ολοκληρώνει τη διαδικασία.

5.2 Αποτελέσματα και Χαρτογράφηση

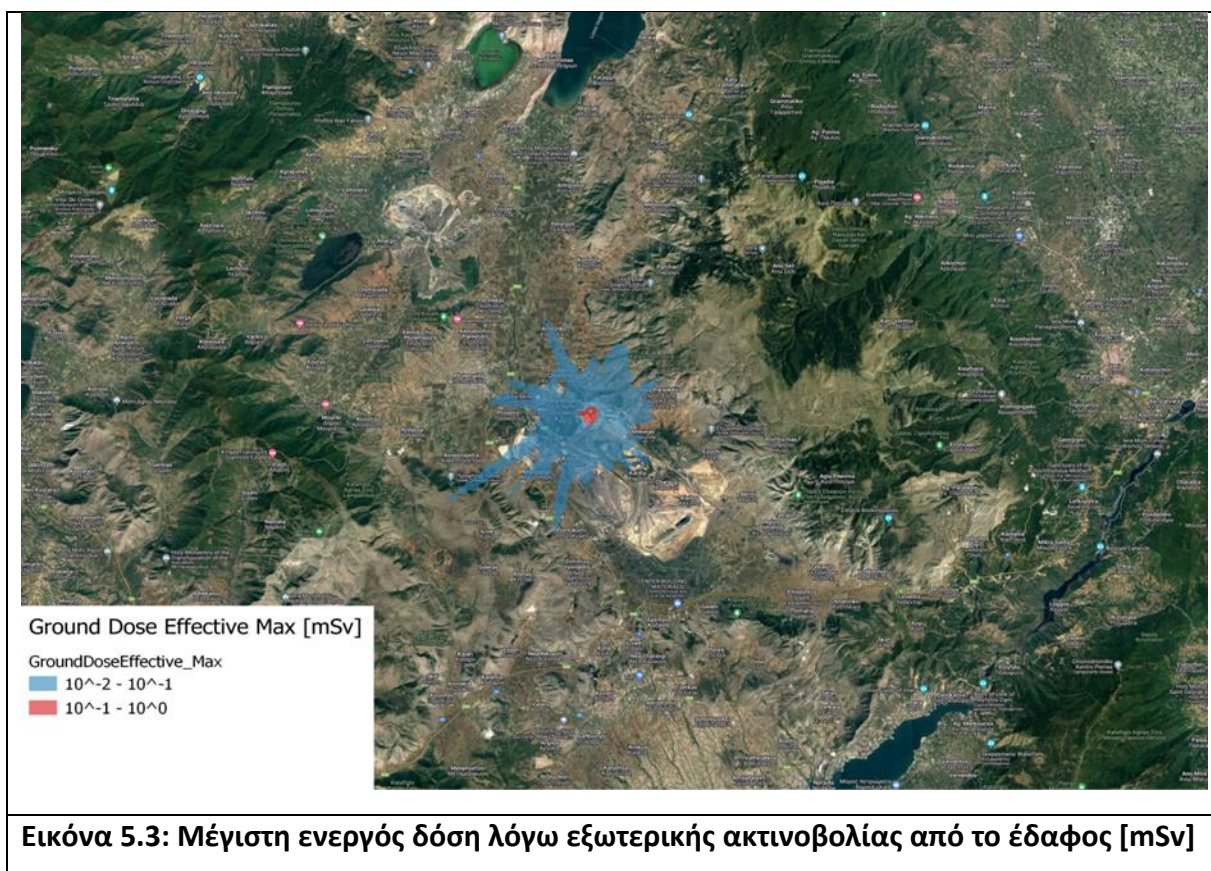
5.2.1 Απευθείας εξωτερική ακτινοβολία από το νέφος

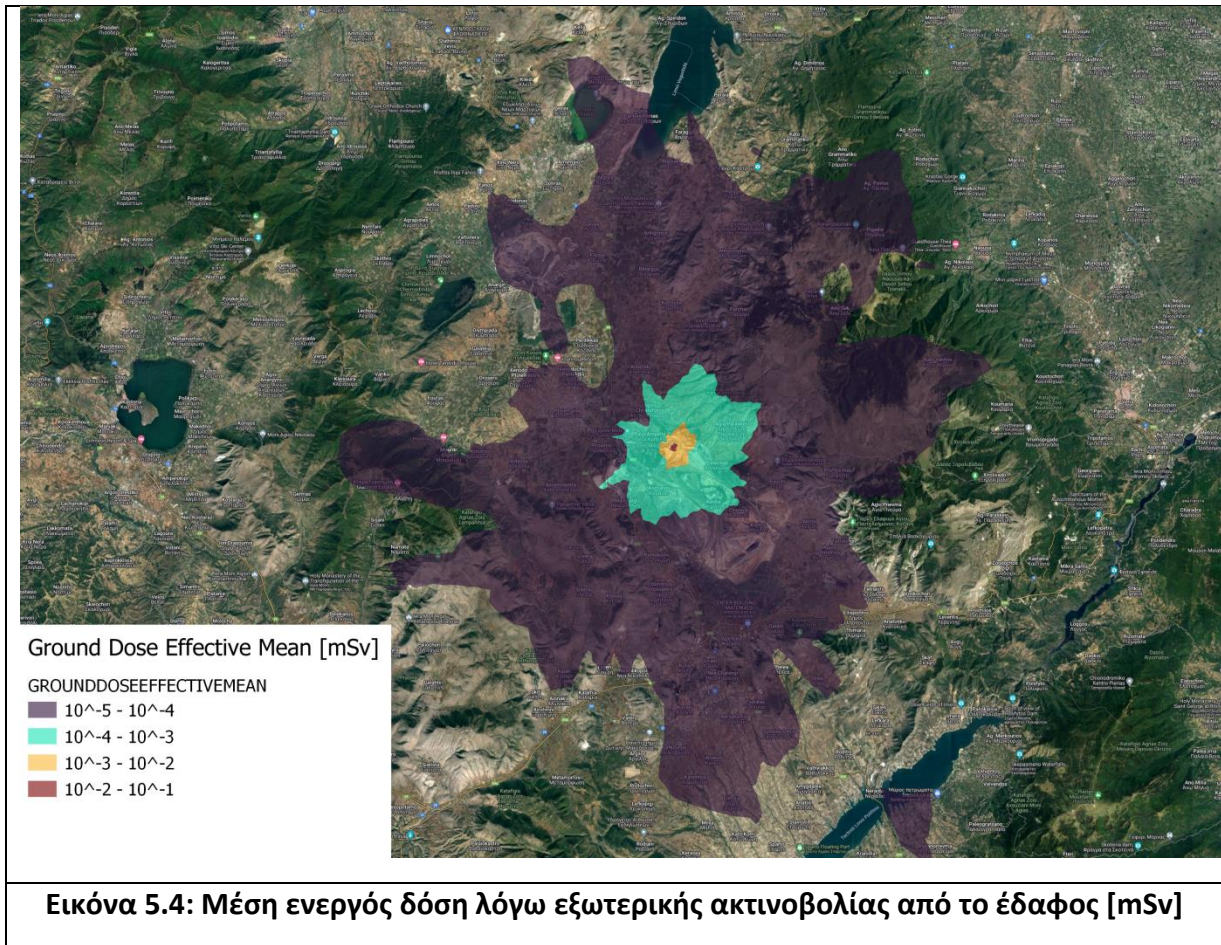




Στις εικόνες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη μέγιστη και τη μέση ενεργό δόση λόγω απευθείας ακτινοβολήσης από το νέφος, σε mSv. Όπως φαίνεται, η μέγιστη δόση κυμαίνεται από 0.1 έως 1 mSv σε ακτίνα 1.5 χιλιομέτρου από τον σταθμό και από 0.01 έως 0.1 mSv σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό. Η μέση δόση κυμαίνεται από 0.01 έως 0.1 mSv σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από τον σταθμό, από 0.001 έως 0.01 mSv σε ακτίνα 3 χιλιομέτρων και από 0.0001 έως 0.001 mSv σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό.

5.2.2 Απευθείας εξωτερική ακτινοβολία από το έδαφος

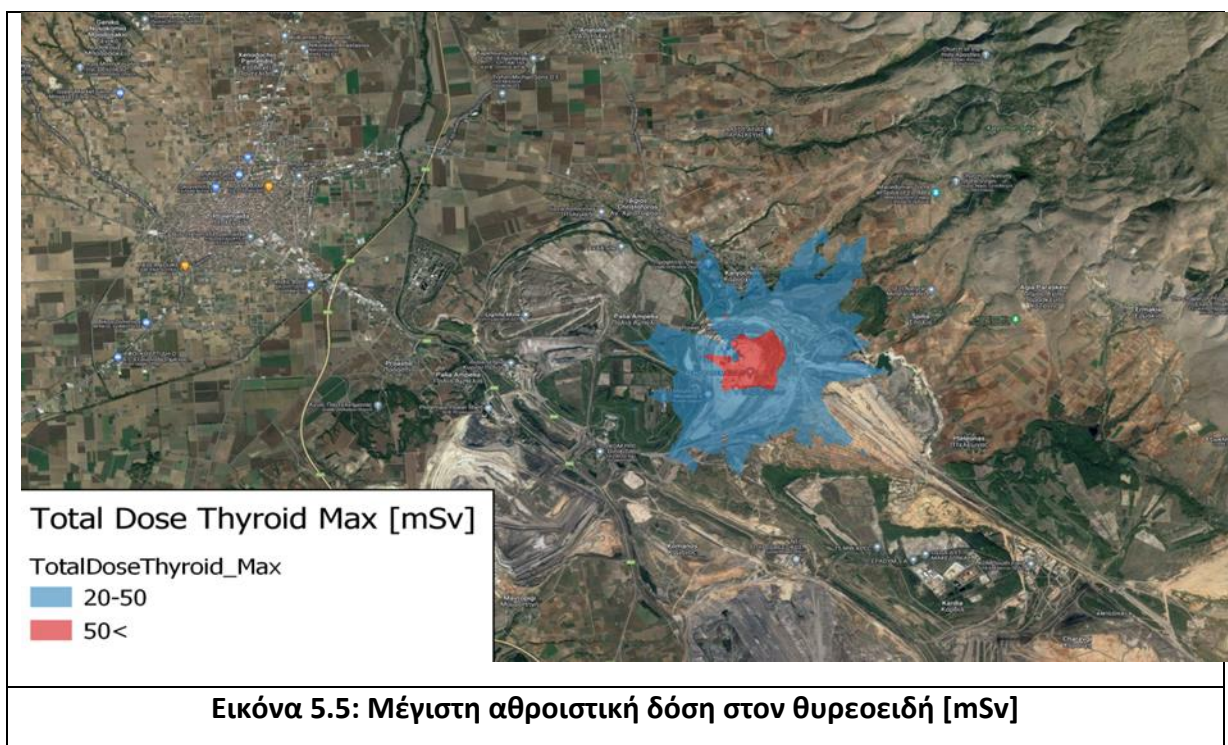


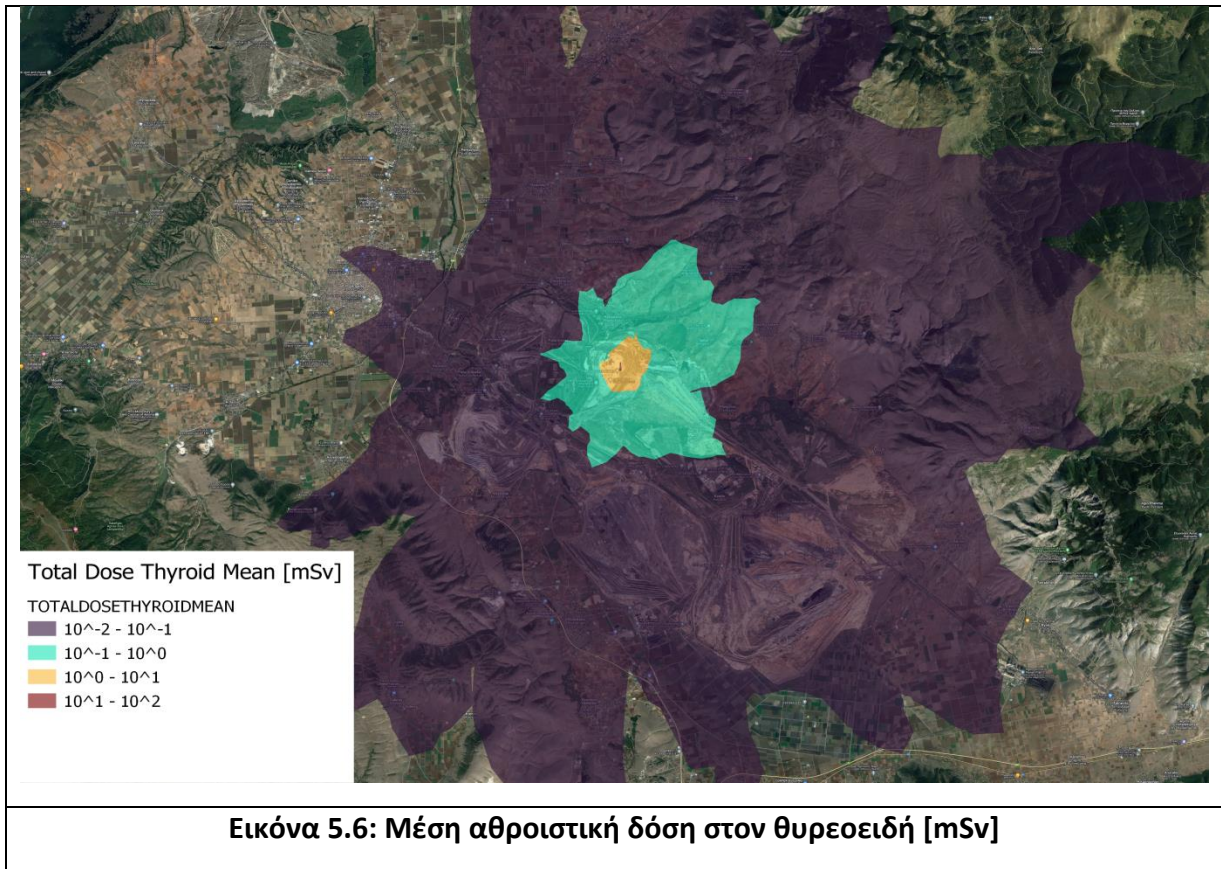


Εικόνα 5.4: Μέση ενεργός δόση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το έδαφος [mSv]

Στις εικόνες 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται η μέγιστη και η μέση ενεργός δόση λόγω απευθείας ακτινοβολίας από το έδαφος, αντίστοιχα. Στους παραπάνω χάρτες φαίνεται ότι οι μέγιστες δόσεις παρατηρούνται εντός ακτίνας 800m από τον σταθμό, και κυμαίνονται μεταξύ 0.1-1 mSv. Από τη ζώνη 800m έως και 11 χιλιόμετρα από το σταθμό, οι μέγιστες δόσεις κυμαίνονται μεταξύ 0.01-0.1 mSv. Όσον αφορά τις μέσες ενεργές δόσεις στο έδαφος, η πρώτη ζώνη γύρω από το σταθμό, με ακτίνα περίπου 500m, περιλαμβάνει τιμές από 0.01 έως 0.1 mSv. Η επόμενη ζώνη που εκτείνεται μέχρι και τα 2 χιλιόμετρα από τον σταθμό εμφανίζει τιμές από 0.001 έως 0.01 mSv. Η τρίτη ζώνη που φτάνει μέχρι τα 7 χιλιόμετρα απόσταση από το σταθμό εμφανίζει τιμές 0.0001 έως 0.001 mSv και η τέταρτη που εκτείνεται στα 30 χιλιόμετρα απόσταση, από 0.00001 έως 0,0001 mSv.

5.2.3 Αθροιστική δόση στον θυρεοειδή

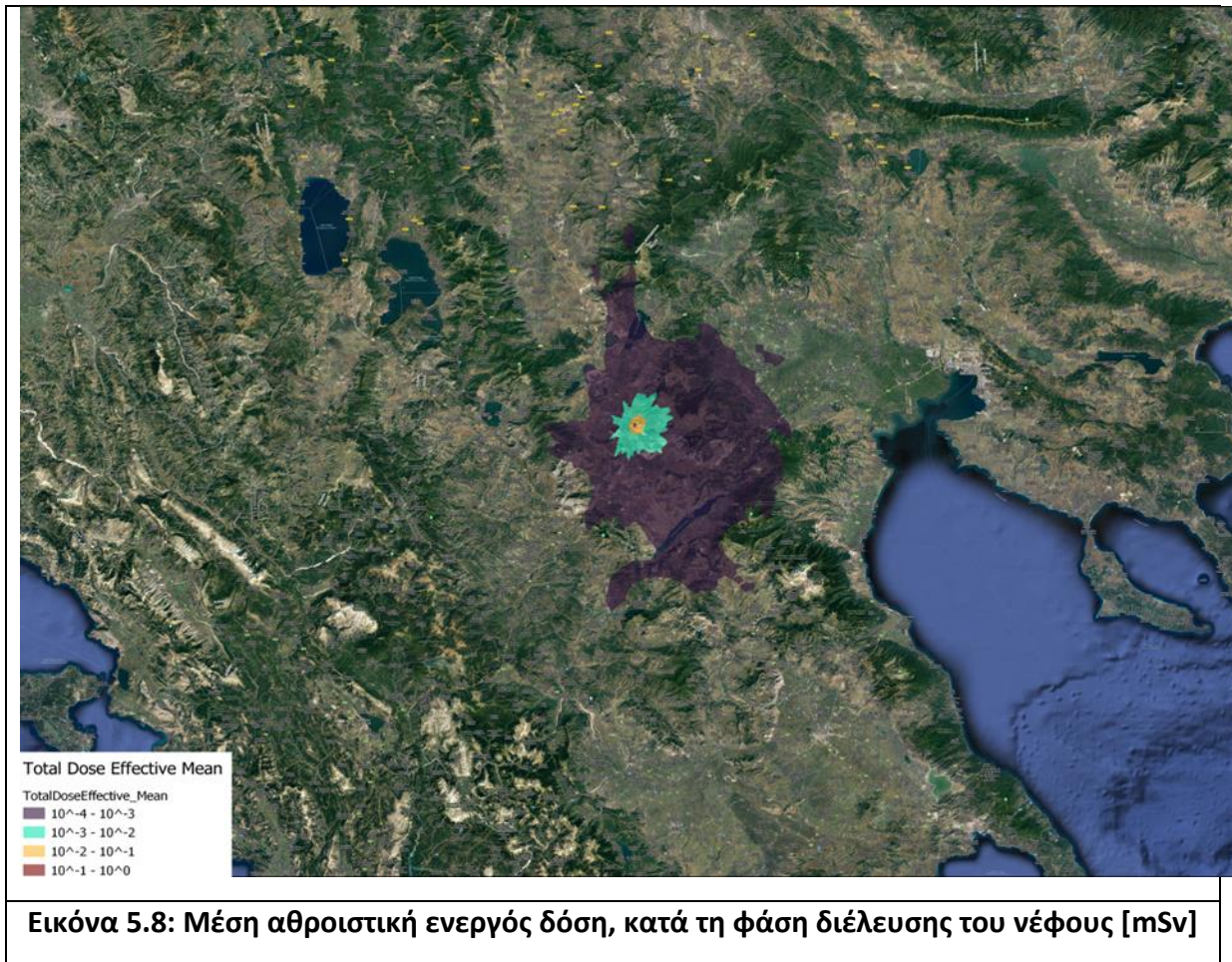




Στις εικόνες 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται η μέγιστη και η μέση αθροιστική δόση στον θυρεοειδή. Η δόση στον θυρεοειδή είναι η σημαντικότερη οδός έκθεσης μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα. Ειδικότερα, τονίζεται ότι σε ένα πυρηνικό ατύχημα ενδέχεται, ακόμα και αν η ενεργός είναι μικρότερη από τα επίπεδα αναφοράς, η δόση στον θυρεοειδή λόγω της εισπνοής ραδιενεργού ιωδίου να ξεπερνά κατά πολύ τα επίπεδα αναφοράς. Στη περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η μέση δόση εμφανίζει τιμές από 10 έως 100 mSv σε απόσταση 100 m από τον σταθμό, για μια περιοχή που εκτείνεται για άλλα 300 m βόρεια. Ακόμη, όπως φαίνεται στον χάρτη, εμφανίζει τις τιμές 1 έως 10 mSv σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από το σταθμό, 0.1 έως 1 mSv σε ακτίνα 4 χιλιομέτρων και 0.01 έως 0.1 mSv σε ακτίνα 15 χιλιομέτρων. Σχετικά με τη μέγιστη δόση, παρατηρείται ότι σε ακτίνα 600m από το σταθμό παρουσιάζει τιμές πάνω από 50 mSv, το οποίο καθορίζεται από τον ΔΟΑΕ, ως το επίπεδο αναφοράς για την έκθεση του θυρεοειδούς, ενώ στην επόμενη ζώνη έως ακτίνα 2 χιλιομέτρων παρουσιάζει τιμές 20 έως 50 mSv.

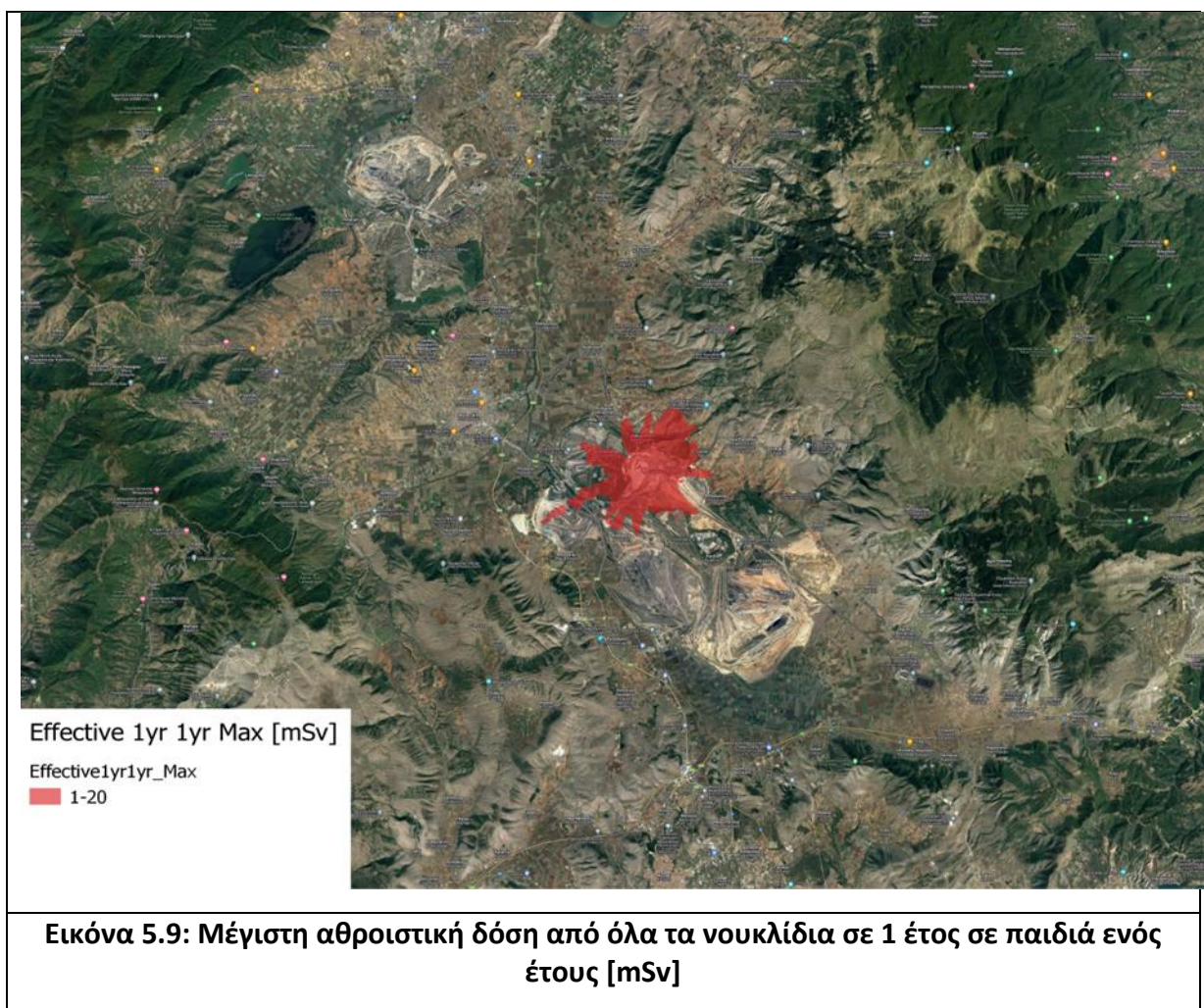
5.2.4 Αθροιστική ενεργός δόση κατά τη φάση διέλευσης του νέφους

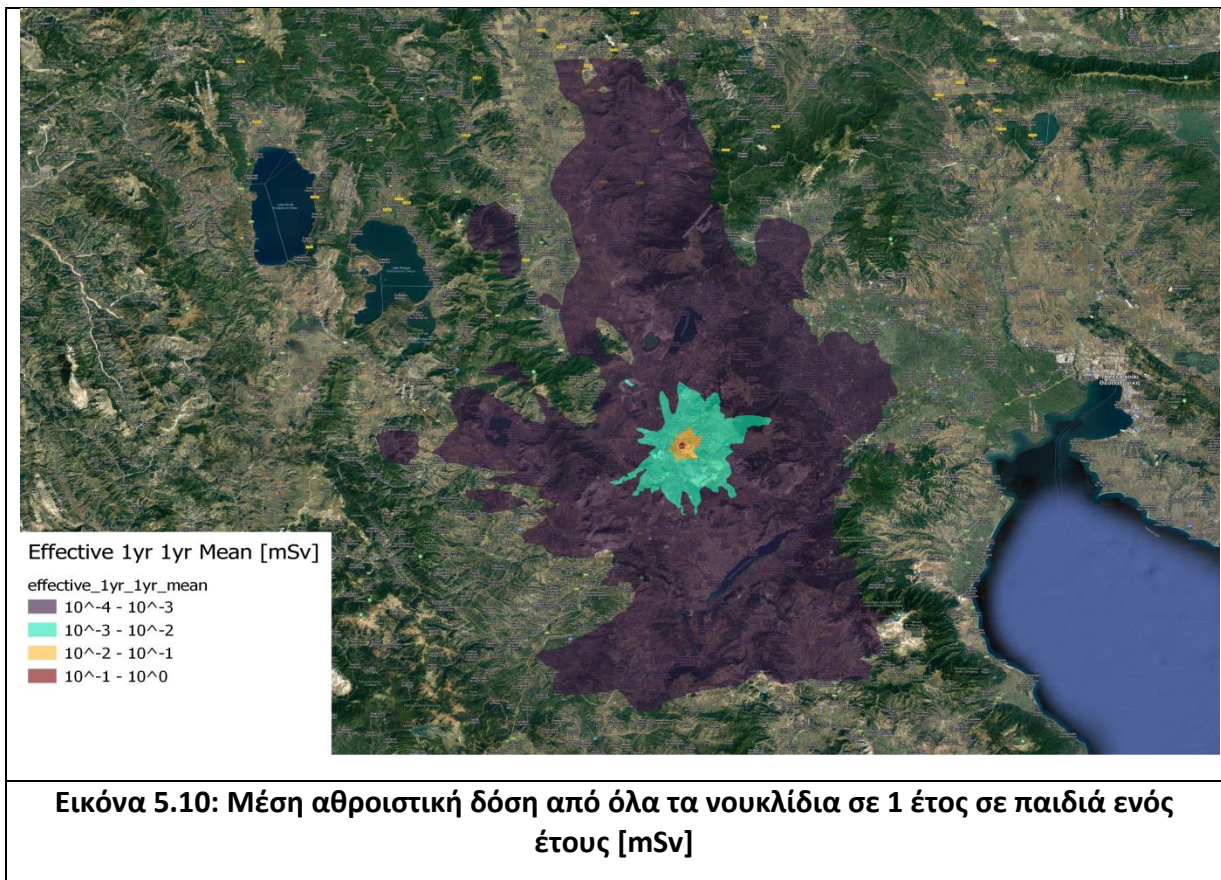




Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται η μέγιστη και η μέση αθροιστική ενεργός δόση, σε mSv, κατά τη φάση διέλευσης του νέφους. Για τον υπολογισμό της έκθεσης λήφθηκε υπόψη η απευθείας ακτινοβολία του νέφους και του εδάφους και η εσωτερική έκθεση λόγω εισπνοής. Η μέγιστη ενεργός δόση κυμαίνεται από 1 έως 20 mSv εντός ακτίνας 2.5 χιλιομέτρων από τον σταθμό. Η μέγιστη τιμή σε απόσταση μεγαλύτερη από ένα χιλιόμετρο είναι 5 mSv. Η μέση δόση κυμαίνεται από 0.1 έως 1 mSv σε ακτίνα 700 m από τον σταθμό, από 0.01 έως 0.1 mSv σε ακτίνα 3 χιλιομέτρων και από 0.001 έως 0.01 mSv σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό.

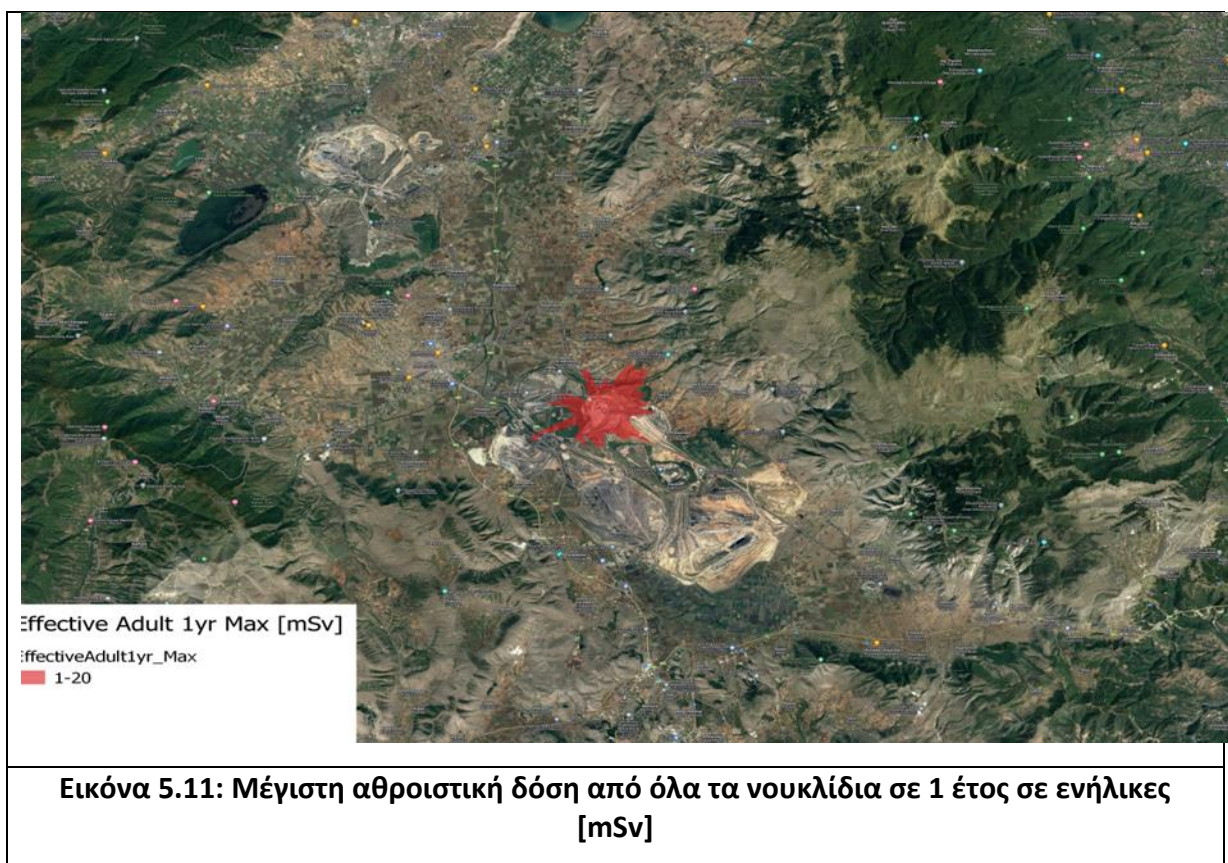
5.2.5 Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος σε παιδιά ενός έτους

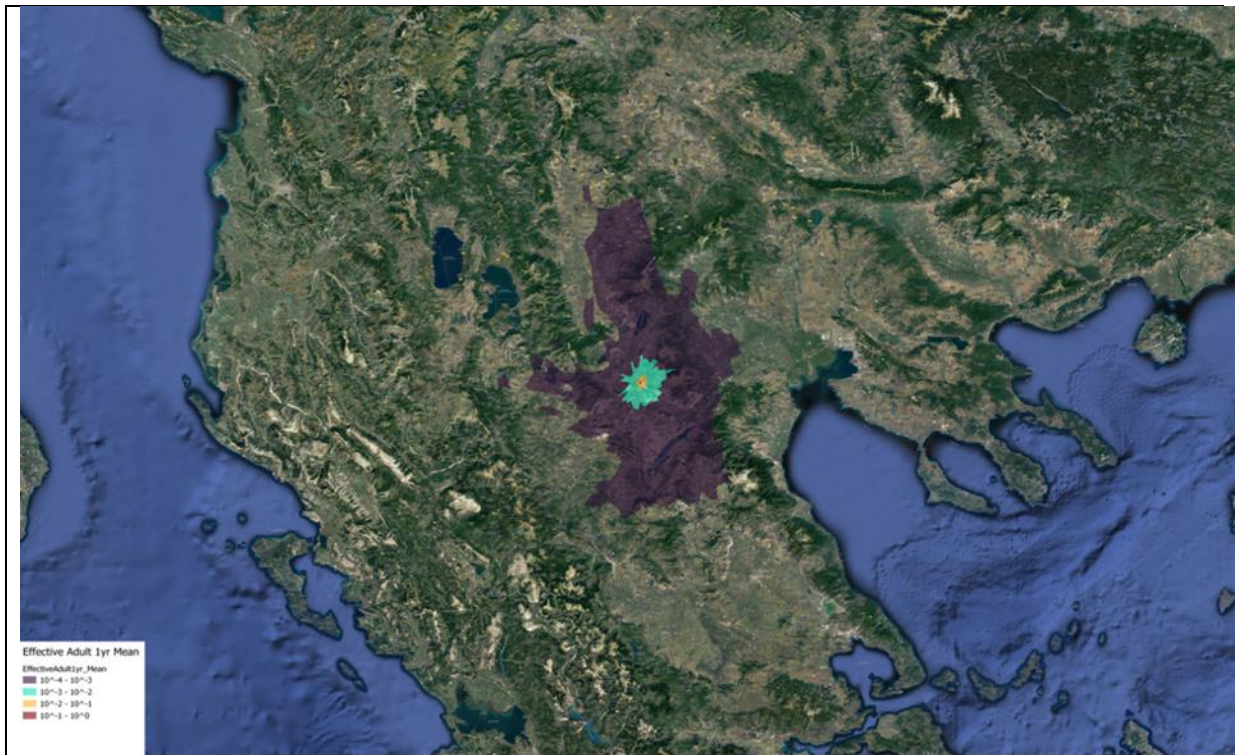




Στις εικόνες 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη μέγιστη και τη μέση αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε ένα έτος, σε παιδιά ενός έτους. Η δόση αυτή περιλαμβάνει την άμεση έκθεση κατά την πρώτη φάση διέλευσης του νέφους αμέσως μετά το ατύχημα, καθώς και τη μακροπρόθεσμη έκθεση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το έδαφος για διάστημα ενός έτους. Η δόση υπολογίζεται θεωρώντας ότι το παιδί ηλικίας ενός έτους, τη χρονική στιγμή του ατυχήματος, παραμένει στο σημείο συνεχώς για όλη τη διάρκεια του πρώτου έτους μετά το ατύχημα. Για την μακροπρόθεσμη έκθεση δεν λαμβάνεται υπόψη η έκθεση λόγω κατάποσης από την κατανάλωση τροφίμων, γάλακτος ή νερού, καθώς θεωρείται ότι η διακίνηση και η χρήση τέτοιων προϊόντων είναι εύκολο να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί σε μικρές αποστάσεις γύρω από τον σταθμό. Όπως φαίνεται, η μέγιστη δόση βρίσκεται στο διάστημα από 1 έως 20 mSv σε ακτίνα τριών χιλιομέτρων από τον σταθμό, με μέγιστη τιμή ίση περίπου 20 mSv. Η μέγιστη δόση στην επόμενη ζώνη έως δέκα χιλιόμετρα είναι της τάξης του 1 mSv. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας, τα επίπεδα αναφοράς σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης είναι 20-100 mSv για την ενεργό δόση, επομένως η εκτιμώμενη μέγιστη ενεργός δόση δεν ξεπερνάει αυτά τα επίπεδα αναφοράς, ούτε πολύ κοντά στον σταθμό. Η μέση δόση κυμαίνεται από 0.1 έως 1 mSv σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από τον σταθμό και από 0.01 έως 0.1 mSv σε ακτίνα 5 χιλιομέτρων.

5.2.6 Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος σε ενήλικες



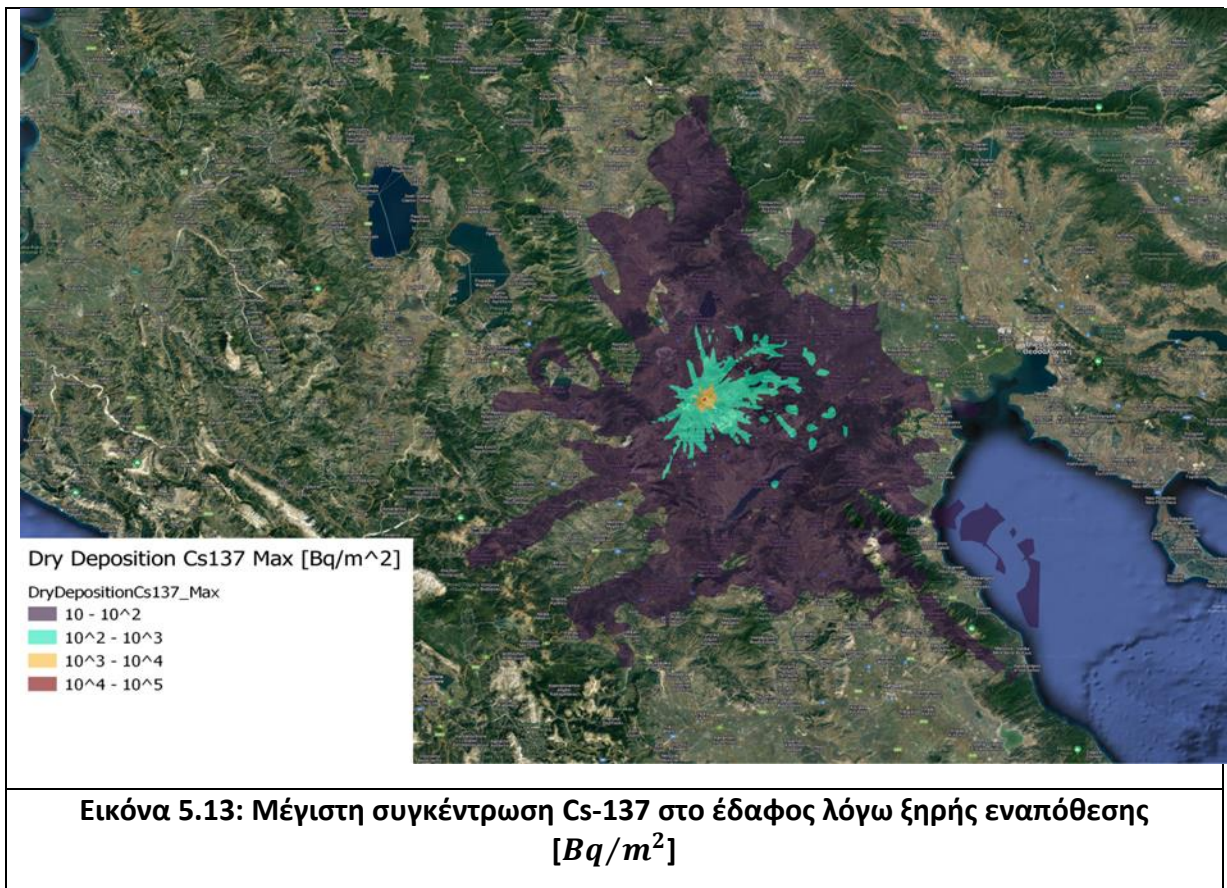


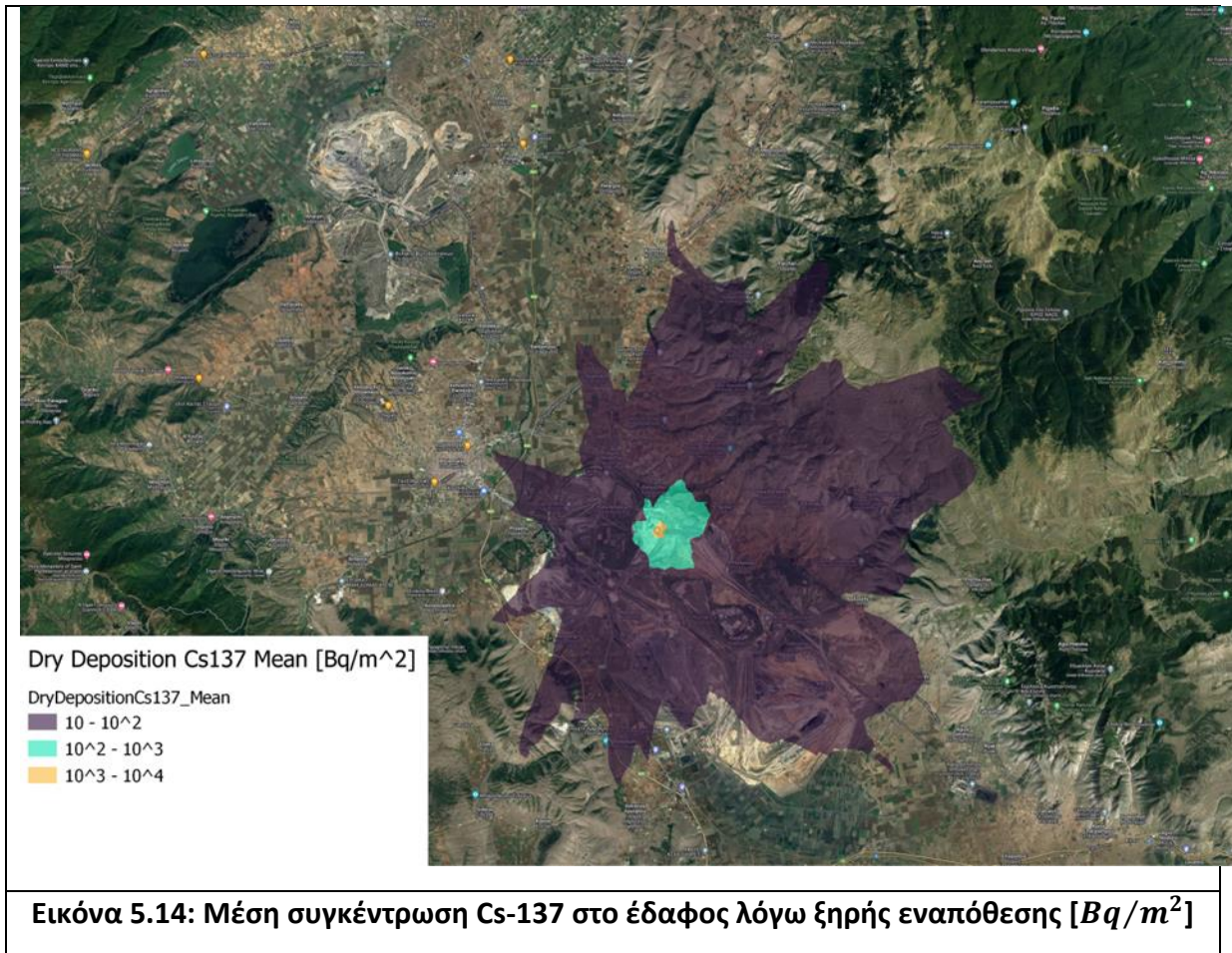
Εικόνα 5.12: Μέση αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος σε ενήλικες [mSv]

Στις εικόνες 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη μέση και τη μέγιστη αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε ένα έτος για ενήλικες. Η μέγιστη δόση κυμαίνεται από 1 έως 20 mSv σε ακτίνα τριών χιλιομέτρων από τον σταθμό. Αναφορικά με τη μέγιστη δόση, παρατηρείται ότι δεν υπερβαίνει τα επίπεδα αναφοράς που έχουν καθοριστεί από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ). Όσον αφορά τις μέσες δόσεις, η πρώτη ζώνη γύρω από τον σταθμό, με ακτίνα περίπου 700m, παρουσιάζει τιμές από 0.1 έως 1 mSv. Η επόμενη ζώνη, εκτεινόμενη σε 3 χιλιόμετρα από τον σταθμό, παρουσιάζει τιμές από 0.01 έως 0.1 mSv. Η τρίτη ζώνη, που φτάνει μέχρι τα 12 χιλιόμετρα απόσταση από τον σταθμό, εμφανίζει τιμές από 0.001 έως 0.01 mSv. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέσες και οι μέγιστες αθροιστικές δόσεις φαίνεται να είναι παρόμοιες για ενήλικες και παιδιά στις ζώνες που εξετάστηκαν.

5.2.7 Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (ξηρή εναπόθεση)

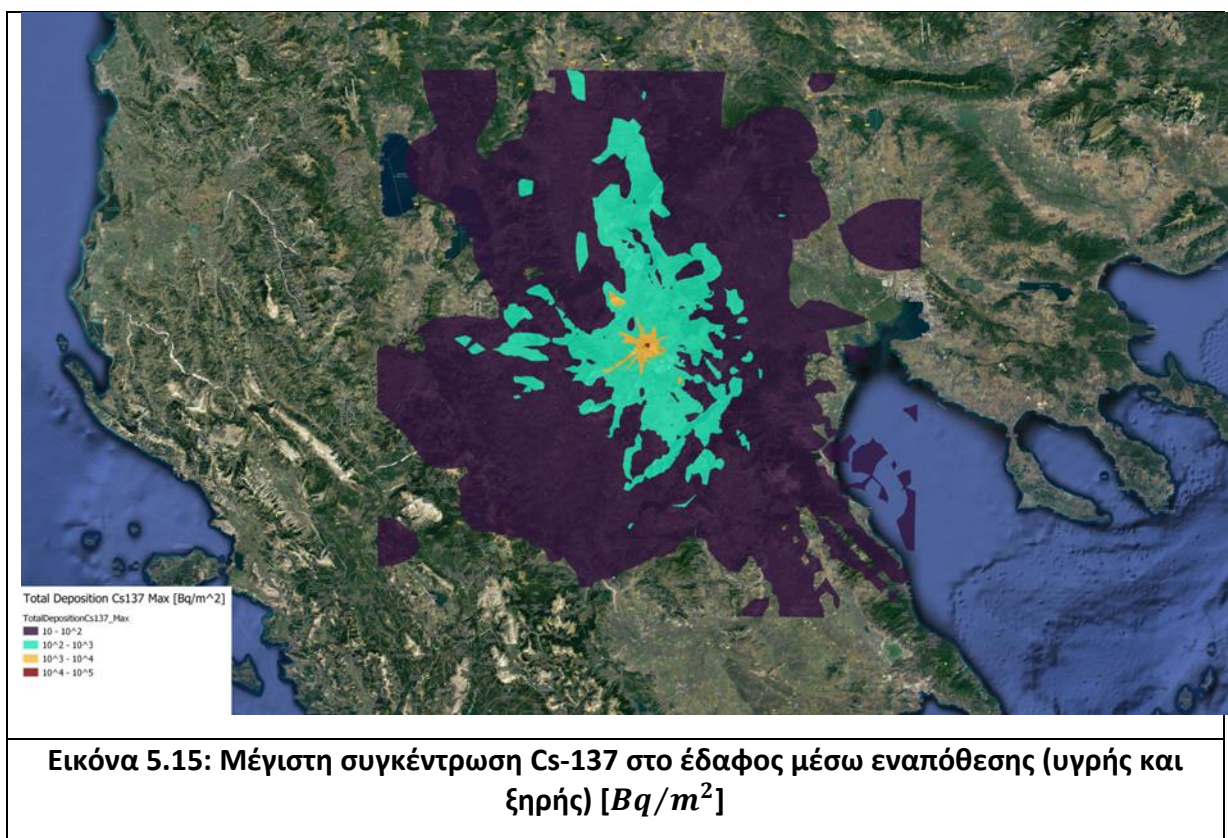
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες της μέγιστης και μέσης εναπόθεσης Cs-137, όπως υπολογίστηκαν για τις 174 προσομοιώσεις. Το Cs-137 είναι από τα σημαντικότερα ραδιονουκλίδια, σε περίπτωση ενός πυρηνικού ατυχήματος, καθώς αποτελεί δείκτη για τη μακροπρόθεσμη ρύπανση. Το καισίο μετακινείται και διασπείρεται στο περιβάλλον, από το έδαφος στο νερό, στις ρίζες των φυτών και εντέλει στην τροφική αλυσίδα προκαλώντας μακροχρόνια έκθεση ατόμων που ζουν και καταναλώνουν προϊόντα που παράγονται σε ρυπασμένες περιοχές.

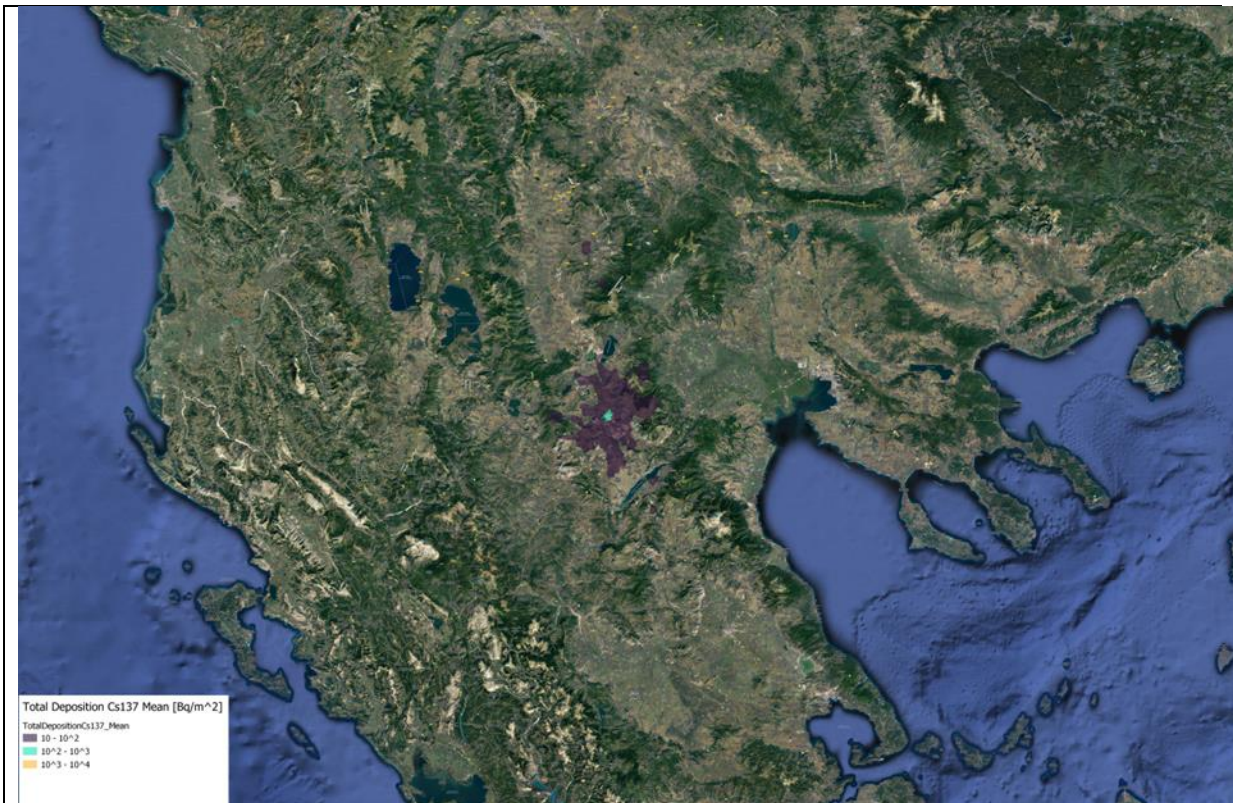




Στις εικόνες 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη μέγιστη και τη μέση συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος μέσω ξηρής εναπόθεσης σε Bq ανά τετραγωνικό μέτρο. Αναφορικά με τη μέγιστη συγκέντρωση, κυμαίνεται από 10^4 έως 10^5 Bq/m² σε ακτίνα 700m από τον σταθμό. Η ζώνη με τις τιμές από 10^3 έως 10^4 Bq/m² εκτείνεται σε ακτίνα 4 χιλιομέτρων από τον σταθμό. Οι τιμές από 10^1 έως 10^3 παρουσιάζονται εντός ακτίνας 100 χιλιομέτρων από το σταθμό. Η μέση συγκέντρωση κυμαίνεται από 10^3 έως 10^4 Bq/m² σε ακτίνα μισού χιλιομέτρου από τον σταθμό, από 10^2 έως 10^3 Bq/m² σε ακτίνα 2 χιλιομέτρων και τέλος από 10^1 έως 10^2 Bq/m² σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό.

5.2.8 Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)





Εικόνα 5.16: Μέση συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος μέσω εναπόθεσης (υγρής και ξηρής) [Bq/m²]

Στις εικόνες 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι χάρτες με τη μέση και τη μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης σε Bq ανά τετραγωνικό μέτρο. Αναφορικά με τη μέγιστη συγκέντρωση, κυμαίνεται από 10^4 έως 10^5 Bq/m² σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από τον σταθμό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι περιοχές στις οποίες ελήφθησαν μέτρα στο ατύχημα της Fukushima (εκκένωση, μετεγκατάσταση) κάλυπταν συνολικά μια λεπτή λωρίδα βορειοανατολικά του σταθμού Daichi μήκους της τάξης των 40 χιλιομέτρων, στην οποία οι δόσεις μπορεί να υπερέβαιναν τα 20 mSv/h. Οι τιμές της ολικής εναπόθεσης Cs-137 στις περιοχές αυτές ξεπερνούσαν τα 106 Bq/m². Η μέγιστη εναπόθεση στην περίπτωση του αντιδραστήρα SMR που εξετάζεται είναι δέκα φορές χαμηλότερη ακόμα και στα όρια της εγκατάστασης. Η ζώνη με τις τιμές από 10^3 έως 10^4 εκτείνεται σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό. Οι τιμές από 10^1 έως 10^3 παρουσιάζονται εντός ακτίνας 100 χιλιομέτρων από το σταθμό. Η μέση συγκέντρωση κυμαίνεται από 10^3 έως 10^4 Bq/m² σε ακτίνα μισού χιλιομέτρου από τον σταθμό, από 10^2 έως 10^3 Bq/m² σε ακτίνα 2 χιλιομέτρων και τέλος από 10^1 έως 10^2 Bq/m² σε ακτίνα 20 χιλιομέτρων από τον σταθμό.

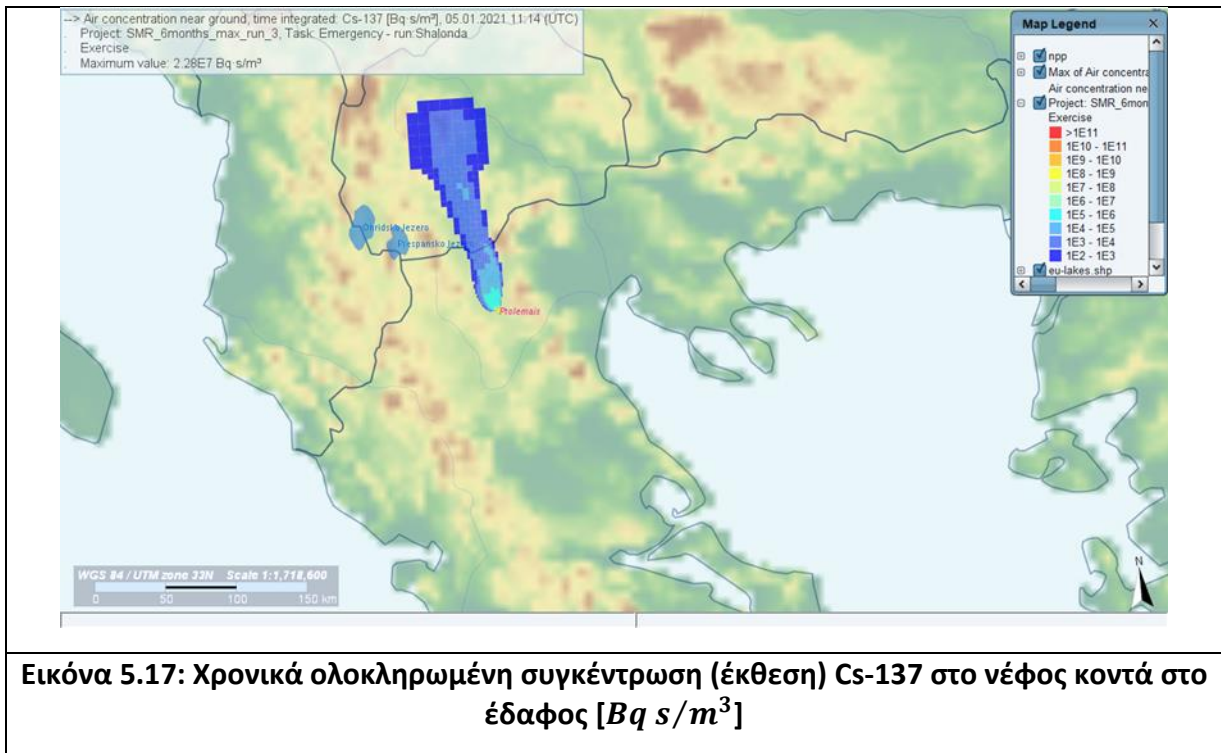
Όπως φαίνεται στους χάρτες για την ολική (ξηρή και υγρή) εναπόθεση, η συγκέντρωση καισίου εκτείνεται σε μεγαλύτερη περιοχή σε σύγκριση με τη συγκέντρωση μέσω ξηρής

εναπόθεσης. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της βροχής και της υγρασίας, η ολική εναπόθεση μπορεί να προκαλέσει αυξημένες τιμές ραδιενέργειας σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από τον πυρηνικό σταθμό. Παράλληλα, οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης καισίου φαίνεται να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και για την ολική και για την ξηρή εναπόθεση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ακόμα και η ξηρή εναπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τιμές ραδιενέργειας στις περιοχές πλησιέστερα στον σταθμό, και έτσι οι μέγιστες τιμές παραμένουν συγκρίσιμες μεταξύ των δύο προσεγγίσεων για την εναπόθεση του καισίου.

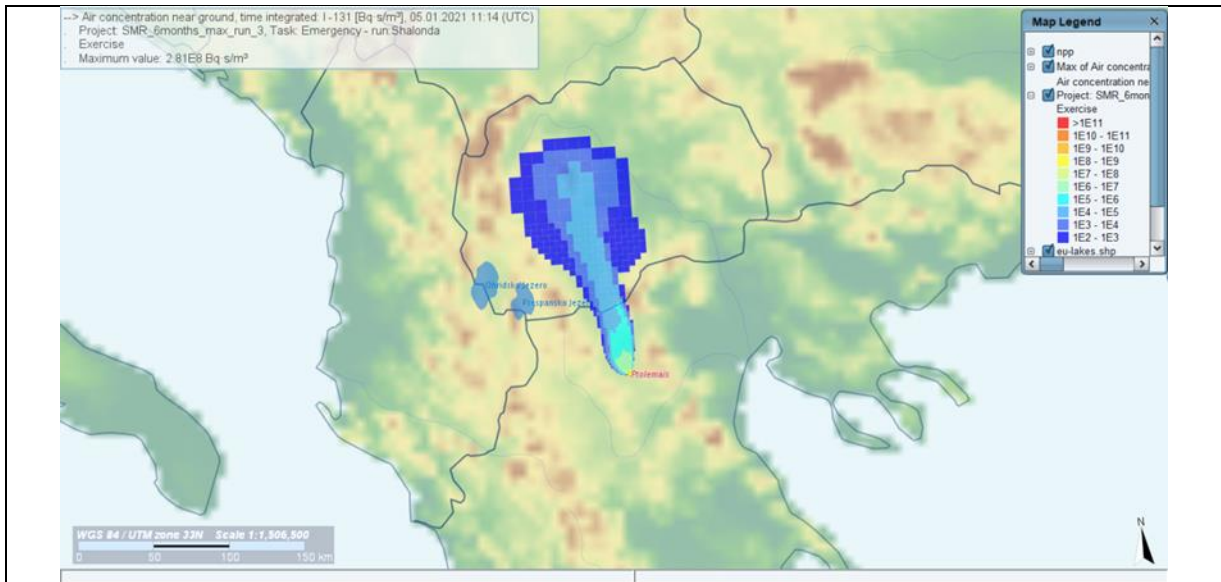
5.3 Ενδεικτική προσομοίωση δυσμενέστερης ημερομηνίας

Στην παρούσα ενότητα, επικεντρωνόμαστε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων για τη δυσμενέστερη ημερομηνία της προσομοίωσης, αναφορικά με τη άμεση έκθεση. Η ημερομηνία αυτή επιλέχθηκε με κριτήριο τη μέγιστη δόση κατά τη φάση διέλευσης του νέφους, σε απόσταση μεγαλύτερη από 500 μέτρα, δηλαδή τη μέγιστη έκθεση σε περιοχές εκτός της εγκατάστασης. Οι επιπτώσεις του υποθετικού αυτού ατυχήματος εξετάζονται με βάση τα αποτελέσματα για τη χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων αντιπροσωπευτικών ραδιονουκλιδίων στο νέφος και των κυριότερων δόσεων.

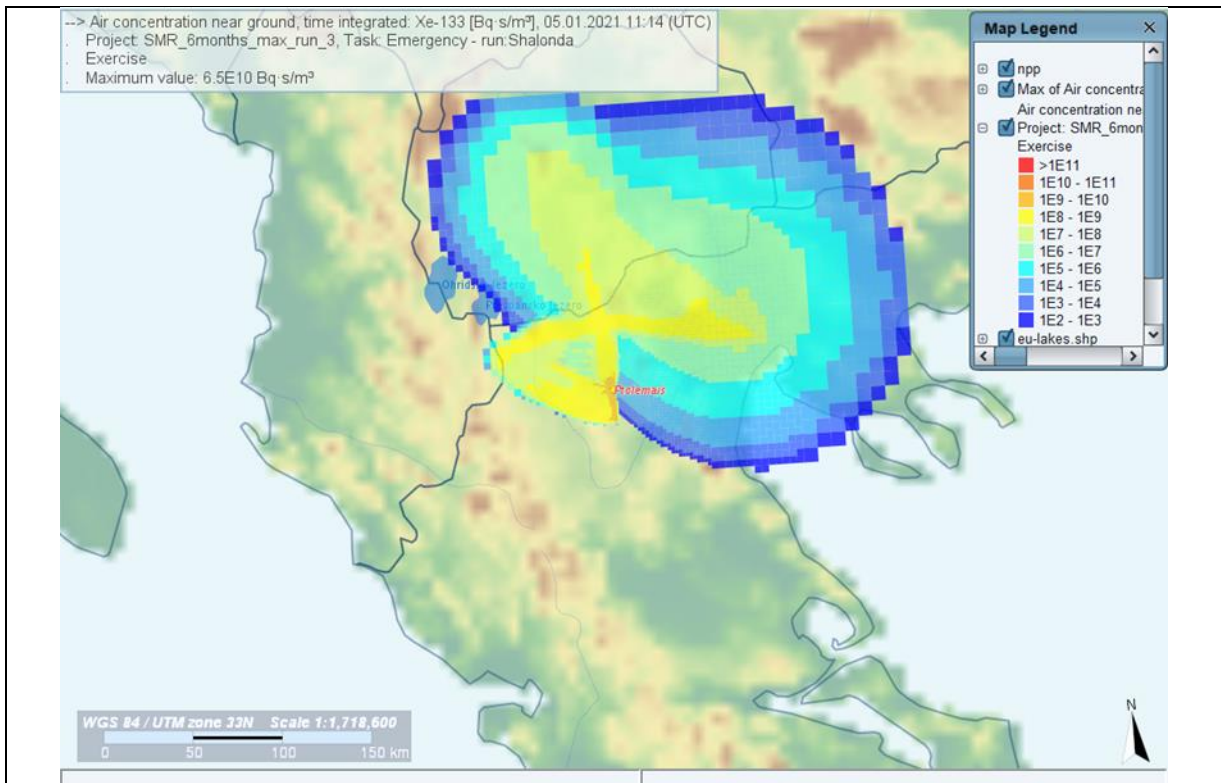
5.3.1 Συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων στο νέφος



Εικόνα 5.17: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) Cs-137 στο νέφος κοντά στο έδαφος [$Bq s/m^3$]



Εικόνα 5.18: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) I-131 στο νέφος κοντά στο έδαφος [$Bq s/m^3$]



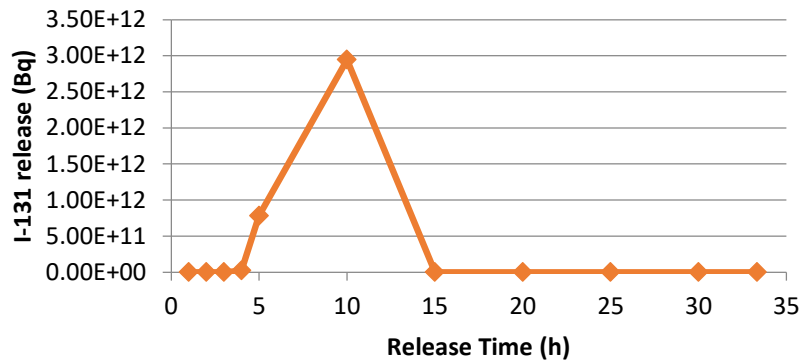
Εικόνα 5.19: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) Xe-133 στο νέφος κοντά στο έδαφος [$Bq s/m^3$]

Στην περιοχή γύρω από τον πυρηνικό σταθμό, παρατηρούνται σημαντικές συγκεντρώσεις Cs-137, I-131 και Xe-133 στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η συγκέντρωση του Cs-137 φτάνει στο επίπεδο των $2,28 \times 10^7 \text{ Bq s/m}^3$ κοντά στον σταθμό, ενώ 150 χιλιόμετρα βόρεια φτάνει τα $5,3 \times 10^2 \text{ Bq s/m}^3$. Για το I-131, η μέγιστη συγκέντρωση φτάνει τα $2,81 \times 10^6 \text{ Bq s/m}^3$ και 160 χιλιόμετρα βόρεια φτάνει τα $3,92 \times 10^2 \text{ Bq s/m}^3$. Όσον αφορά το Xe-133, η συγκέντρωσή του φτάνει τα $6,5 \times 10^{10} \text{ Bq s/m}^3$. Αυτές οι τιμές αναδεικνύουν την έντονη διασπορά και την επίδραση του χρόνου στις συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ουσιών στον περιβάλλοντα αέρα. Στην απόσταση των 190 χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό, το Xe-133 φαίνεται να έχει συγκέντρωση $1,27 \times 10^2 \text{ Bq s/m}^3$ στον ατμοσφαιρικό αέρα.

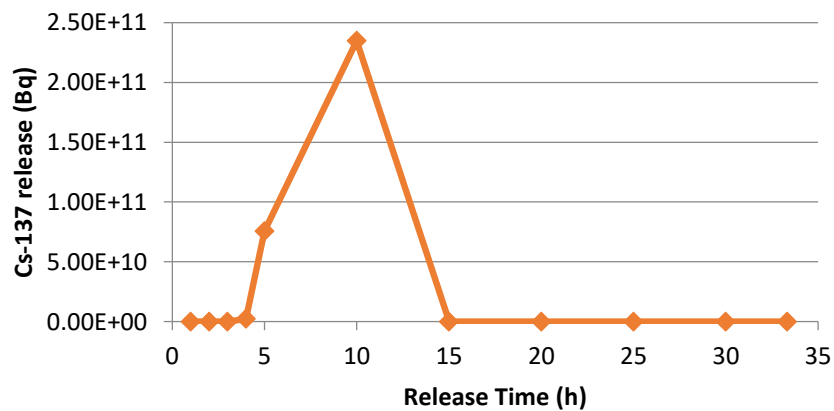
Οι τρεις χάρτες που παρουσιάζονται, με το Xe-133, το I-131 και το Cs-137, αναδεικνύουν σαφώς τις διαφορές στη διάχυση των ραδιενεργών ισοτόπων γύρω από τον πυρηνικό σταθμό μετά από το ατύχημα. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι το Xe-133 εμφανίζει μεγάλη διασπορά σε σύγκριση με το I-131 και το Cs-137. Αυτή η εμφανής διαφοροποίηση μπορεί να αποδοθεί στον σωματιδιακό χαρακτήρα του I-131 και του Cs-137 και τη διαφορετική χρονική εξέλιξη του ατυχήματος.

Στο σχήμα 5.20, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της έκλυσης των τριών αντιπροσωπευτικών νουκλιδίων (I-131, Cs-137, Xe-133). Το Xe-133, ως ευγενές αέριο, δεν κατακρατείται στο περίβλημα του αντιδραστήρα και επομένως η έκλυση του διαρκεί πολύ περισσότερο σε σχέση με τα αερολύματα, τα οποία εναποτίθενται στο περίβλημα. Έτσι το ξένο εκλύεται για πολύ περισσότερο χρόνο και διασκορπίζεται σε διάφορες κατευθύνσεις ανάλογα με τη μεταβολή των καιρικών συνθηκών. Αντίθετα, το I-131 και το Cs-137, λόγω των σωματιδιακών τους χαρακτηριστικών κατακρατώνται στο περίβλημα με αποτέλεσμα συγκριτικά μικρότερη χρονική διάρκεια για την ολοκλήρωση της έκλυσης (15 ώρες). Η μικρότερη χρονική διάρκεια της έκλυσης έχει ως άμεση συνέπεια τη μεταφορά και διασπορά σε λιγότερες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στα σχήμα 5.20, λόγω της πιο περιορισμένης μεταβολής των καιρικών συνθηκών στο μικρότερο διάστημα έκλυσης. Αυτή η παρατήρηση καταδεικνύει τον ρόλο που παίζει η φύση των ισοτόπων και η επίδρασή της στην χρονική εξέλιξη του ατυχήματος, η οποία με τη σειρά της μπορεί να καθορίσει την έκταση της περιοχής που επηρεάζεται από την έκλυση.

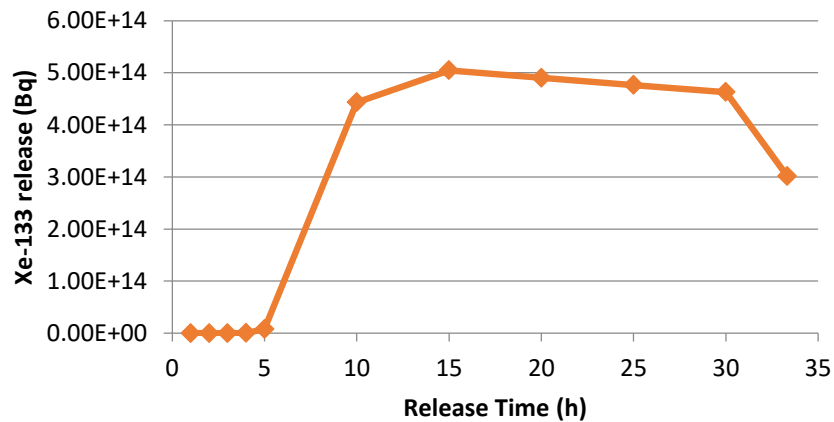
Χρονική εξέλιξη έκλυσης I-131



Χρονική εξέλιξη έκλυσης Cs-137

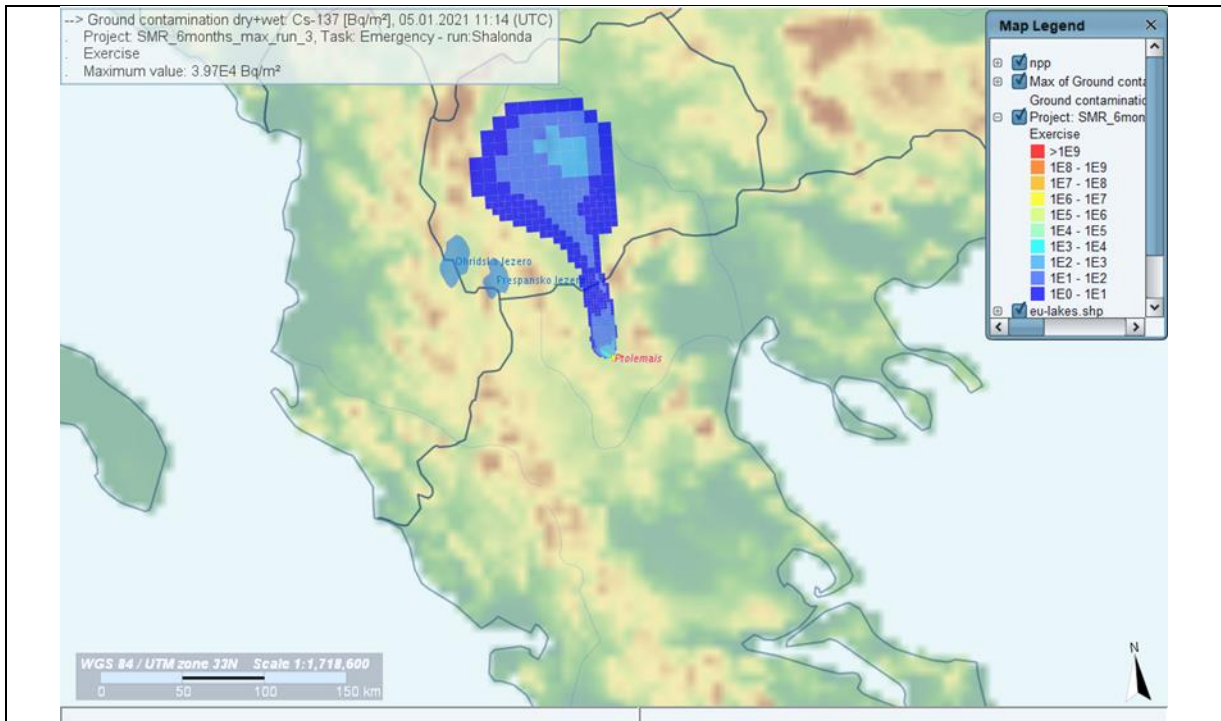


Χρονική εξέλιξη έκλυσης Xe-133



Σχήμα 5.20: Η χρονική εξέλιξη της έκλυσης των τριών αντιπροσωπευτικών νουκλιδίων. Πάνω: I-131, μέση: Cs-137, κάτω: Xe-133

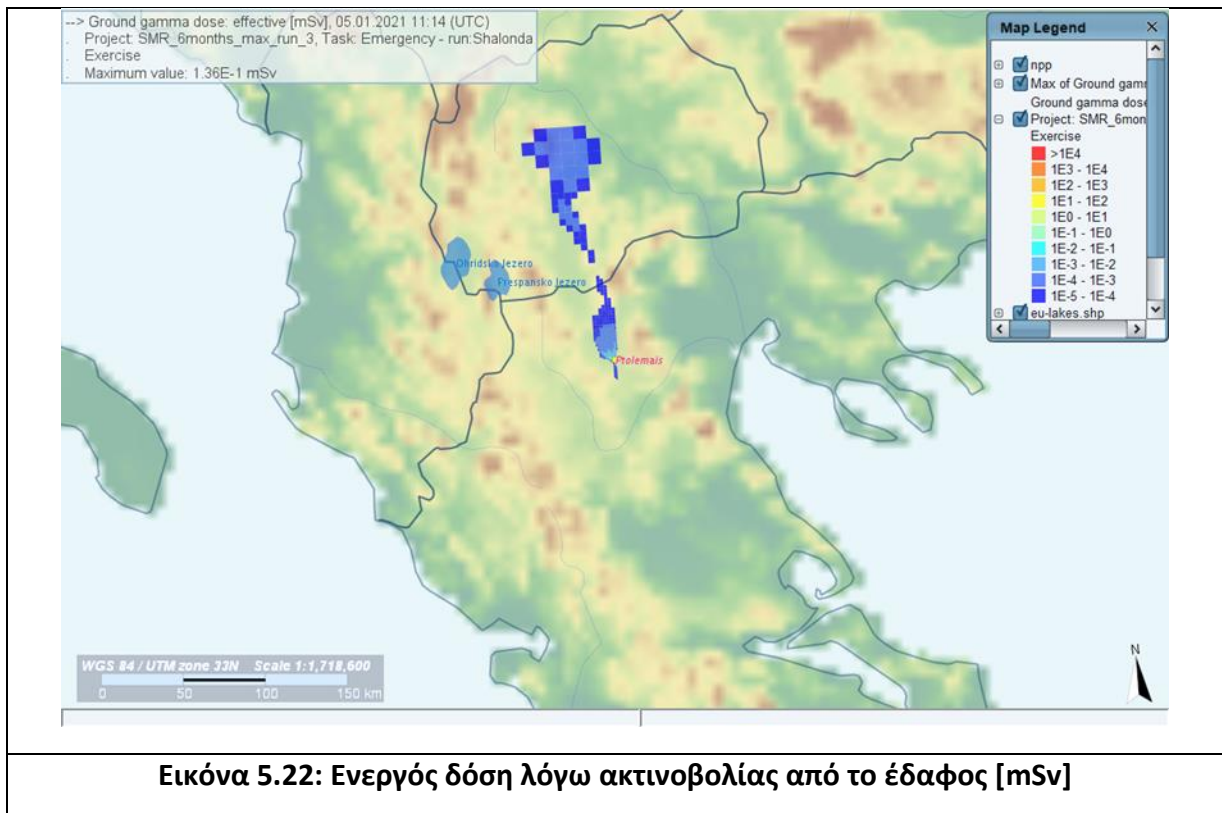
5.3.2 Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)



Εικόνα 5.21: Συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος, μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης [Bq/m^2]

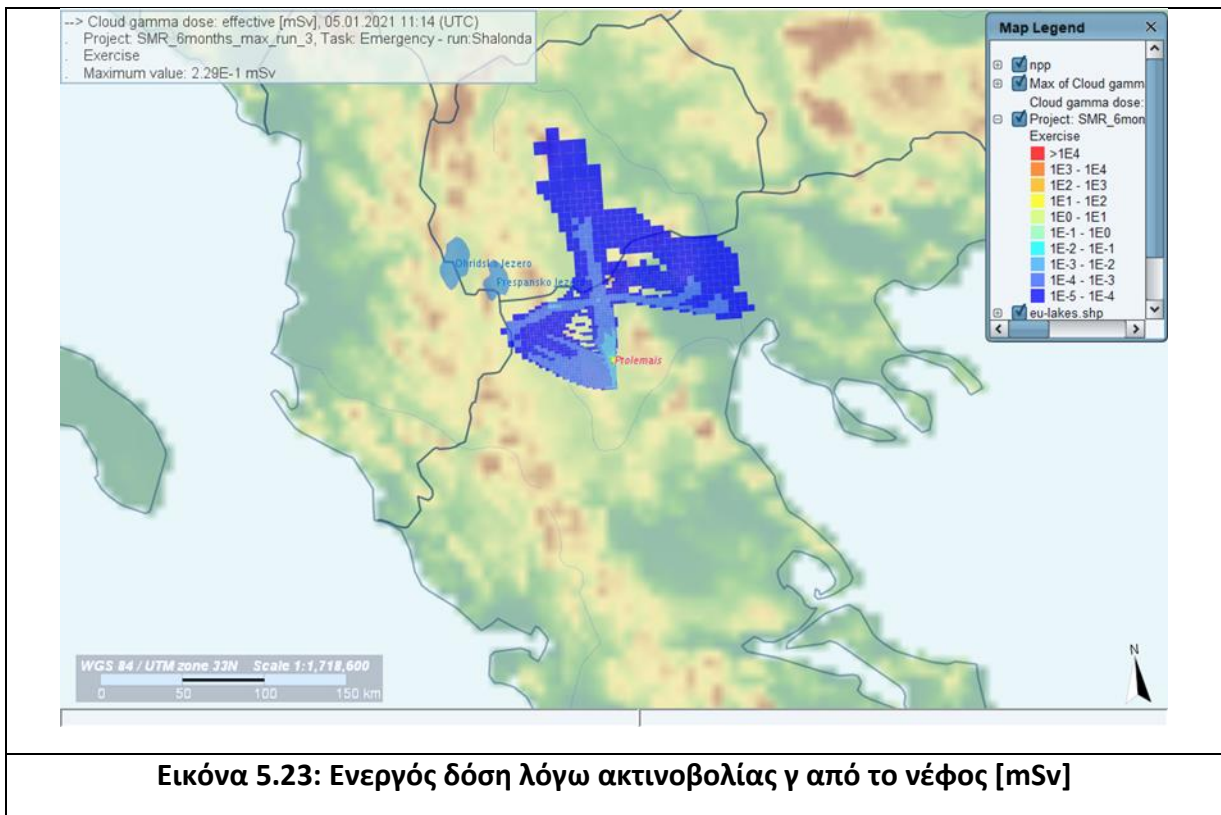
Στην εικόνα 5.21, παρουσιάζεται η συγκέντρωση του Cs-137 στο έδαφος λόγω υγρής και ξηρής εναπόθεσης. Η μέγιστη συγκέντρωση καταγράφεται εντός ενός χιλιόμετρου από τον σταθμό και ανέρχεται στα $3,97 \times 10^4 Bq/m^2$. Σημειώνεται ότι η διασπορά του καισίου εκτείνεται βόρεια του σταθμού, φτάνοντας στα 160 χιλιόμετρα απόσταση την τιμή $4,82 Bq/m^2$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση στα 140 χιλιόμετρα βόρεια του σταθμού, όπου εντοπίζεται ένα hotspot ακτίνας 15 χιλιομέτρων με αρκετά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, συγκριτικά με τις τιμές της γύρω περιοχής, περίπου $2,11 \times 10^2 Bq/m^2$. Η υπόθεση είναι ότι πιθανόν να έχει βρέξει κατά τη διάρκεια της διέλευσης του πλουμίου από εκείνη την περιοχή, δημιουργώντας εκεί ένα hotspot με κάπως πιο υψηλές τιμές συγκέντρωσης καισίου. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές της εναπόθεσης του καισίου είναι πολύ χαμηλότερες εκτός της εγκατάστασης από το επίπεδο των $1000 kBq/m^2$, στις οποίες ελήφθησαν μέτρα στο ατύχημα της Fukushima.

5.3.3 Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας από το έδαφος



Στην εικόνα 5.22 απεικονίζεται η συνολική δόση, λόγω απευθείας ακτινοβολίας, λόγω της εναπόθεσης των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος. Παρατηρείται μια μέγιστη τιμή που φτάνει τα 0,136 mSv, σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από τον σταθμό. Στα 150 χιλιόμετρα βόρεια του σταθμού, αντιστοιχεί ενεργός δόση με τιμή 10^{-4} mSv. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι σε απόσταση περίπου 50 χιλιομέτρων από τον σταθμό, οι δόσεις παρουσιάζουν μικρές τιμές, περίπου δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από εκείνες που καταγράφονται σε απόσταση 150 χιλιομέτρων από τον σταθμό. Αυτό υποδεικνύει ότι πιθανότατα συνέβη μικρή εναπόθεση ραδιενεργών ουσιών λόγω μετεωρολογικών συνθηκών. Αν και οι δόσεις που παρουσιάζονται στον χάρτη είναι πολύ μικρές, ωστόσο η ανομοιογένεια καταδεικνύει την πολυπλοκότητα και τη στοχαστική φύση του προβλήματος. Όπως προκύπτει, πέρα από την απόσταση, οι καιρικές συνθήκες σε συνδυασμό με τη χωρική και χρονική μεταβολή των καιρικών συνθηκών μπορεί να έχουν καθοριστικό ρόλο σε βαθμό μάλιστα που ακόμα και σε σχετικά μικρές αποστάσεις μπορεί να προκαλέσουν τυχαία, μη-προβλέψιμα μοτίβα εναπόθεσης.

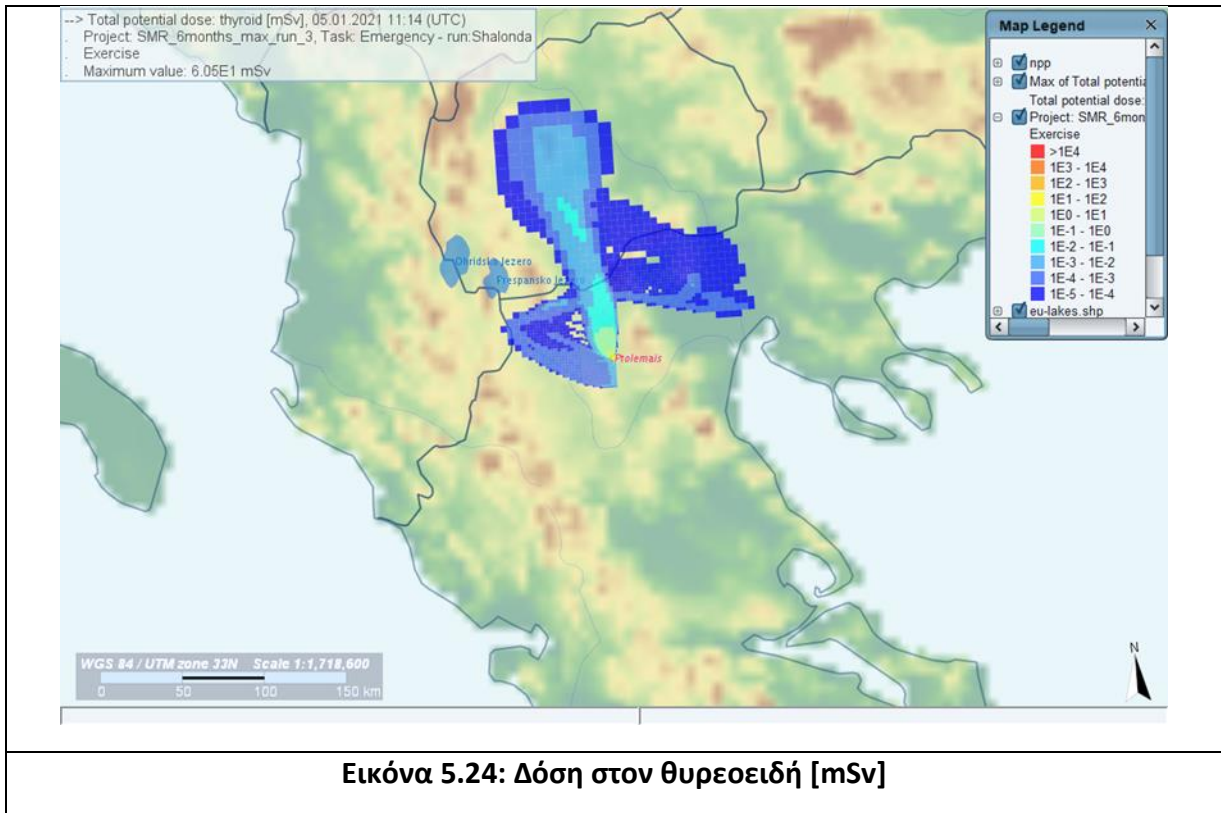
5.3.4 Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας από το νέφος



Εικόνα 5.23: Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας γ από το νέφος [mSv]

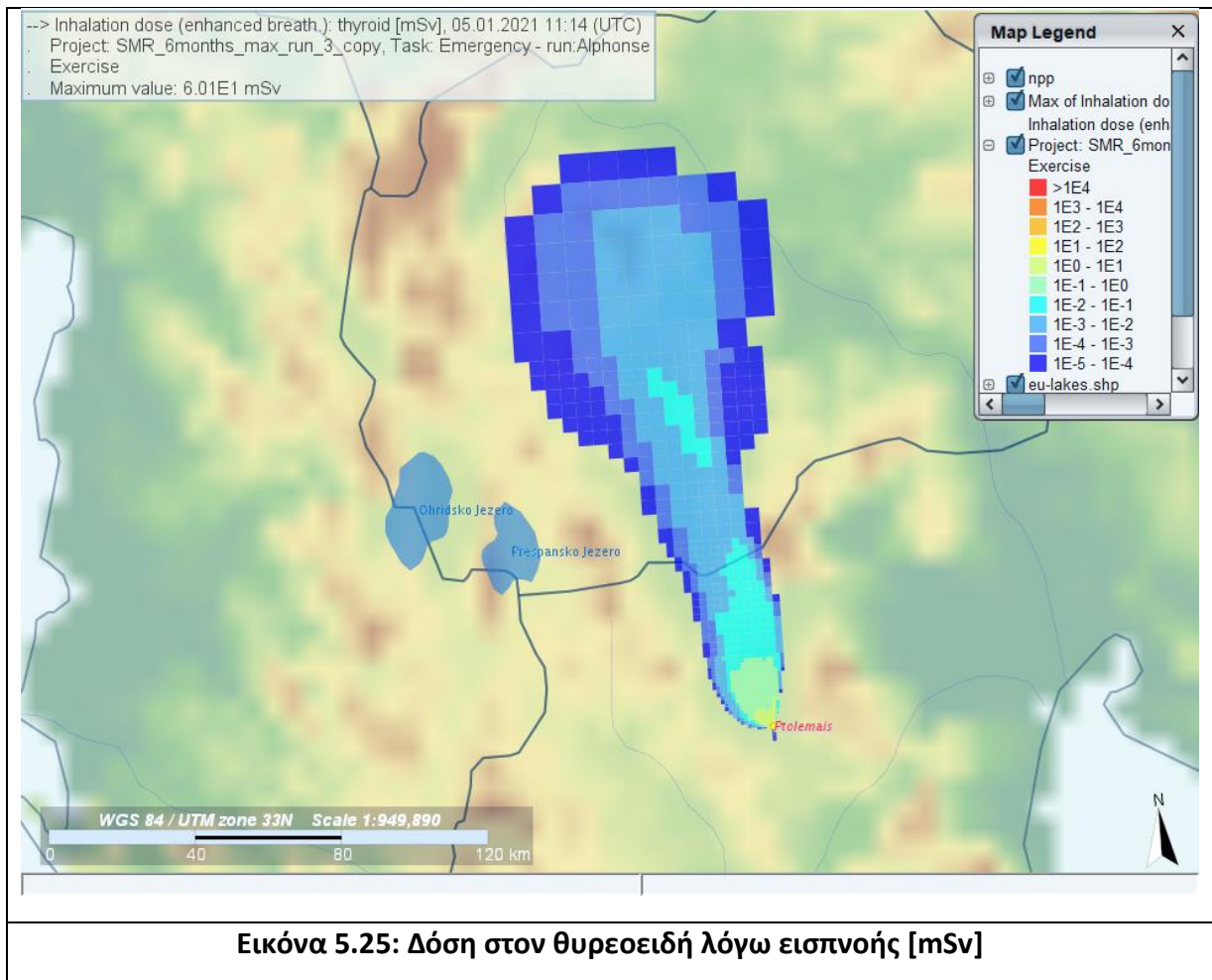
Στην εικόνα 5.23 φαίνεται η ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας γ από το νέφος. Η μέγιστη τιμή δόσης φτάνει τα 0,229 mSv, ένα χιλιόμετρο νότια του σταθμού. Η εκτεταμένη διασπορά που παρατηρείται στον χάρτη, κυρίως προς τα βορειοανατολικά, βόρεια και δυτικά του σταθμού, αντανακλά τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες που επηρέασαν τη μεταφορά του πλουμίου. Το σχήμα αυτό της δόσης αντανακλά την επίδραση της εξωτερικής δόσης από τα ευγενή αέρια, τα οποία, όπως εξηγήθηκε παραπάνω δεν κατακρατούνται στο περίβλημα με αποτέλεσμα να εκλύονται στη ατμόσφαιρα για σημαντικά περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με τα άλλα νουκλίδια που εναποτίθενται στο περίβλημα (βλέπε εικόνες 5.17-5.19). Σε απόσταση 140 χιλιομέτρων βόρεια, η τιμή ανέρχεται σε $1,15 \times 10^{-5}$ mSv, ενώ στα 90 χιλιόμετρα βορειοανατολικά αγγίζει τα $2,3 \times 10^{-5}$ mSv και στα 70 χιλιόμετρα δυτικά καταγράφεται στα $1,1 \times 10^{-5}$ mSv, δηλαδή πρακτικά μηδενικές.

5.3.5 Αθροιστική δόση στον θυρεοειδή



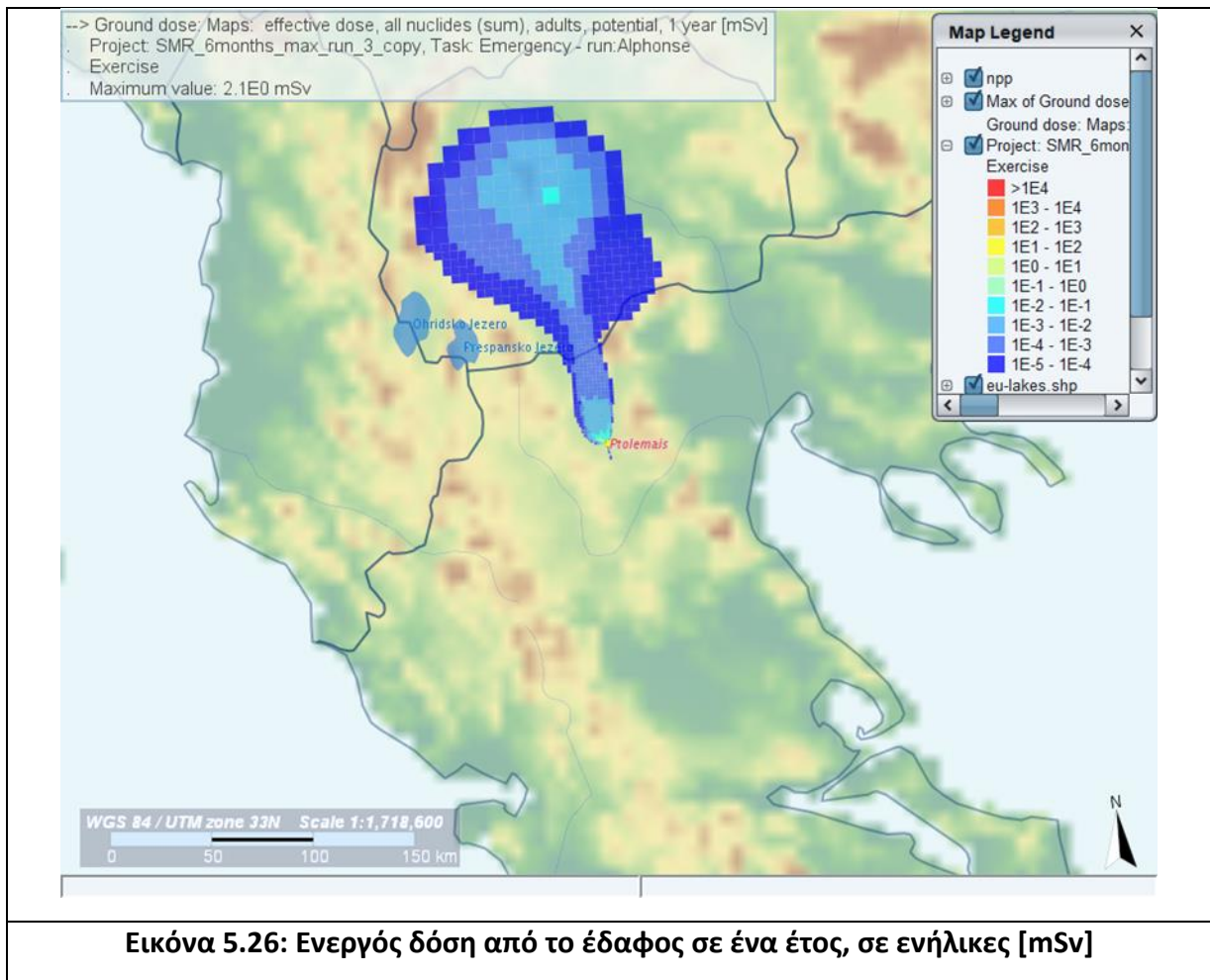
Στην εικόνα 5.24 απεικονίζεται η δυνητική δόση στον θυρεοειδή. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή δόσης σημειώνεται εντός μισού χιλιομέτρου από τον σταθμό, φτάνοντας τα 60,5 mSv. Αυτή η τιμή υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο για στοχαστικές επιπτώσεις, το οποίο έχει οριστεί στα 50 mSv από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντική διασπορά στον χάρτη, παρόμοια με τη δόση στην ατμόσφαιρα. Σε απόσταση περίπου 1,5 χιλιομέτρου από τον σταθμό, η δόση φτάνει τα 13 mSv, ενώ εντός 5 χιλιομέτρων πέφτει σημαντικά, μια τάξη μεγέθους κάτω. Ενδεικτικά, στα 160 χιλιόμετρα βόρεια του σταθμού, η δόση είναι περίπου $5,3 \times 10^{-5}$ mSv, καταδεικνύοντας την εκτεταμένη επίδραση του ατυχήματος σε μεγάλες αποστάσεις.

5.3.6 Δόση στον θυρεοειδή λόγω εισπνοής



Στην εικόνα 5.25 παρουσιάζεται η δόση στον θυρεοειδή λόγω εισπνοής. Η μέγιστη τιμή εκτιμάται στα 60,1 mSv σε απόσταση μισού χιλιομέτρου από τον σταθμό. Όπως σημειώθηκε στην υποενότητα 5.3.5, η συνολική δόση στον θυρεοειδή είναι 60,5 mSv, επομένως τα 60,1 είναι λόγω εισπνοής και τα υπόλοιπα 0,4 λόγω απευθείας ακτινοβολίας από το νέφος.

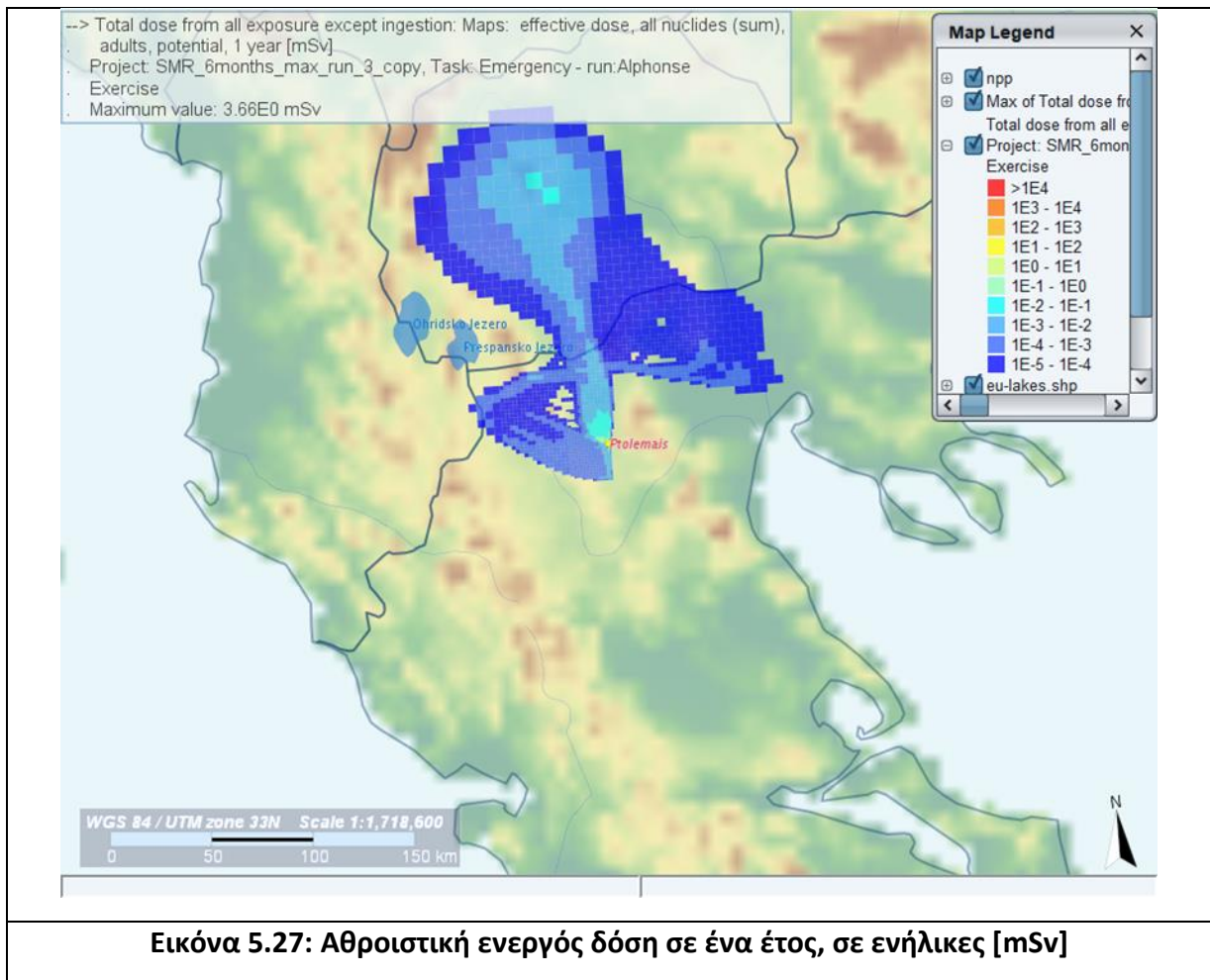
5.3.7 Ενεργός δόση από το έδαφος σε ένα έτος, σε ενήλικες



Εικόνα 5.26: Ενεργός δόση από το έδαφος σε ένα έτος, σε ενήλικες [mSv]

Στον χάρτη που παρουσιάζει την ενεργό δόση από το έδαφος για όλα τα νουκλίδια σε ένα έτος σε ενήλικες, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή δόσης φτάνει τα 2,1 mSv. Αυτή η τιμή, συγκριτικά με τα επίπεδα αναφοράς του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (20 με 100 mSv), είναι χαμηλότερη, υποδηλώνοντας χαμηλό κίνδυνο ακτινοβολίας σε αυτήν την περιοχή. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε απόσταση περίπου 6 χιλιομέτρων βόρεια από το σταθμό, η δόση είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μέγιστη. Στα 20 χιλιόμετρα βόρεια, παρατηρείται τρεις τάξεις μικρότερη τιμή. Ανεβαίνοντας βορειότερα, η δόση μειώνεται, όμως φτάνοντας περίπου στα 140 χιλιόμετρα βόρεια εμφανίζει αυξημένη τιμή στα $1,09 \times 10^{-2}$ mSv. Στα 170 χιλιόμετρα βόρεια, η δόση είναι $2,14 \times 10^{-5}$ mSv, αναδεικνύοντας τη μείωση του κινδύνου σε αυξημένη απόσταση από τον πυρηνικό σταθμό.

5.3.8 Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος, σε ενήλικες



Στον χάρτη που απεικονίζει την αθροιστική ενεργό δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες για ένα έτος, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή ενεργού δόσης φτάνει τα 3,66 mSv, σημαντικά μικρότερη από τα επιτρεπτά επίπεδα. Σε απόσταση 6 χιλιομέτρων βόρεια, η ενεργός δόση έχει μειωθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους από τη μέγιστη τιμή. Στα 16 χιλιόμετρα βόρεια, παρατηρείται τρεις τάξεις μικρότερη τιμή, υποδεικνύοντας μείωση του κινδύνου. Η διασπορά στον χάρτη είναι σημαντική, είτε βόρεια, είτε βορειοανατολικά και δυτικά. Μετά τα 16 χιλιόμετρα βόρεια, η τιμή συνεχίζει να μειώνεται, ενώ περίπου στα 140 χιλιόμετρα βόρεια δημιουργείται ένα hotspot με μεγαλύτερες δόσεις, φτάνοντας τα 0,01 mSv. Στα 170 χιλιόμετρα βόρεια από το σταθμό, παρατηρούμε τιμή 2×10^{-5} mSv, καταδεικνύοντας τη συνολική μείωση της ενεργού δόσης με την αύξηση της απόστασης από τον πυρηνικό σταθμό.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε μελέτη με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων ενός υποθετικού ατυχήματος σε μικρό αρθρωτό πυρηνικό αντιδραστήρα σε ενδεικτική τοποθεσία στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Συγκεκριμένα, έγινε εκτίμηση έκθεσης του πληθυσμού και συγκεντρώσεων ορισμένων αντιπροσωπευτικών ραδιονουκλιδίων για την περίπτωση μείζονος ατυχήματος που συνοδεύεται από τήξη της καρδιάς. Για την προσομοίωση του ατυχήματος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για αντιδραστήρες τύπου iPWR. Παράλληλα, για τη διεξαγωγή της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή της Πτολεμαΐδας για τους πρώτους έξι μήνες του 2021. Για την προσομοίωση της μεταφοράς και διασποράς του ραδιενεργού νέφους και την εκτίμηση της έκθεσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό JRODOS. Για τον όρο πηγής χρησιμοποιήθηκαν εκτιμήσεις σύμφωνα με μελέτη του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας, λαμβάνοντας υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά αυτού του τύπου αντιδραστήρων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα 174 πιθανά σενάρια ατυχήματος υποβλήθηκαν σε στατιστική επεξεργασία με χρήση MATLAB, προκειμένου να προσδιοριστούν οι μέγιστες και μέσες δόσεις και συγκεντρώσεις στην περιοχή γύρω από τον αντιδραστήρα. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τη δυσμενέστερη ημερομηνία των έξι μηνών, προκειμένου να εξεταστεί ενδεικτικά η πορεία και διασπορά του ραδιενεργού νέφους κατά στις δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της μελέτης είναι τα εξής:

- Η συγκέντρωση του Cs-137 λόγω της ξηρής αλλά και λόγω συνδυαστικά υγρής και ξηρής εναπόθεσης κυμαίνεται από 10.000 έως 100.000 Bq/m^2 . Οι μέσες συγκεντρώσεις κυμαίνονται κοντά στην μια τάξη μεγέθους χαμηλότερα.
- Καμία από τις μέγιστες δόσεις που εξετάστηκαν δεν υπερβαίνει τα επίπεδα των ντετερμινιστικών συνεπειών. Αντίθετα είναι τάξεις μεγέθους χαμηλότερες.
- Οι μέσες δόσεις που δέχεται ο πληθυσμός από το ατύχημα, τόσο οι άμεσες όσο και οι μακροπρόθεσμες, κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, με εξαίρεση τη δόση του θυρεοειδή, που εκτιμάται στα 10-100 mSv πολύ κοντά στο σταθμό. Οι μέγιστες δόσεις δεν ξεπερνούν τα 20 mSv, με εξαίρεση και πάλι τη δόση στον θυρεοειδή.
- Η δόση που δέχεται ο θυρεοειδής υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο των 50 mSv, φτάνοντας τα 60,5 mSv. Από αυτά, τα 60,1 mSv προκύπτουν λόγω εισπνοής του ιωδίου.

Παρόλα αυτά, η υπέρβαση συμβαίνει σε απόσταση της τάξης του μισού χιλιομέτρου από το σταθμό, δηλαδή εντός των ορίων της εγκατάστασης.

- Οι ενεργές δόσεις που λαμβάνει ο πληθυσμός λόγω της ακτινοβολίας από το νέφος και από το έδαφος κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Η αθροιστική ενεργός δόση και η ενεργός δόση που προκαλείται από ακτινοβολία από το έδαφος σε ένα έτος για τους ενήλικες είναι σημαντικά μικρότερη από τα επιτρεπτά επίπεδα. Η μέγιστη τιμή κοντά στον σταθμό είναι περίπου 2 mSv για τη δόση από ακτινοβολία από το έδαφος και σχεδόν 3,7 mSv για τη συνολική ενεργό δόση.
- Η αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ένα έτος σε παιδιά ενός έτους δεν ξεπερνάει τα επίπεδα αναφοράς, ούτε πολύ κοντά στο σταθμό. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της δόσης κοντά στο σταθμό είναι περίπου 20 mSv.
- Επιβεβαιώνεται η δυσκολία να προβλέψει κανείς τη μορφή και την έκταση των επιπτώσεων μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα, καθώς αυτή εξαρτάται από τη συνδυαστική επίδραση της χρονικής εξέλιξης της έκλυσης και των καιρικών συνθηκών.

7. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς για έναν τυπικό iPWR.....24

Πίνακας 4.7: Ομάδα ισοτόπων και παράμετροι εναπόθεσης.....29

8. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.5: Ισορροπία ιωδίου σε ατύχημα τύπου CVCS.....25

9. Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 3.1: Απεικόνιση σταθμού με μονάδες NuScale..... | 10 |
| Εικόνα 3.2: Διάγραμμα του αντιδραστήρα NuScale Power Module..... | 11 |
| Εικόνα 3.3: Ο αντιδραστήρας CAREM της Αργεντινής..... | 12 |
| Εικόνα 3.4: Τρέχουσα κατάσταση σχεδίων SMR-iPWR..... | 13 |
| Εικόνα 4.1: Όρος πηγής..... | 20 |
| Εικόνα 4.2: Συνολική ενεργότητα στην καρδιά του iPWR στην αρχή του ατυχήματος..... | 21 |
| Εικόνα 4.3: Ποσοστά έκλυσης και διάρκεια φάσεων του ατυχήματος..... | 22 |
| Εικόνα 4.6: Προσομοίωση ατμοσφαιρικής διασποράς τμημάτων της έκλυσης (puffs)..... | 27 |
| Εικόνα 5.1: Μέγιστη ενεργός δόση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το νέφος..... | 36 |
| Εικόνα 5.2: Μέση ενεργός δόση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το νέφος..... | 37 |
| Εικόνα 5.3: Μέγιστη ενεργός δόση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το έδαφος..... | 38 |
| Εικόνα 5.4: Μέση ενεργός δόση λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας από το έδαφος..... | 39 |
| Εικόνα 5.5: Μέγιστη αθροιστική δόση στον θυρεοειδή..... | 40 |
| Εικόνα 5.6: Μέση αθροιστική δόση στον θυρεοειδή..... | 41 |
| Εικόνα 5.7: Μέγιστη αθροιστική ενεργός δόση, κατά τη φάση διέλευσης του νέφους..... | 42 |
| Εικόνα 5.8: Μέση αθροιστική ενεργός δόση, κατά τη φάση διέλευσης του νέφους..... | 43 |
| Εικόνα 5.9: Μέγιστη αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος σε παιδιά ενός έτους..... | 44 |
| Εικόνα 5.10: Μέση αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος σε παιδιά ενός έτους..... | 45 |
| Εικόνα 5.11: Μέγιστη αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος σε ενήλικες.... | 46 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 5.12: Μέση αθροιστική δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος σε ενήλικες..... | 47 |
| Εικόνα 5.13: Μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης..... | 48 |
| Εικόνα 5.14: Μέση συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης..... | 49 |
| Εικόνα 5.15: Μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος μέσω εναπόθεσης (υγρής και ξηρής)..... | 50 |
| Εικόνα 5.16: Μέση συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος μέσω εναπόθεσης (υγρής και ξηρής)..... | 51 |
| Εικόνα 5.17: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) Cs-137 στο νέφος κοντά στο έδαφος..... | 53 |
| Εικόνα 5.18: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) I-131 στο νέφος κοντά στο έδαφος..... | 54 |
| Εικόνα 5.19: Χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση (έκθεση) Xe-133 στο νέφος κοντά στο έδαφος..... | 54 |
| Εικόνα 5.21: Συγκέντρωση Cs-137 στο έδαφος, μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης..... | 57 |
| Εικόνα 5.22: Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας από το έδαφος..... | 58 |
| Εικόνα 5.23: Ενεργός δόση λόγω ακτινοβολίας γ από το νέφος..... | 59 |
| Εικόνα 5.24: Δόση στον θυρεοειδή..... | 60 |
| Εικόνα 5.25: Δόση στον θυρεοειδή λόγω εισπνοής..... | 61 |
| Εικόνα 5.26: Ενεργός δόση από το έδαφος σε ένα έτος, σε ενήλικες..... | 62 |
| Εικόνα 5.27: Αθροιστική ενεργός δόση σε ένα έτος, σε ενήλικες..... | 63 |

10. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 5.20: Η χρονική εξέλιξη της έκλυσης των τριών αντιπροσωπευτικών νουκλιδίων...56

11. Κατάλογος Αναφορών

Lamarsh, J.R. & Baratta, A. (2019). Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία, 4η Έκδοση. Επιμέλεια: Ν. Πετρόπουλος, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Αθήνα

Mitrakos, Dimitris. "Radiological Impact and Emergency Zones for Small IPWR with Different Approaches for Source Term Calculation." *Progress in Nuclear Energy*, vol. 145, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104123>

Μητράκος Δ. (2022), Σημειώσεις μαθήματος «Ραδιενέργεια και Περιβάλλον»

Nakhle, Carole. "The Potential of Small Nuclear Reactors." *GIS Reports*, 17 Mar. 2022, www.gisreportsonline.com/r/small-modular-reactors/.

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

Wikipedia Contributors. "Small Modular Reactor." *Wikipedia*, 2019, en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor.

Fernández-Arias, Pablo, et al. "Bibliometric Review and Technical Summary of PWR Small Modular Reactors." *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16135168>.

Wengert, Annemarie. *JRodas: An Off-Site Emergency Management System for Nuclear Accidents*, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2017

Rosanowitsch, Dunja (ITES). "KIT - ITES -Departments - Resilient and Smart Infrastructure Systems (RESIS) - JRODOS." www.ites.kit.edu, 8 Aug. 2023, www.ites.kit.edu/english/294.php

Da Mata, Jônatas, et al. , "Comparison of the performance, advantages, and disadvantages of nuclear power generation compared to other clean sources of electricity", International Nuclear Atlantic Conference – INAC, 2017

Raimi, Daniel, Yuqi Zhu, Richard G. Newell, Brian C. Prest, et al. "Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition." *Resources for the Future*, March 28 2023, www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2023/.

"Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας – Πυρηνική Ασφάλεια." *Eeae.gr*

QGIS. "Discover QGIS." *Qgis.org*, qgis.org/en/site/about/index.html.

HYUNGJOON YU, Dose Assessment in Emergency Situation, *Ansn.iaea.org*, 12 June 2019, ansn.iaea.org/Common/topics/OpenTopic.aspx?ID=18401

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

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

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

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)