

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ
ΣΕ
‘ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ’

Γ. Ε. ΝΙΚΟΛΑΟΥ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

2^η ΕΚΔΟΣΗ
ΞΑΝΘΗ
2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η αδήριτη ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια, όπως αυτή έχει επιβληθεί από τις ανάγκες του σύγχρονου πολιτισμού, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη της πυρηνικής βιομηχανίας. Έτσι, το 16% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται σήμερα από πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σύμφωνα με την *World Nuclear Association*, σήμερα (1/2020) λειτουργούν 442 πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος σε ολόκληρο τον κόσμο ενώ κατασκευάζονται ή υφίστανται αναβάθμιση άλλοι 49. Επιπλέον, 136 αντιδραστήρες έχουν εγκριθεί για κατασκευή και λειτουργία μέσα σε 8-10 χρόνια, ενώ η κατασκευή 277 είναι στη φάση διαπραγματεύσεων για λειτουργία μέχρι το 2030. Η πλειονότητα των μελλοντικών αντιδραστήρων είναι σε χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και της Ασίας.

Η εξέλιξη και λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων, λαμβάνοντας υπόψη και τα πυρηνικά ατυχήματα στο Three Mile Island, στο Chernobyl και τη Fukushima, ευαισθητοποίησαν περαιτέρω τη διεθνή επιστημονική και πολιτική κοινότητα σχετικά με την ασφαλή λειτουργία των κύκλων πυρηνικού καυσίμου για παραγωγή ενέργειας και την αποτελεσματική αντιμετώπιση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον από ενδεχόμενο ατύχημα. Έτσι, εθνικοί και διεθνείς φορείς ενεργοποιήθηκαν στην περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη σχετικά με θέματα κύκλων πυρηνικού καυσίμου, ασφάλειας και επιπτώσεων με σκοπό μια βιώσιμη ασφαλή μορφή ενέργειας.

Κύριος σκοπός του βιβλίου είναι να παραθέσει βασικά στοιχεία σχετιζόμενα με τους κύκλους πυρηνικών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, με θέματα ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων, με την αξιολόγηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον στην περίπτωση ατυχήματος και με τεχνικές ελέγχου αντικειμένων με βάση τις πυρηνικές ακτινοβολίες. Το βιβλίο αυτό θα συμπληρωθεί κατά τη διάρκεια των μαθημάτων με περαιτέρω βιβλιογραφία στο διαδίκτυο και με τη χρήση ειδικών υπολογιστικών προγραμμάτων.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στο Δρ. Ι. Φαντίδη και τους φοιτητές του 8^{ου} εξαμήνου (ακαδημαϊκό έτος 2009-2010) Δ. Αλιμούδη, Ε. Καραμανλίδη, Φ. Παυλίδου και Δ. Τζώτζιο για τα σχόλια επί της 1^{ης} έκδοσης και τις διορθώσεις που πρότειναν.

Ξάνθη, Ιανουάριος 2020

Γ. Ε. Νικολάου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
ΚΥΚΛΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	6
1.1 Περιγραφή του κύκλου πυρηνικού καυσίμου για παραγωγή ενέργειας	6
1.2 Απελευθερώσεις από τον κύκλο πυρηνικού καυσίμου κατά την κανονική λειτουργία	10
1.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	12
1.4 Μελλοντικός κύκλος πυρηνικού καυσίμου για παραγωγή ενέργειας	13
1.4.1 Μεταστοιχείωση (Partitioning and Transmutation, P & T)	13
1.4.2 Υποκρίσιμα Συστήματα Οδηγούμενα από Επιταχυντή (ADS).....	18
1.4.3 Στρατηγικές κύκλων πυρηνικών καυσίμων.....	20
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	23
ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ	23
2.1 Σχεδιαστικές αρχές αντιδραστήρων	23
2.1.1 Ράβδοι καυσίμου.....	24
2.1.2 Ψυκτικό	25
2.1.3 Έλεγχος αντιδραστικότητας	25
2.1.4 Συστήματα διακοπής λειτουργίας.....	26
2.1.5 Η δομή της καρδιάς του αντιδραστήρα	26
2.1.6 Διαχείριση πυρήνα.....	27
2.1.7 Συστήματα παρακολούθησης	27
2.1.8 Ανάλυση ασφαλείας	27
2.2 Συστήματα ψύξης αντιδραστήρων	28
2.2.1 Αντιδραστήρας PWR.....	28
2.2.2 Αντιδραστήρας BWR	30
2.2.3 Αντιδραστήρας CANDU	30
2.3 Φράγματα εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων.....	32
2.4 Άμυνα - σε - βάθος (Defense - in - Depth)	33
2.5 Θάλαμος ελέγχου της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα.....	34
2.6 Ατυχήματα σε αντιδραστήρες PWR.....	36
2.6.1 Αιτίες ατυχημάτων.....	36
2.6.2 Εξέλιξη ατυχήματος LOCA.....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	41
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ	41
3.1 Χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού στρώματος	41
3.2 Ατμοσφαιρικός κύκλος του ραδιενεργού υλικού	44
3.3 Μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής διασποράς και της εναπόθεσης	46
3.3.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεως ραδιενεργού υλικού στον αέρα	47

3.3.2	Υπολογισμός συγκεντρώσεως ραδιενεργού υλικού στο έδαφος.....	50
3.4	Υπολογισμός ραδιενεργών δόσεων	53
3.4.1	Οδοί εσωτερικής έκθεσης.....	53
3.4.2	Οδοί εξωτερικής έκθεσης	56
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	64
	ΚΩΔΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ	
	ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ.....	64
4.1	Υπολογισμός πηγής εκπομπής.....	64
4.1.1	Ο κώδικας ORIGEN	65
4.2	Ο κώδικας RASCAL	68
4.2.1	Εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα	69
4.2.2	Έξοδος του RASCAL	75
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	80
	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	80
5.1	Ραδιενέργεια στο περιβάλλον.....	80
5.2	Μετρήσεις ακτινοβολίας-α του αέρα.....	81
5.3	Μετρήσεις ακτινοβολίας-γ σε στερεά και υγρά δείγματα.....	86
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	93
	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	93
6.1	Εφαρμογές των μεθόδων Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου.....	93
6.2	Ραδιογραφικές μέθοδοι.....	94
6.2.1	Απεικονιστικές αρχές ραδιογραφίας νετρονίων	94
6.2.2	Εφαρμογές στην πυρηνική τεχνολογία.....	96
6.3	Ραδιοσκοπία νετρονίων: δυναμική απεικόνιση	100
6.4	Ψηφιακή ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography)	101
6.5	Άλλες μέθοδοι Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου	102
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	104
	Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MONTE CARLO N-PARTICLE (MCNP).....	104
7.1	Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στην Πυρηνική Τεχνολογία.....	104
7.2	Φύση της μεθόδου Monte Carlo	104
7.3	Παράδειγμα λειτουργίας της μεθόδου Monte Carlo	105
7.4	Ο κώδικας MCNP	106
7.4.1	Η δομή ενός αρχείου εισόδου	107
7.4.2	Προσδιορισμός της γεωμετρίας.....	108
7.4.3	Κυψέλες	108
7.4.4	Κάρτες κυψελών	111
7.4.5	Επιφάνειες.....	111
7.4.6	Κάρτες επιφανειών	112
7.4.7	Κάρτες δεδομένων	112

7.4.8	Η κάρτα MODE	114
7.4.9	Κάρτα παραμέτρων κυψελών – σπουδαιότητας.....	114
7.4.10	Κάρτες καθορισμού υλικών.....	114
7.4.11	Κάρτα προσδιορισμού της πηγής	115
7.4.12	Κάρτες ορισμού των αποτελεσμάτων (tally cards)	116
7.4.13	Κάρτες ελέγχου λειτουργίας (cut-off cards).....	116
7.4.14	Η εντολή GEB	117
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΥΚΛΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Είναι γνωστό πως η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων στηρίζεται στην αντίδραση νετρονίων με το σχάσιμο υλικό του καυσίμου με το οποίο τροφοδοτούνται [Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2005 - Τσάγκας, 1986]. Όλοι οι αντιδραστήρες που είναι σε λειτουργία χρησιμοποιούν καύσιμα που βασίζονται στο ουράνιο (U), ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει και πλουτώνιο (Pu). Το καύσιμο μπορεί να έχει τη μορφή:

- (1) οξειδίου του φυσικού ουρανίου [UO₂] (αντιδραστήρες CANDU),
- (2) οξειδίου του ουρανίου [UO₂] με εμπλουτισμένο U-235 σε αναλογία 1.5 - 4% (αντιδραστήρες CANDU, BWR, PWR),
- (3) οξειδίου μίγματος ουρανίου και πλουτωνίου [Mixed Oxide MOX, (UPu)O₂] με βάση το φυσικό ή απεμπλουτισμένο ουράνιο (0.72% ή 0.2% ²³⁵U αντίστοιχα). Η αναλογία ουρανίου και πλουτωνίου είναι 95% U, 5% Pu (αντιδραστήρες PWR, BWR) ή 75% U, 25% Pu (αντιδραστήρες LMFBR).

Όταν το καύσιμο δεν είναι σε θέση να συμβάλει στην αλυσωτή αντίδραση, δηλαδή $k < 1$, απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα. Δύο σενάρια διέπουν τη διαχείριση αυτού του εξαντλημένου καυσίμου:

- (1) επανεπεξεργασία του καυσίμου για την ανάκτηση του ουρανίου (απεμπλουτισμένο U) και του πλουτωνίου, και τη χρήση τους στην κατασκευή καυσίμου (MOX) ή
- (2) αποθήκευση του καυσίμου σε ειδικούς χώρους εναπόθεσης χωρίς να υπάρχει η πρόθεση ανάκτησής τους.

«Κύκλος πυρηνικού καυσίμου» είναι μια σειρά από βιομηχανικές και πυρηνικές διαδικασίες που εμπλέκονται στην παραγωγή ηλεκτρισμού στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος με τη χρήση ουρανίου και πλουτωνίου. Ο κύκλος πυρηνικού καυσίμου ξεκινά με την εξόρυξη του ορυκτού ουρανίου από το έδαφος και τελειώνει με τη διάθεση των ραδιενεργών καταλοίπων, που παράγονται κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας όλου του κύκλου (Σχήμα 1.1) [Cochran and Tsoulfanidis, 1999].

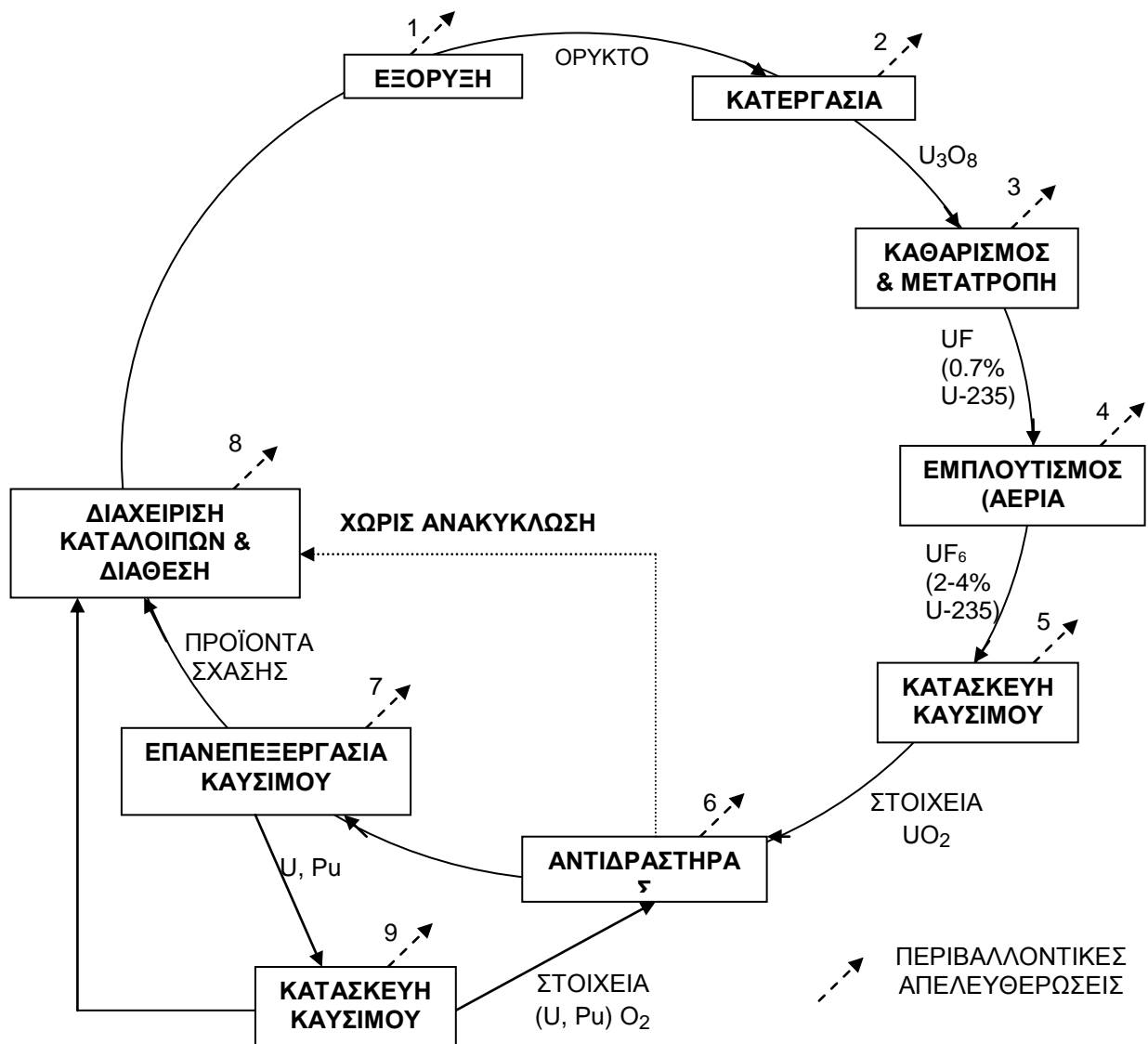
1.1 Περιγραφή του κύκλου πυρηνικού καυσίμου για παραγωγή ενέργειας Εξόρυξη και κατεργασία του ορυκτού ουρανίου

Το ουράνιο είναι ένα ελαφρώς ραδιενεργό υλικό, το οποίο βρίσκεται κυρίως στη Βόρεια Αμερική, στην Αυστραλία, στη Νότια Αφρική και στην Ανατολική Ευρώπη. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ορυκτού στα εν λειτουργία ορυχεία είναι περίπου 1%. Γενικά, υπάρχουν τα επιφανειακά ορυχεία για κοίτες ουρανίου κοντά στην επιφάνεια της γης και τα υπόγεια ορυχεία, όταν το ουράνιο βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 120 m. Οι εγκαταστάσεις κατεργασίας είναι συνήθως κοντά στα ορυχεία, όπου

πραγματοποιείται η κατεργασία του ορυκτού ουρανίου, ώστε να πάρει τη μορφή μιας στερεάς ένωσης ουρανίου με οξυγόνο (U_3O_8).

Καθαρισμός και Μετατροπή

Το προϊόν της κατεργασίας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν ως καύσιμο του πυρηνικού αντιδραστήρα. Το U_3O_8 καθαρίζεται από τις ακαθαρσίες που μπορεί να περιέχει από τη διάσπαση του ουρανίου και από άλλα υλικά (NO_2 , HF , CaF) και μετατρέπεται σε UF_6 . Το UF_6 είναι αέριο σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών και βρίσκεται σε μορφή κατάλληλη για εμπλουτισμό, επειδή οι περισσότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως καύσιμο ουράνιο εμπλουτισμένο με ^{235}U . Για τους αντιδραστήρες που δε χρησιμοποιούν ως καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο, το U_3O_8 μετατρέπεται απευθείας σε UO_2 , για να κατασκευαστεί το καύσιμό τους.



Σχήμα 1.1 Ο κύκλος πυρηνικού καυσίμου

Εμπλουτισμός

Η διαδικασία του εμπλουτισμού (enrichment) είναι αυτή που παράγει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ^{235}U , η οποία είναι συνήθως 1.5 - 4%. Οι κυριότερες μέθοδοι εμπλουτισμού στηρίζονται στη διαφορά που έχουν οι μάζες των νουκλιδίων ^{235}U και ^{238}U (περίπου 1%), με σκοπό να τα διαχωρίσουν. Αυτές είναι: αέρια διάχυση, φυγοκέντρωση αερίων και ηλεκτρομαγνητικός διαχωρισμός. Το εμπλουτισμένο UF_6 μετατρέπεται σε εμπλουτισμένο UO_2 , για να μεταφερθεί, ύστερα, για την κατασκευή του καυσίμου.

Η διεργασία του εμπλουτισμού αφήνει ως κατάλοιπα, απεμπλουτισμένο ουράνιο (depleted uranium) με σύσταση του ^{235}U , περίπου 0.2 έως 0.3%. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα καύσιμα MOX για αντιδραστήρες θερμικών και ταχέων νετρονίων. Επίσης μικρές ποσότητες αυτού του υλικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη πυκνότητα υλικού, όπως είναι η θωράκιση από ραδιενέργεια.

Κατασκευή καυσίμου

Αυτό κατασκευάζεται σε μορφή μικρών κυλίνδρων (pellets) και συσκευάζεται σε λεπτές ράβδους καυσίμου (fuel rod). Το περίβλημα της ράβδου (cladding) κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα ή από κράμα ζirkονίου. Οι ράβδοι αυτοί σχηματίζουν τα στοιχεία καυσίμου (fuel assembly) σε διάφορα γεωμετρικά σχήματα, ανάλογα με τον τύπο του αντιδραστήρα στον οποίο θα εισαχθούν.

Εξαντλημένο καύσιμο

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα μέρος των νουκλιδίων από την αρχική σύσταση του καυσίμου μεταστοιχείωνεται με αντιδράσεις σχάσης ή/και αρπαγής νετρονίων, σε προϊόντα σχάσης (Fission Products, FP), ισότοπα των υπερουρανίων στοιχείων (Transuranium, TRU), δηλαδή των Νεπτουνίου (Np), Αμερικού (Am), Κιουρίου (Cm), και Pu. Το εξαντλημένο καύσιμο (spent fuel) από έναν αντιδραστήρα PWR (UO_2 , εμπλουτισμός 3% ^{235}U , εξάντληση 50 GWd/tU) περιέχει σε βάρος περίπου 93.35% U [99.1% ^{238}U , 0.2% ^{235}U και 0.7% ^{236}U], 1% Pu, 5.5% προϊόντα σχάσης και 0.15% (Np, Am, Cm). Στην περίπτωση αποθήκευσης των εξαντλημένων καυσίμων, η πλήρης σύσταση του καυσίμου αποτελεί τα κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας (High Level Waste HLW). Τα προϊόντα σχάσης μαζί με τα υπερουράνια στοιχεία αποτελούν τα HLW στην περίπτωση επανεπεξεργασίας του εξαντλημένου καυσίμου.

Η παρουσία πολλών από αυτά τα νουκλίδια, που έχουν δημιουργηθεί στα καύσιμα κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, δρα ανταγωνιστικά στη σχάση του ^{235}U . Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση νετρονίων για πυρηνικές αντιδράσεις μειώνοντας τα διαθέσιμα νετρόνια για τη σχάση. Έτσι, κάποια στιγμή απαιτείται ανεφοδιασμός του αντιδραστήρα για τη διατήρηση της αλυσωτής αντίδρασης και του k , ώστε να είναι ~ 1.0008 (π.χ. η διάρκεια παραμονής των καυσίμων σε ένα PWR είναι 3 χρόνια).

Επανεπεξεργασία και ανακύκλωση

Το εξαντλημένο καύσιμο διαχωρίζεται στο ουράνιο, στο πλουτώνιο και στα κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας, που περιέχουν τα προϊόντα σχάσης και τα υπερουράνια στοιχεία, στις εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας. Η διαδικασία δίνει τη δυνατότητα ανακύκλωσης του ουρανίου και του πλουτωνίου σε καινούρια καύσιμα. Το ουράνιο και το πλουτώνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή καυσίμου MOX, που τροφοδοτεί τους αντιδραστήρες θερμικών και ταχέων νετρονίων. Η διαδικασία της επανεπεξεργασίας είναι λοιπόν αναγκαία μόνο στην περίπτωση χρήσης του πλουτωνίου.

Διάθεση του εξαντλημένου καυσίμου

Σήμερα, δεν υπάρχουν σε λειτουργία εγκαταστάσεις με δυνατότητα αποθήκευσης εξαντλημένων καυσίμων και καταλοίπων από την επανεπεξεργασία των καυσίμων. Πολλά κράτη εκπονούν μελέτες για τη μελλοντική αποθήκευση του εξαντλημένου καυσίμου και των καταλοίπων από την επανεπεξεργασία. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι αυτή της εναπόθεσης των καταλοίπων σε μεγάλο βάθος μέσα σε γεωλογικούς χώρους (repositories).

Κατάλοιπα

Τα κατάλοιπα από τον κύκλο πυρηνικού καυσίμου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ποσότητα της ραδιενέργειας ως υψηλής, μεσαίας και χαμηλής ραδιενέργειας:

- (1) κατάλοιπα χαμηλής ραδιενέργειας (Low Level Waste LLW), που παράγονται από όλα τα στάδια του κύκλου του καυσίμου,
- (2) κατάλοιπα μεσαίας ραδιενέργειας (Intermediate Level Waste ILW), που παράγονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα και από την επανεπεξεργασία του καυσίμου,
- (3) κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας (High Level Waste HLW), τα οποία περιλαμβάνουν τα προϊόντα σχάσης μαζί με το Np, το Am, το Cm από την επανεπεξεργασία. Σε πολλές χώρες είναι το ίδιο το εξαντλημένο καύσιμο.

Υπάρχουν επίσης και μη-ραδιενεργά κατάλοιπα, όπως αυτά που προκύπτουν από την εξόρυξη και την κατεργασία του ορυκτού ουρανίου. Τα κατάλοιπα αυτά μπορεί να περιέχουν τοξικά υλικά και γι' αυτό το λόγο πρέπει να είναι προσεκτική η διαχείρισή τους.

Όλα τα στάδια του κύκλου πυρηνικού καυσίμου παράγουν κατάλοιπα, για τα οποία απαιτείται προσεκτική διαχείριση και συγκράτησή τους για λόγους ασφαλείας. Η επανεπεξεργασία ενός τόνου εξαντλημένου καυσίμου παράγει [Cochran and Tsoulfanidis, 1999]:

- 0.1 m³ HLW, περιέχοντας περίπου το 99% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.
- 1 m³ ILW, περιέχοντας περίπου το 1% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.
- 4 m³ LLW, περιέχοντας το 0.001% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.

1.2 Απελευθερώσεις από τον κύκλο πυρηνικού καυσίμου κατά την κανονική λειτουργία

Τα κυριότερα στοιχεία, τα νουκλίδια και οι χημικές ενώσεις που παράγονται κατά την κανονική λειτουργία (routine operation) του κύκλου πυρηνικού καυσίμου στο Σχήμα 1.1, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Περιβαλλοντικές απελευθερώσεις από τον κύκλο πυρηνικών καυσίμων

Στάδια κύκλου	Περιβαλλοντικές απελευθερώσεις	Στάδια κύκλου	Περιβαλλοντικές απελευθερώσεις
1	U,Th,Ra,Rn,RnD*	6	H-3, Kr-85, Xe-133, Ar-37, I-131, άλλα προϊόντα σχάσης, θερμότητα
2	Th,Ra,Rn,RnD,(U)+ παραγόμενα χημικά στοιχεία	7	H-3,Kr-85,I-131,I-129, άλλα προϊόντα σχάσης, υπερουράνια στοιχεία, χημικά
3	NO ₂ , HF,CaF,(UF ₆), (Th-234)	8	μακρόβια προϊόντα σχάσης, υπερουράνια στοιχεία
4	θερμότητα, άνθρακα, (UF ₆)	9	χημικά, (Pu)
5	χημικά, F ₂ , HNO ₃		

*RnD: τα θυγατρικά του ραδόνιου

Εξόρυξη και κατεργασία του ορυκτού ουρανίου

Το ορυκτό ουράνιο συνδέεται μέσω της αλυσίδας διασπάσεως του ²³⁸U (²³⁸U → ²³⁴Th → ²²⁶Ra → ²²²Rn) με άλλα στοιχεία, όπως το ράδιο (²²⁶Ra) και το ραδόνιο (²²²Rn). Ουσιαστικά, ο κίνδυνος ραδιενέργειας προέρχεται από τα συνδεδεμένα αυτά νουκλίδια. Το ραδόνιο εκλύεται από το ορυκτό σε αέρια μορφή και αν διασπαστεί δημιουργεί μια σειρά από ραδιενεργά παράγωγα, όπως το πολώνιο, το βισμούθιο και ο μόλυβδος.

Για τους εργαζόμενους σε ορυχεία, ο κίνδυνος από το ραδόνιο είναι μεγαλύτερος στα υπόγεια ορυχεία απ' ότι στα επιφανειακά, όπου το ραδόνιο διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα, ενώ στα υπόγεια εγκλωβίζεται μέσα σ' αυτά και διασπώμενο αυξάνει τη ραδιενέργεια στο χώρο. Επομένως, είναι υποχρεωτικό να υπάρχει καλό σύστημα εξαερισμού των υπόγειων ορυχείων.

Μετατροπή, Εμπλουτισμός και Κατασκευή Καυσίμου

Η έκλυση των ραδιενεργών υλικών από τη μετατροπή, τον εμπλουτισμό και την κατασκευή του καυσίμου είναι μικρής περιεκτικότητας και χαμηλής συγκέντρωσης νουκλιδίων της σειράς του U. Τα χημικά στοιχεία και κάποια

οργανικά διαλύματα είναι πιο σημαντικά ως προς τις εκλύσεις υλικών, π.χ. NO₂, HF, H₂S.

Πυρηνικός Αντιδραστήρας – Παραγωγή Ενέργειας

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας των σταθμών πυρηνικής ενέργειας, γίνεται απελευθέρωση νουκλιδίων (Πίνακας 1.2) [UNSCEAR, 2000a & 2000b]. Αυτά είναι αέριας μορφής, ασθενή νουκλίδια των στοιχείων κρυπτό, ξένο και ιώδιο, που μπορούν να διαφύγουν από το καύσιμο. Η σύσταση των απελευθερώσεων των νουκλιδίων είναι διαφορετική, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.2, για κάθε τύπο αντιδραστήρα.

Πίνακας 1.2 Απελευθερώσεις νουκλιδίων από πυρηνικούς σταθμούς σε αναλογία με την παραγωγή ενέργειας

Τύπος αντιδραστήρα	Ραδιενέργεια (TBq/(GW(e)year))					
	Ευγενή αέρια	Τρίτιο (αέριο)	C-14	I-131	Τρίτιο (υγρό)	Άλλα υγρά
PWR*	13	2.4	0.22	2·10 ⁻⁴	19	2·10 ⁻³
BWR*	180	0.86	0.51	3·10 ⁻⁴	0.87	3·10 ⁻²
GCR ⁺	1100	5.7	4.5	--	6.6	1.42
AGR ^ο	26.4	1.9	1.25	1·10 ⁻⁵	360	0.6
CANDU*	250	330	1.6	1·10 ⁻⁴	340	4.4·10 ⁻⁴
RBMK*	460	26	1.3	7·10 ⁻³	11	6·10 ⁻³
FBR*	210	49	0.12	2·10 ⁻⁴	1.7	2.3·10 ⁻⁴

*1995-1997, ⁺1996, ^ο1998

Γενικά, οι συγκεντρώσεις των απελευθερωμένων νουκλιδίων στο περιβάλλον είναι πολύ μικρές για να μετρηθούν, εκτός αν πρόκειται για συγκεντρώσεις σε μικρές αποστάσεις από τον αντιδραστήρα. Ακόμη και σε κοντινή απόσταση από τον αντιδραστήρα μπορούν να υπάρξουν μετρήσεις μόνο για ορισμένα νουκλίδια.

Επανεπεξεργασία

Απελευθέρωση νουκλιδίων γίνεται καθόλη τη διάρκεια της επανεπεξεργασίας. Αέρια προϊόντα σχάσης μπορούν να διαφύγουν στο αρχικό στάδιο επεξεργασίας του καυσίμου, όπως και κατά τα διάφορα στάδια αποθήκευσης.

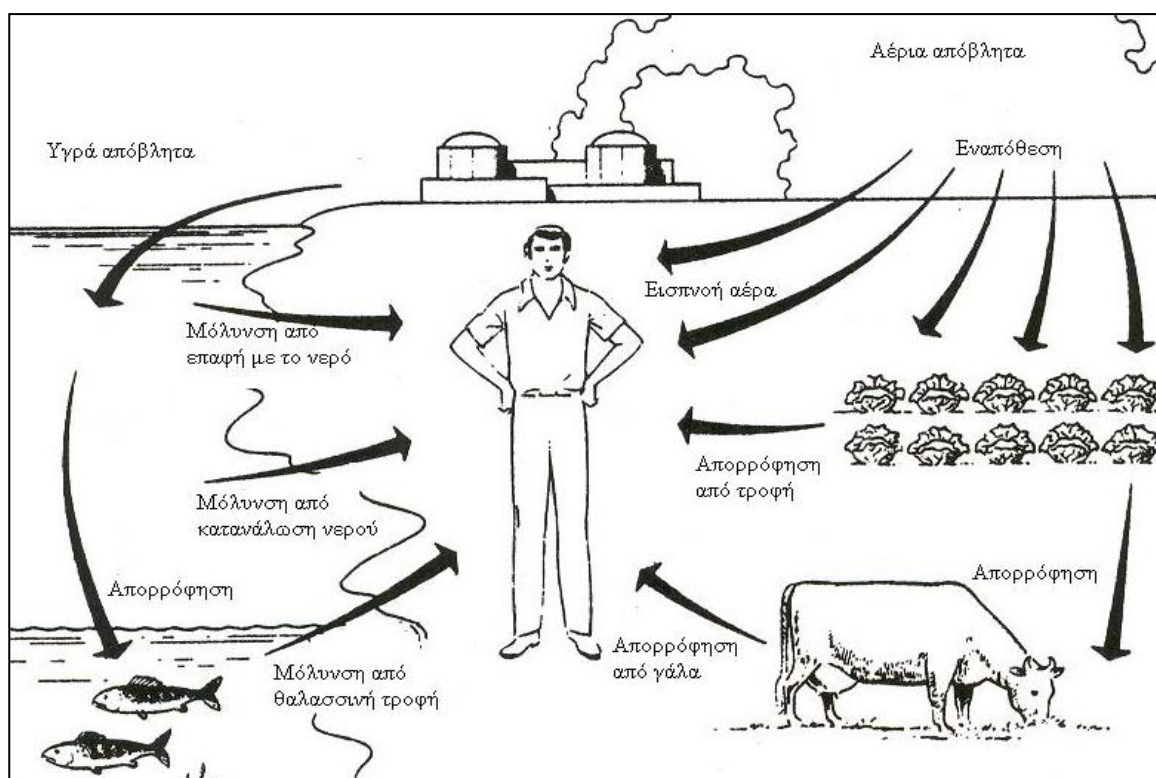
Τα υγρή μορφής κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας, που προκύπτουν από την επανεπεξεργασία, περιέχουν πάνω από το 97% της πραγματικής ραδιενέργειας, που βρίσκεται στο εξαντλημένο καύσιμο. Τα κυριότερα εργοστάσια επανεπεξεργασίας στο Sellafield (Αγγλία), στο Cap de la Hague

(Γαλλία) και στο δοκιμαστικό εργοστάσιο επανεπεξεργασίας στο Tokai-Mura (Ιαπωνία). Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής το επανεπεξεργασμένο καύσιμο αντιστοιχεί σε 160 GW(e).

Η πιθανότητα για απελευθέρωση των εκροών από τα κατάλοιπα είναι μεγαλύτερη από άλλα στάδια του κύκλου πυρηνικού καυσίμου. Αν και φαίνεται ότι η επανεπεξεργασία συντελεί στην έκλυση περισσότερης ραδιενέργειας στο περιβάλλον απ' ό,τι ο αντιδραστήρας, οι ποσότητες που απελευθερώνονται κάτω από κανονικές συνθήκες δεν φαίνεται να συνιστούν βιολογικό κίνδυνο, αλλά δικαιολογούν την προσεκτική παρακολούθησή τους.

1.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Στην περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος τα ραδιενεργά προϊόντα, που έχουν παραχθεί στο καύσιμο κατά την παραμονή τους στον αντιδραστήρα, είναι διαθέσιμα για απελευθέρωση στο περιβάλλον [Cooper et al., 2003]. Η έκλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ατμόσφαιρα ή στο υδάτινο περιβάλλον, όπως η θάλασσα ή οι ποταμοί, όταν δέχονται τις εκροές του ψυκτικού από τον πυρηνικό σταθμό. Οι δίοδοι μέσω των οποίων ο άνθρωπος μπορεί να δεχτεί μια δόση ακτινοβολίας μετά την απελευθέρωση του ραδιενεργού υλικού δίνονται στο Σχήμα 1.2 [Knief, 1992].



Σχήμα 1.2 Διαδρομές ραδιενεργών προϊόντων προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο

Έκθεση του ανθρώπου σε δόση εξωτερικής ακτινοβολίας προκαλείται κατά τη διέλευση του ραδιενεργού νέφους. Επιπλέον, εξωτερικές δόσεις ακτινοβολίας προκαλούνται από την εναπόθεση των νουκλιδίων στο έδαφος, στα ρούχα και στο δέρμα. Εσωτερικές εκθέσεις οφείλονται στην εισπνοή του ραδιενεργού νέφους και των επαναιωρούμενων νουκλιδίων, που εναποτέθηκαν στο έδαφος. Κίνδυνος υπάρχει από την κατάποση τροφών, οι οποίες έχουν μολυνθεί από την εναπόθεση των νουκλιδίων στα φυτά, στο γρασίδι και στα φρούτα. Οι δόσεις από κατάποση μπορούν να αποτραπούν κατά τις πρώτες ώρες και μέρες μετά το ατύχημα με την απαγόρευση της κατανάλωσης κάποιων τροφών.

Το πόσιμο νερό και οι θαλάσσιες τροφές αποτελούν εξίσου σημαντικές οδούς έκθεσης του ανθρώπου σε δόση ακτινοβολίας. Οι παροχές νερού μπορεί να έχουν μολυνθεί είτε από την αερομεταφερόμενη απόθεση του ραδιενεργού υλικού πάνω στο νερό είτε από τη βροχή και, κατά συνέπεια, προκαλείται μόλυνση και των θαλάσσιων οργανισμών. Τα σημαντικότερα προϊόντα της σχάσης από ατυχήματα πυρηνικών αντιδραστήρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3 [Knief, 1992]. Αυτά επικάθονται μέσω της εισπνοής στους αναφερόμενους ιστούς.

1.4 Μελλοντικός κύκλος πυρηνικού καυσίμου για παραγωγή ενέργειας

Τα πυρηνικά κατάλοιπα, που απαιτούν τη μεγαλύτερη προσοχή ως προς την αντιμετώπισή τους, είναι αυτά με υψηλή περιεκτικότητα σε ραδιενέργεια (HLW). Αν και αποτελούν το 1% περίπου των συνολικών καταλοίπων, εκπέμπουν το 99% της συνολικής ραδιενέργειας με διάρκεια ζωής που ανέρχεται σε εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Αυτά τα κατάλοιπα είναι είτε τα εξαντλημένα καύσιμα των πυρηνικών αντιδραστήρων είτε το αποτέλεσμα της επανεπεξεργασίας των καυσίμων, στην περίπτωση που η στρατηγική μιας χώρας είναι η απευθείας γεωλογική αποθήκευση των καυσίμων ή η επανεπεξεργασία τους αντίστοιχα (Σχήμα 1.3). Η διαχείριση των ραδιενεργών αυτών καταλοίπων είναι αναπόσπαστο κομμάτι της λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Σε μια προσπάθεια για να μειωθεί ο χρόνος εναπόθεσης των καταλοίπων, αλλά και η τοξικότητά τους, αναζητούνται τρόποι για τη μείωση αυτών των δύο παραμέτρων. Ένας από αυτούς τους τρόπους, ίσως ο σημαντικότερος, είναι η μετατροπή (μεταστοιχείωση) των τοξικών νουκλιδίων που υπάρχουν στο καύσιμο σε άλλα λιγότερο τοξικά [Koch, 1986 - Koch et al., 1997 – Nishihara et al., 2008 - Salvatores, 2002].

1.4.1 Μεταστοιχείωση (Partitioning and Transmutation, P & T)

Μεταστοιχείωση ονομάζεται η μετατροπή ενός νουκλιδίου σε άλλα μέσω των πυρηνικών αντιδράσεων σχάσης ή αρπαγής ή ραδιενεργού διάσπασης ή συνδυασμού αυτών. Η συγκεκριμένη στρατηγική απαιτεί την επεξεργασία του HLW για το διαχωρισμό (partitioning) και την απομάκρυνση τοξικών νουκλιδίων (π.χ. ^{237}Np , ^{241}Am) από αυτό (Σχήμα 1.3). Κατόπιν, τα νουκλίδια

τοποθετούνται σε πυρηνικά καύσιμα για τη μεταστοιχείωσή τους μέσα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες παραγωγής ενέργειας.

Πίνακας 1.3 Προϊόντα σχάσης μεγάλης σημασίας στην εσωτερική έκθεση από ατύχημα αντιδραστήρων

Νουκλίδια	Ραδιενεργός ημιζωή	Αποτελεσματική ημιζωή	Εσωτερική δόση (mrem/μCi)
Κόκαλο			
^{89}Sr	50 d	50 d	413
^{90}Sr - ^{90}Y	28 y	18 y	44.2
^{91}Y	58 d	58 d	337
^{144}Ce - ^{144}Pr	280 d	240 d	1.21
Θυρεοειδής			
^{131}I	8.1 d	7.6 d	1.484
^{132}I	2.4 h	2.4 h	54
^{133}I	20 h	20 h	399
^{134}I	52 m	52 m	25
^{135}I	6.7 h	6.7 h	124
Νεφρό			
^{103}Ru - $^{103\text{m}}\text{Rh}$	40 d	13 d	6.9
^{106}Ru - ^{106}Rh	1.0 y	19 d	65
^{129}Te - ^{129}Te	34 d	10 d	46
Μυς			
^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$	33 y	17 d	8.6

Η μεταβολή της τοξικότητας εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου, συναρτήσσει του χρόνου μετά το πέρας ακτινοβόλησής τους στον αντιδραστήρα, φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Η τοξικότητα αυτή συγκρίνεται με την αντίστοιχη της ποσότητας εξορυγμένου ουρανίου που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή αυτού του καυσίμου (διακεκομμένη γραμμή αναφοράς). Η καμπύλη 1 αντιστοιχεί στην τοξικότητα ως προς τις ακτινίδες στο καύσιμο (δηλαδή στα ισότοπα των U, Np, Pu, Am, Cm) και η καμπύλη 'Total (fission products)' στα προϊόντα σχάσης.

Η τοξικότητα μειώνεται κάτω από τη γραμμή αναφοράς μετά από πέντε εκατομμύρια χρόνια λόγω όλων των ακτινίδων (καμπύλη 1), ένα εκατομμύριο χρόνια εάν αφαιρεθεί το 99.5% του U και του Pu (καμπύλη 2) και χίλια χρόνια εάν επιπλέον αφαιρεθεί το 99.5% του Np και του Am (καμπύλη 3). Επιπλέον,

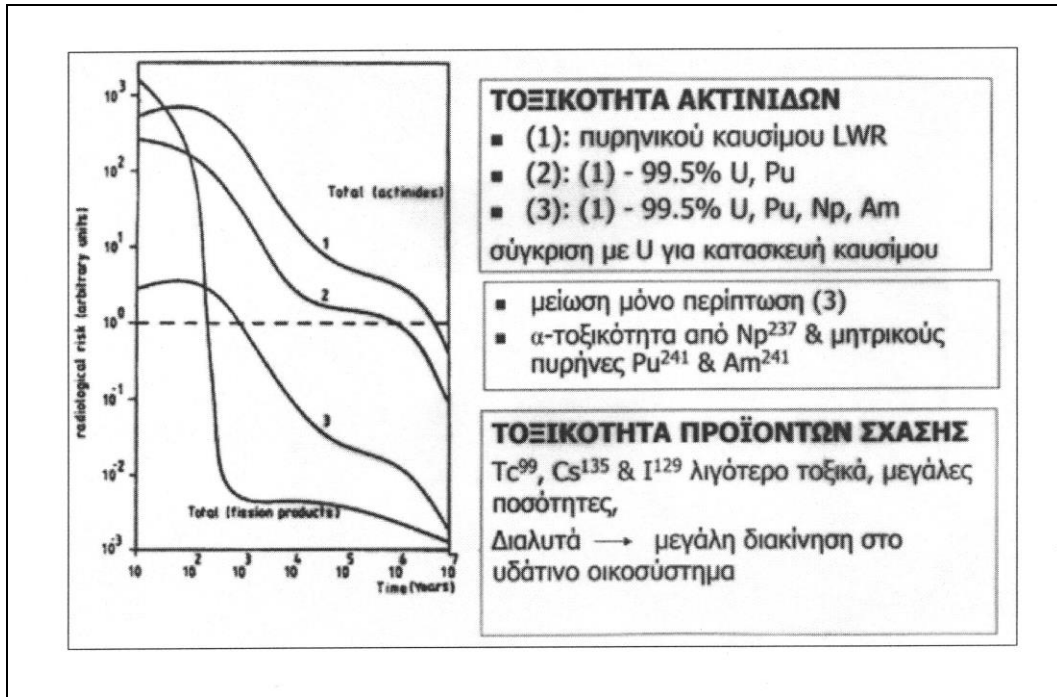
στην τελευταία αυτή περίπτωση έχει μειωθεί η τοξικότητα κατά ~300 φορές, σε σχέση με την καμπύλη 1, για το χρονικό διάστημα έως χίλια χρόνια μετά το πέρας της ακτινοβόλησης των καυσίμων στον αντιδραστήρα.



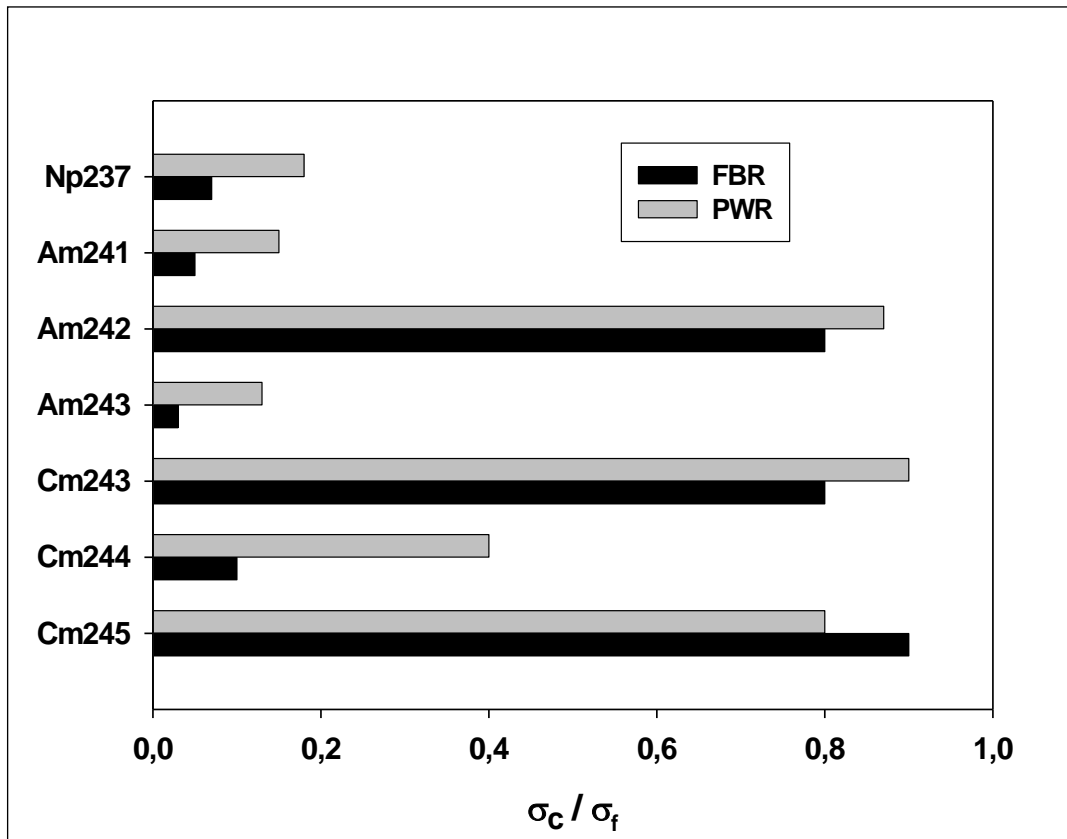
Σχήμα 1.3 Διαχείριση πυρηνικών καταλοίπων

Η τοξικότητα λόγω των προϊόντων σχάσης μειώνεται κάτω από τη γραμμή αναφοράς μετά από περίπου 200 χρόνια. Αν και το ^{99}Tc , το ^{135}Cs και το ^{129}I είναι λιγότερο τοξικά, υπάρχουν στα εξαντλημένα καύσιμα σε μεγάλες ποσότητες και είναι ιδιαίτερα διαλυτά με μεγάλη διακίνηση στο υδάτινο περιβάλλον. Άρα, αυτά τα νουκλίδια είναι εκ των υποψηφίων για μεταστοιχείωση.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι αντιδράσεις αρπαγής σε Np και Am δημιουργούν επιπλέον ακτινίδες Np και Am, θα ήταν επιθυμητή η σχάση τους σε προϊόντα λιγότερο τοξικά να υπερσχύει των αντιδράσεων αρπαγής. Αυτό σημαίνει, η ενεργός διατομή για αντίδραση σχάσης (σ_f) να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για αντίδραση αρπαγής (σ_c). Κατ' επέκταση, τίθεται το ερώτημα 'μεταστοιχείωση με αντιδραστήρες θερμικών ή ταχέων νετρονίων;', έτσι ώστε $(\sigma_c / \sigma_f) < 1$ και με τη μικρότερη δυνατή τιμή. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται το (σ_c / σ_f) για σημαντικά τοξικά νουκλίδια, στην περίπτωση των αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων LMFBR και θερμικών νετρονίων PWR. Τις ζητούμενες συνθήκες για το (σ_c / σ_f) ικανοποιεί ο αντιδραστήρας LMFBR.



Σχήμα 1.4 Κίνητρο για την στρατηγική P & T



Σχήμα 1.5 Ενεργές διατομές για διαφορετικά νουκλίδια σε PWR και LMFBR

Η πρώτη πειραματική μελέτη σχετικά με τη δυνατότητα μεταστοιχείωσης ²³⁷Np και ²⁴¹Am έγινε τη δεκαετία του '90 [Glatz et al., 1994 - Walker and

Nicolaou, 1995 - Nicolaou et al., 1995 - Koch et al., 1997 – Nicolaou, 2014]. Τα νουκλίδια αυτά διαχωρίστηκαν από HLW και αναμείχθηκαν ομοιογενώς σε ράβδους φρέσκου καυσίμου MOX [(74%U, 24%Pu, 2% ^{237}Np ή ^{241}Am)O₂]. Οι ράβδοι τοποθετήθηκαν στον αντιδραστήρα παραγωγής ενέργειας ταχέων νετρονίων PHENIX στη Γαλλία. Μετά από 375 ημέρες λειτουργίας του αντιδραστήρα, οι ακτινοβολημένοι πλέον ράβδοι καυσίμου αφαιρέθηκαν για εργαστηριακές αναλύσεις ως προς τις θερμοδυναμικές και μηχανικές ιδιότητές τους καθώς και τη σύστασή τους. Σχετικά με τις δύο ιδιότητές τους οι ράβδοι έδειξαν την ίδια, αναγκαία ως προς την ασφάλεια του αντιδραστήρα, συμπεριφορά όπως και τα MOX καύσιμα του αντιδραστήρα, που δεν περιείχαν ^{237}Np ή ^{241}Am . Παρατηρήθηκε λοιπόν, σωστή απαγωγή θερμότητας χωρίς απώλειες της ακεραιότητας του υλικού (ρωγμές, διόγκωση κτλ). Όσον αφορά τη σύσταση το ^{237}Np και το ^{241}Am είχαν μειωθεί κατά 30% περίπου έκαστο σε σχέση με την σύστασή τους στις ράβδους καυσίμου πριν την ακτινοβόλησή τους στον αντιδραστήρα. Εφαρμόζοντας τον εκθετικό νόμο

$$N = N_0 e^{-(\lambda/\tau)t}$$

όπου $N_0 = 100$ (αρχική ποσότητα), $N = 70$ (τελική ποσότητα), $\lambda = 0.7$ και $t = 375$ ημέρες, προκύπτει ότι το ήμισυ της ποσότητας του ^{237}Np ή του ^{241}Am θα έχει μεταστοιχειωθεί, άρα έχει μειωθεί η ποσότητά τους μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, με χρόνο υποδιπλασιασμού (τ) 735 ημερών, δηλαδή ~2 χρόνια. Αντίθετα, η μείωσή τους στο ήμισυ μέσω της ραδιενεργού τους διάσπασης είναι 2 εκατομμύρια και 433 χρόνια αντίστοιχα.

Ποιές όμως είναι οι επιπτώσεις της μεταστοιχειώσης στα κατάλοιπα των αντιδραστήρων; Ένας αντιδραστήρας PWR με αρχικό καύσιμο UO₂ (4% περιεκτικότητα σε ^{235}U) παράγει περίπου 68 kg ^{237}Np και 5 kg ^{241}Am στους 88 τόνους ακτινοβολημένου καυσίμου εξάντλησης 50 GWd/t που είναι εφοδιασμένος. Ας υποθεθεί ότι 2% ^{237}Np προστίθεται στους 30 τόνους MOX καυσίμου του LMFBR, δηλαδή 600 kg ^{237}Np , το οποίο αντιστοιχεί στο ^{237}Np που έχει παραχθεί από περίπου 9 PWR αντιδραστήρες. Σε ~2 χρόνια όλο το ^{237}Np από 4.5 PWR αντιδραστήρες θα έχει μεταστοιχειωθεί. Στην περίπτωση που 2% ^{241}Am προστεθεί στον FBR, τότε όλο το ^{241}Am από 58 PWR αντιδραστήρες θα έχει μεταστοιχειωθεί σε ~2 χρόνια.

Το κόστος των διαφόρων σταδίων παραγωγής ενέργειας δίνεται στον Πίνακα 1.4. Το κόστος αυξάνεται στην κατασκευή και στην επανεπεξεργασία ράβδων καυσίμου με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε Pu, Am και Cm λόγω των ακτινοβολιών-γ και νετρονίων που εκπέμπουν. Η κατασκευή τους απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις ακτινοπροστασίας (hot cells) και ρομποτική για τους αναγκαίους χειρισμούς.

1.4.2 Υποκρίσιμα Συστήματα Οδηγούμενα από Επιταχυντή (ADS)

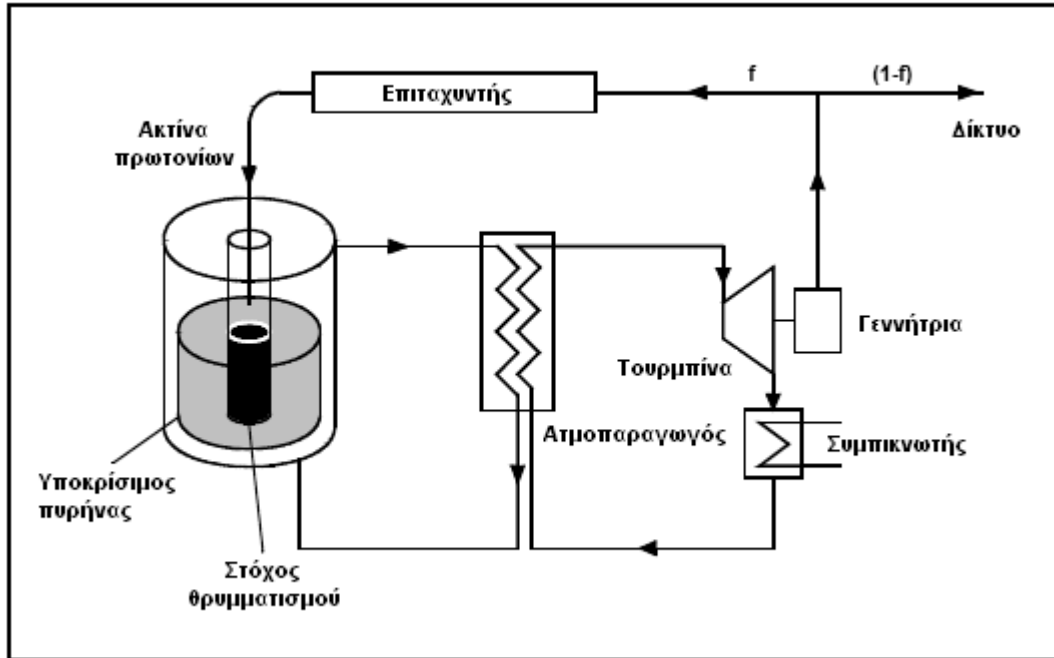
Γενικά στοιχεία

Τα Συστήματα ADS (Accelerator Driven Systems) συνδυάζουν έναν ισχυρό επιταχυντή φορτισμένων σωματιδίων (π.χ. πρωτονίων) με μια υποκρίσιμη καρδιά αντιδραστήρα που διαθέτει ένα στόχο βαρέως μετάλλου (π.χ. βολφράμιο, μόλυβδο) στο κέντρο της [OECD/NEA, 2002- Gokhale et al., 2005]. Η βασική ιδέα είναι η παραγωγή νετρονίων μέσω της αντίδρασης των πρωτονίων με το στόχο, όπου μέσω της διαδικασίας θρυμματισμού προκύπτουν ~30 νετρόνια ανά πρωτόνιο. Τα νετρόνια αυτά πολλαπλασιάζονται στα καύσιμα, τα οποία περιβάλλουν το στόχο για τη λειτουργία του αντιδραστήρα, που διατηρείται υποκρίσιμος ($k < 1$) με χρήση ράβδων ελέγχου.

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται ένα σύστημα ADS για παραγωγή ενέργειας. Τυπικά, ένα τέτοιο σύστημα παράγει περίπου 2000 MW θερμική ενέργεια ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια είναι περίπου 800 MW (100 MW για τη λειτουργία του επιταχυντή και 700 MW προς το δίκτυο).

Πίνακας 1.4 Κόστος παραγωγής ενέργειας με αντιδραστήρα

	Κόστος παραγωγής ενέργειας (\$/kg καυσίμου)			
	PWR-U	PWR-MOX	FBR-MOX	FBR-P & T
Κατασκευή καυσίμου	170	440	600	-
Επανεπεξεργασία	-	320	500	-
Μεταφορά καυσίμου	20	20	40	-
Διαχωρισμός HLW	-	-	-	400
Κατασκευή καυσίμου	-	-	-	1000
Μεταφορά καυσίμου	-	-	-	60
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	190	780	1140	1460



Σχήμα 1.6 Απλοποιημένη περιγραφή του ADS

Ο επιταχυντής σωματιδίων επιταχύνει δέσμη 5 έως 10 mA φορτισμένων σωματιδίων (πρωτόνια) σε ενέργειες 1 έως 1.5 GeV. Η δέσμη διαπερνά στον αντιδραστήρα μέσω ενός λεπτού παραθύρου, το οποίο πρέπει να εγγυάται την απόλυτα ασφαλή λειτουργία του συστήματος και να μην απορροφά τη δέσμη. Η επιλογή μιας ακτίνας πρωτονίων ενέργειας μεταξύ 1 και 1.5 GeV μειώνει δραστικά τις απαιτήσεις παραθύρου.

Η δέσμη στη συνέχεια προσκρούει στο στόχο, όπου παρατηρείται το φαινόμενο του θρυμματισμού και η παραγωγή ~ 30 νετρονίων ανά αρχικό πρωτόνιο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στόχων είναι ο τετηγμένος μόλυβδος (Pb) ή μίγμα μολύβδου – βισμούθιου (Pb-Bi LBE), ενώ ως ψυκτικό το υγρό νάτριο.

Στους υποκρίσιμους αντιδραστήρες η καρδιά είναι σχεδιασμένη, ώστε να μην περιέχει αρκετό σχάσιμο υλικό για να επιτευχθεί κρισιμότητα. Η τιμή του παράγοντα πολλαπλασιασμού κυμαίνεται μεταξύ $0.90 < k < 0.95$. Προκειμένου να παραχθεί ενέργεια απαιτείται η χρήση νετρονίων από κάποια εξωτερική πηγή, ώστε να ξεκινήσουν νέες αλυσίδες σχάσεων σε αντικατάσταση των παλιών. Αυτά είναι τα νετρόνια που παράγονται από τη διαδικασία του θρυμματισμού στο στόχο από τη δέσμη πρωτονίων, που στέλνει ο επιταχυντής.

Καύσιμα των συστημάτων ADS

Κύριος λόγος κατασκευής των συστημάτων ADS είναι η μεταστοιχείωση νουκλιδίων, με σκοπό τη μείωση της τοξικότητας των πυρηνικών καταλοίπων.

Τα αζωτούχα καύσιμα (νιτρίδια) επιτρέπουν την πλήρωση του αντιδραστήρα με μεγάλη ποσότητα πλουτωνίου. Αυτά τα καύσιμα σε σχέση με τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα οξειδία έχουν: ~ 4 φορές μεγαλύτερη

θερμική αγωγιμότητα, καλή συμβατότητα με δομικά και ψυκτικά υλικά, υψηλή διαλυτότητα σε νιτρικό οξύ ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας σε Pu. Η καλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει τη λειτουργία του αντιδραστήρα σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται η διόγκωση του καυσίμου, η παραγωγή αερίων προϊόντων σχάσης και ο κίνδυνος αποσύνθεσης των νιτριδίων σε υγρό ή αέριο μέταλλο και αέριο άζωτο. Τα καύσιμα αυτά είναι, επίσης, απόλυτα συμβατά με τα ψυκτικά μεταλλικά μέσα υγρής κατάστασης (Na, Pb/Bi). Η πιθανή αντίδραση του αζώτου με το περίβλημα του καυσίμου είναι λιγότερο ανησυχητική από την οξείδωση του αντίστοιχου καλύμματος του οξειδίου. Τα καύσιμα αυτά απαιτούν εμπλουτισμό του αερίου αζώτου με ^{15}N από 0.366%, που υπάρχει στην φύση σε ποσοστό 93-98%. Ο εμπλουτισμός είναι απαραίτητος για την αποφυγή παραγωγής ^{14}C , γεγονός, όμως, που αυξάνει το κόστος παρασκευής του καυσίμου.

Τα **μεταλλικά καύσιμα** έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και δεν επιβραδύνουν τα νετρόνια σε σχέση με τα νιτρίδια και οξειδία καύσιμα. Η υψηλότερη ενέργεια των νετρονίων επιτρέπει την αποτελεσματικότερη μεταστοιχείωση. Το πορώδες των καυσίμων διατηρείται στο 75%, για να αποφευχθεί η διόγκωση των μεταλλικών κραμάτων. Μειονεκτήματα των κραμάτων σε σχέση με τα νιτρίδια, είναι το χαμηλότερο σημείο τήξης, η μικρότερη διαλυτότητα Am και Np, η αντίδρασή τους με το ατσάλινο περίβλημα, η διόγκωση και η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της πορώδους δομής.

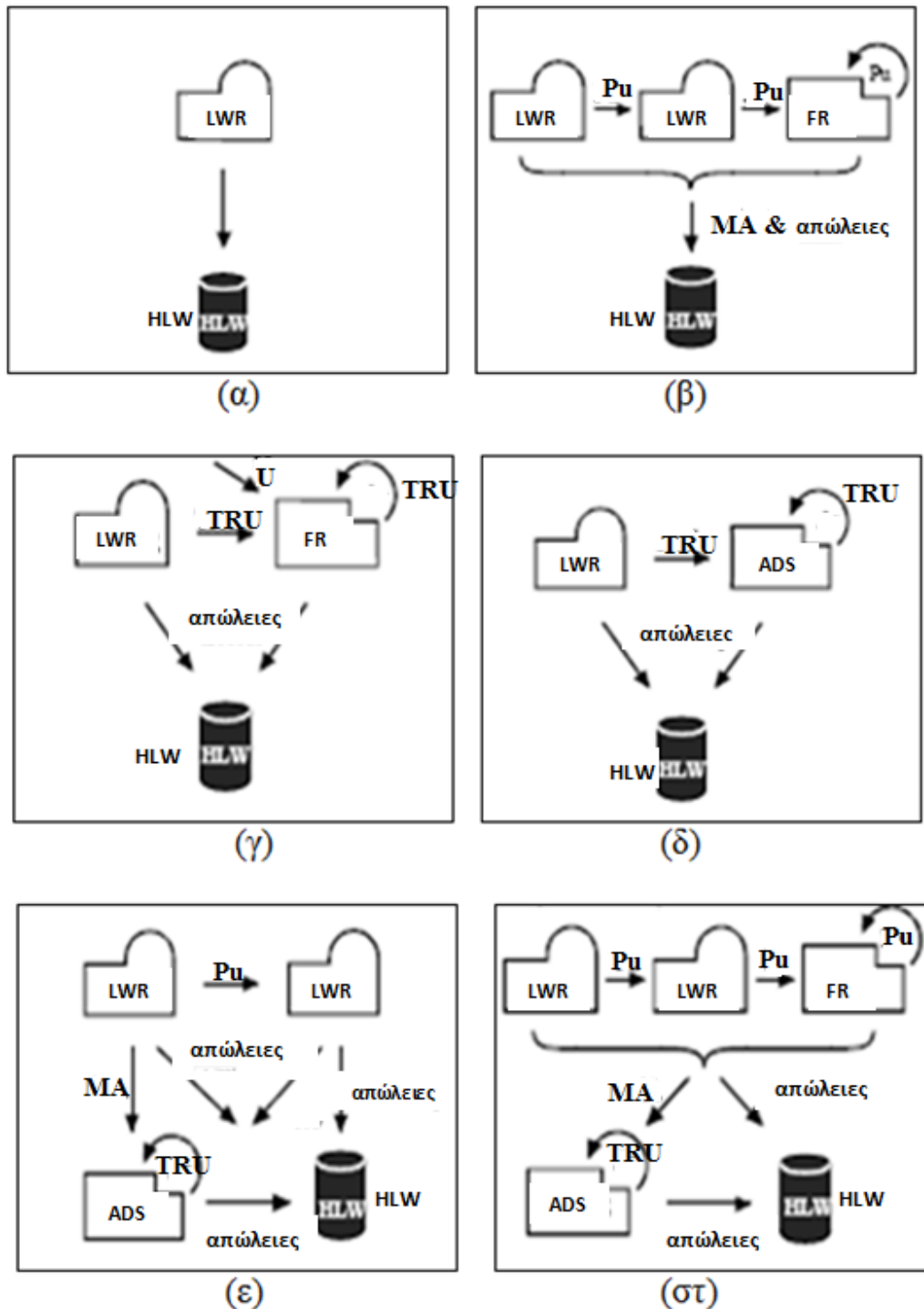
Τα **οξυγονούχα καύσιμα (οξειδία)** έχουν μεγάλη θερμική και χημική σταθερότητα. Η θερμική αγωγιμότητά τους είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν των νιτριδίων με συνέπεια την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο εσωτερικό των καυσίμων. Προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα των οξειδίων καυσίμων, που περιέχουν Am και Cm, στις υψηλές θερμοκρασίες, ο λόγος του οξυγόνου προς το μέταλλο πρέπει να είναι μικρότερος του 2, γεγονός που περιορίζει ακόμη περισσότερο τη θερμική αγωγιμότητα.

Η σημαντική διαφοροποίηση των συστημάτων με **καύσιμα τετηγμένων** μετάλλων είναι ότι το ίδιο υλικό χρησιμοποιείται ως στόχος, καύσιμο και ψυκτικό μέσο. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα υλοποίησης ενός συστήματος συνεχούς μεταστοιχείωσης, που δε θα απαιτεί τη μονάδα επανεπεξεργασίας. Στα συστήματα με υγρό στόχο-καύσιμο τα κατάλοιπα θα περιέχουν μόνο προϊόντα σχάσεως και θρυμματισμού. Ένα σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί πριν από την εφαρμογή της τεχνολογίας τετηγμένων αλάτων είναι η διάβρωση, η οποία προκαλείται από τα άλατα που χρησιμοποιούνται (κυρίως το Cl).

1.4.3 Στρατηγικές κύκλων πυρηνικών καυσίμων

Το Σχήμα 1.7 παρουσιάζει διαφορετικούς ανοικτούς (περίπτωση α) και κλειστούς κύκλους (περιπτώσεις β-στ) παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, συνδυάζοντας αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactor, LWR) και

ταχέων νετρονίων (Fast Reactor, FR) καθώς και σύστημα ADS. Υπάρχει, λοιπόν, ανακύκλωση Pu ή TRU σε συνδυασμούς συστημάτων και η αυτοανακύκλωσή τους σε ADS και FR.



Σχήμα 1.7 Στρατηγικές κύκλων παραγωγής πυρηνικής ενέργειας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ.: Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία, Εκδόσεις Ζήτη, (2005)
- Τσάγκας Ν.Φ.: Πυρηνική Τεχνολογία, Εκδόσεις Αιβάζης, (1986)

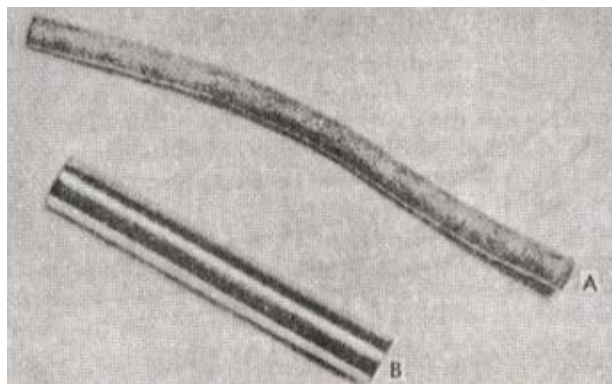
- Cochran R.G. and Tsoufanidis N.: The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, American Nuclear Society, Illinois, (1999)
- Cooper J.R., Randle K., Ranjeet S. Sokhi R.S.: Radioactive Releases in the Environment (Impact and Assessment), John Wiley & Sons, Ltd, England (2003)
- Glatz J.P., Babelot J.F., Nicolaou G., Koch L.: Theoretically and experimentally derived criteria for partitioning and transmutation of radionuclides in existing reactors, Proceedings 3rd International Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Cadarache, France, OECD/ NEA, (1994)
- Gokhale P.A., Deokattey S., Kumar V: Accelerator driven systems (ADS) for energy production and waste transmutation: International trends in R&D, Progress in Nuclear Energy, Volume 48, p. 91, (2006)
- Knief R.A., Nuclear Engineering, Taylor and Francis, Washington DC, (1992)
- Koch, L.: Minor actinide transmutation – a waste management option. J. of Less-Com. Met. 122, p. 371, (1986)
- Koch L., Glatz J.P., Nicolaou G.: Demonstration of a closed P & T cycle, Proceedings GLOBAL '97 International Conference on Future Nuclear Fuel Cycle Systems, OECD/NEA CEC IAEA, Yokohama, Japan, (1997)
- Koch, L., Glatz, J.P., Nicolaou, G.: Demonstration of a closed P&T cycle. Proc. Global 1997 Int. Conf. Future Nuclear Systems, Yokohama, Japan, (1997)
- Nicolaou G., Glatz J.P., Wellum R., Koch L.: Experimental nuclear data in relation to irradiation experiments of minor actinide targets in fast reactors, Proceedings GLOBAL '95 International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems, OECD/NEA CEC IAEA, Versailles, France, p. 1655-1662, (1995)
- Nicolaou G.: Radiation dose aspects in the handling of emerging nuclear fuels. Radiation Protection Dosimetry 162 (2014) p. 459-462.
- Nishihara, K., Nakayama, S., Morita, Y., Oigawa, H., Iwasaki, T.: Impact of partitioning and transmutation on LWR high-level waste disposal. J. Nucl. Sci. Techn. 45, p. 84, (2008)
- OECD/NEA Expert Group, Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles: A Comparative Study, OECD Publications Paris (France), (2002)
- Salvatores, M.: Transmutation: Issues, innovative options and perspectives. Progr. Nucl. Ener. 40, p. 375, (2002)
- UNSCEAR, 2000a: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume I: Sources, New York (2000)
- Walker C.T., Nicolaou G.: Transmutation of Np and Am in a fast neutron flux: EPMA results and KORIGEN predictions for the SUPERFACT fuels, Journal of Nuclear Materials, 218, p. 129, (1995)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

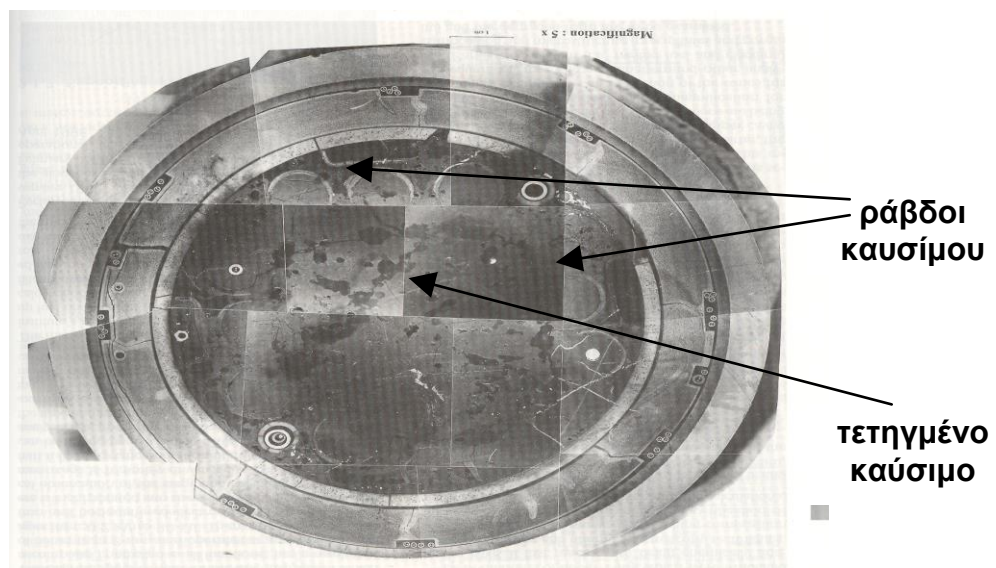
ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

2.1 Σχεδιαστικές αρχές αντιδραστήρων

Οι αρχές σχεδιασμού ενός αντιδραστήρα είναι απαραίτητες για την ασφαλή λειτουργία του [ΙΑΕΑ, 2005]. Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα χρειάζεται να επανεξεταστεί και, αν είναι απαραίτητο, να τροποποιηθεί στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα μια σημαντική αλλαγή κατά τη διάρκεια της ζωής του, όπως για παράδειγμα αλλαγή καυσίμου ουρανίου σε μίγμα ουρανίου/πλουτωνίου και αύξηση στην εξάντληση του ακτινοβολημένου καυσίμου. Η αναγκαιότητα απαγωγής της θερμότητας που αναπτύσσεται στα πυρηνικά καύσιμα, έγκειται αφενός στην παραγωγή ενέργειας αφετέρου στην αποφυγή συσσώρευσης θερμότητας στο καύσιμο. Στη δεύτερη περίπτωση, η ράβδος καυσίμου (Σχήμα 2.1) μπορεί να παραμορφωθεί ή να επέλθει τήξη ολόκληρης της συστάδας καυσίμου (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1 Ράβδος καυσίμου: (A) με παραμόρφωση και (B) χωρίς παραμόρφωση



Σχήμα 2.2 Τετηγμένοι ράβδοι καυσίμου

2.1.1 Ράβδοι καυσίμου

Οι θεωρήσεις ισχύουν για καύσιμα τόσο ουράνιου όσο και μίγματος ουρανίου/πλουτωνίου:

Θερμικά αποτελέσματα

Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στη θερμική αγωγιμότητα των δισκίων των καυσίμων και του κενού μεταξύ αυτών και του περιβλήματος λόγω αύξησης της πυκνότητας των οξειδίων, της διαστολής, της συστώρευσης προϊόντων σχάσης και των αλλαγών στη μικροδομή των δισκίων. Σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του αντιδραστήρα η μέγιστη θερμοκρασία καυσίμου πρέπει να είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του (2860 °C) και με επαρκή διαφορά ασφαλείας (~700 °C).

Στο σχεδιασμό του καυσίμου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στις μηχανικές του ιδιότητες, καθώς επίσης και μεταβολές λόγω διάβρωσης στο περίβλημα. Η συστολή/διαστολή του περιβλήματος μπορεί να προκληθεί από τη διαστολή ή θερμική επιμήκυνση της ράβδου καυσίμου λόγω μιας αύξησης στην τοπική ισχύ ή στην εσωτερική πίεση των αερίων προϊόντων της σχάσης. Η οποιαδήποτε παραμόρφωση μιας ράβδου καυσίμου δε θα πρέπει να επηρεάζει τη δυνατότητα εισαγωγής κάποιας γειτονικής της ράβδου ελέγχου για το ασφαλές κλείσιμο του αντιδραστήρα.

Η χημική αντίδραση καυσίμου και περιβλήματος, σε περίπτωση που λόγω διόγκωσης έρθουν σε επαφή, δημιουργεί ένα επίστρωμα στο εσωτερικό του περιβλήματος (interaction layer). Το επίστρωμα αυτό έχει σαν σύσταση U, Pu, Np, Am, O και προϊόντα σχάσης και μειώνει τη μεταφορά θερμότητας από το καύσιμο στο ψυκτικό μέσω του περιβλήματος.

Διάβρωση και υβρίδια

Η διάβρωση και τα υβρίδια εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιότητες του περιβλήματος ως υλικό, τη θερμοκρασία, την παρουσία οξειδίων και την πιθανή συστολή/διαστολή του. Κύρια χαρακτηριστικά του ψυκτικού υγρού όπως η καθαρότητα, η πίεση, η θερμοκρασία και η σύστασή του, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η οξείδωση ή άλλες χημικές μεταβολές οδηγούν στο σχηματισμό ενός στρώματος στην επιφάνεια του περιβλήματος και μπορούν να επηρεάσουν τη μεταφορά της θερμότητας από το καύσιμο.

Μηχανική ασφάλεια στο σχεδιασμό

Ο σχεδιασμός για τις συστάδες καυσίμου θα πρέπει να περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους:

- (α) Η απόσταση μεταξύ γειτονικών ράβδων καυσίμου αλλά και γειτονικών συστάδων θα πρέπει να είναι αρκετή για τη θερμοποίηση των ταχέων νετρονίων αλλά και για την απαιτούμενη ροή του ψυκτικού για βέλτιστη απαγωγή και μεταφορά θερμότητας.

- (β) Τα υλικά τους να είναι συμβατά με τις χημικές ιδιότητες του ψυκτικού.
- (γ) Η όποια παραμόρφωση μιας συστάδας δε θα πρέπει να επηρεάζει τη δυνατότητα εισαγωγής των ράβδων ελέγχου για το ασφαλές κλείσιμο του αντιδραστήρα.

2.1.2 Ψυκτικό

Το ψυκτικό του LWR θα πρέπει να διατηρήσει τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες σταθερές στις υψηλές θερμοκρασίες και την ακτινοβολία που αναπτύσσεται, ώστε να απάγει αποτελεσματικά τη θερμότητα από τα καύσιμα και να τη μεταφέρει εκτός του αντιδραστήρα για την παραγωγή ενέργειας. Έτσι:

- (α) Το ψυκτικό θα πρέπει να είναι καθαρό από ξένα σωματίδια ή θραύσματα.
- (β) Να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να ελαχιστοποιείται η διάβρωση και μόλυνση του συστήματος ψύξεως.
- (γ) Να υπάρχει επάρκεια ψυκτικού για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας καθώς και για την περίπτωση ατυχήματος.

Στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (PWR και BWR) διάφορα χημικά πρόσθετα, που εισάγονται στο ψυκτικό (π.χ. βορικό οξύ), χρησιμοποιούνται ως απορροφητές νετρονίων, εξασφαλίζοντας ένα δεύτερο σύστημα ελέγχου της αντιδραστικότητας. Άλλα πρόσθετα χρησιμοποιούνται στον έλεγχο του pH και της περιεκτικότητας σε οξυγόνο του ψυκτικού, για να περιορίζεται η διάβρωση του πυρήνα ή η μόλυνση του συστήματος ψύξης.

Τα χαρακτηριστικά για το βαρύ ύδωρ, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο στους αντιδραστήρες, είναι παρόμοιες με αυτές του ελαφρού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τα σωληνοειδή δοχεία πίεσεως το ψυκτικό και ο επιβραδυντής είναι χωριστά. Δε συνηθίζεται να προστίθενται άλλες ουσίες στο ψυκτικό για τον έλεγχο της αντιδραστικότητας. Στους αντιδραστήρες με βαρύ ύδωρ (HWR) παράγεται τρίτιο (^3H) σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται πρόβλεψη στα συστήματα ψύξης και επιβράδυνσης, ώστε να αποτρέπεται ή να ελέγχεται η διαρροή μολυσμένου με τρίτιο από τα κλειστά συστήματα κυκλοφορίας νερού.

2.1.3 Έλεγχος αντιδραστικότητας

Τα μέσα ελέγχου της αντιδραστικότητας (k) θα πρέπει να είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένα, ώστε να μπορούν να διατηρούν το επίπεδο της ισχύος μέσα σε ασφαλή όρια [Nicolau, 2010]. Αυτό σημαίνει αντιστάθμιση των μεταβολών του k που προκαλούνται από αλλαγές στη θερμοκρασία, στη ροή του ψυκτικού ή την εξάντληση του καυσίμου.

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του k στους διάφορους τύπους των αντιδραστήρων είναι:

- (α) χρήση στερεών ράβδων ελέγχου απορρόφησης νετρονίων (PWR, BWR, HWR),

- (β) χρήση διαλυτού απορροφητή νετρονίων στον επιβραδυντή ή το ψυκτικό (PWR, HWR),
- (γ) έλεγχος της ροής ψυκτικού (BWR),
- (δ) χρήση δηλητηριωδών νουκλιδίων (π.χ. Gd) στο καύσιμο,
- (ε) έλεγχος της θερμοκρασίας του επιβραδυντή (HWR),
- (στ) χρήση διαλυτού απορροφητή στα σωληνοειδή δοχεία πίεσης (PHWR).

2.1.4 Συστήματα διακοπής λειτουργίας

Τα μέσα διακοπής λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι απαραίτητο να αποτελούνται από δύο τουλάχιστον διαφορετικά συστήματα, καθένα από τα οποία θα πρέπει να είναι ικανό από μόνο του να καθιστά υποκρίσιμο τον αντιδραστήρα σε όλες τις περιπτώσεις. Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη διακοπή της λειτουργίας (κρισιμότητας) του αντιδραστήρα είναι:

- (α) εισαγωγή βορίου (B) ή γαδολινίου (Gd) στον επιβραδυντή,
- (β) εισαγωγή B, Ag-In-Cd ή χαφνίου (Hf) σε ράβδους ελέγχου από ατσάλι,
- (γ) εισαγωγή καδμίου (Cd) μεταξύ ατσάλινων σωληνώσεων,
- (δ) εισαγωγή υγρού απορροφητή στις σωληνώσεις.

Η αποτελεσματικότητα των προαναφερθέντων απορροφητικών υλικών διαφέρει ανάλογα με τη σύνθεση του καυσίμου (MOX ή U).

Η αξία των ράβδων ελέγχου και διακοπής της λειτουργίας καθορίζεται από τους εξής παράγοντες: το μέγεθος του πυρήνα, τον τύπο του καυσίμου, τα όρια υποκρισιμότητας και την αβεβαιότητα όσον αφορά τους υπολογισμούς

2.1.5 Η δομή της καρδιάς του αντιδραστήρα

Τοιχώματα δοχείου πίεσεως

Οι συστάδες καυσίμου και τα άλλα συστατικά του πυρήνα χρειάζεται να είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένα ώστε να διασφαλίζεται ότι θα υπάρχει χαμηλή ροή νετρονίων στο τοίχωμα του δοχείου πίεσεως (π.χ. το τοίχωμα του δοχείου του αντιδραστήρα).

Κατασκευές υποστήριξης

Τέτοιες κατασκευές είναι οι σωληνώσεις και διάφορες μεταλλικές κατασκευές ανάλογα με τον τύπο του αντιδραστήρα. Μηχανικές καταπονήσεις και σεισμικά φορτία θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Κατασκευές υποστήριξης καυσίμου

Ο ρόλος τους είναι να συγκρατούν τις συστάδες των καυσίμων στην επιθυμητή θέση για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας ή σε περιπτώσεις ατυχήματος.

Κατασκευές οδηγών των διατάξεων ελέγχου και διακοπής

Θα πρέπει να εξασφαλίζουν την εύκολη και ελεύθερη είσοδο των ράβδων ελέγχου στον πυρήνα σε κάθε περίπτωση.

Κατασκευές υποστήριξης οργάνων μέτρησης εντός του πυρήνα

Αυτές οι κατασκευές απαιτείται να είναι σταθερές και να συντελούν στην απρόσκοπτη λειτουργία των οργάνων μέτρησης. Θα πρέπει, επίσης, κατά το σχεδιασμό να υπάρχει πρόβλεψη για εύκολη αντικατάσταση των οργάνων.

2.1.6 Διαχείριση πυρήνα

Σκοπός είναι η εκπλήρωση των απαιτήσεων ασφάλειας και, ταυτόχρονα, η παραγωγή ενέργειας από το καύσιμο με τον πιο οικονομικό τρόπο. Για κανονικές καταστάσεις λειτουργίας ο στόχος είναι να μην εμφανιστούν προβλήματα στο περίβλημα του καυσίμου. Κάτι τέτοιο είναι σχεδόν αδύνατο. Κάποια προβλήματα εμφανίζονται και μέχρι ενός σημείου θεωρούνται αποδεκτά μιας και η συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού στο σύστημα ψύξεως μπορεί να μειωθεί αρκετά μέσω λειτουργιών καθαρισμού.

Για την επίτευξη του επιθυμητού k το πρόγραμμα διαχείρισης του πυρήνα θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες για: -τη διάταξη των συστάδων καυσίμου σε κάθε κύκλο, -χρονοδιάγραμμα για την εισαγωγή και εξαγωγή των συστάδων καυσίμου, -τη διαμόρφωση των διατάξεων διακοπής και ελέγχου της αντιδραστικότητας, -τη σύσταση καυσίμων που πρόκειται να αναμιχθούν και -την προσθήκη ή απομάκρυνση των δηλητηριωδών νουκλιδίων για τον έλεγχο του k .

Στην περίπτωση ανεφοδιασμού εν λειτουργία (HWR), τα ασφαλή όρια λειτουργίας του συστήματος ψύξεως θα πρέπει να διατηρούνται. Επίσης, πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι μεταβολές στη νετρονική συμπεριφορά του πυρήνα λόγω του ανεφοδιασμού μπορούν να αντισταθμιστούν από τα συστήματα ελέγχου.

2.1.7 Συστήματα παρακολούθησης

Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει τα κατάλληλα όργανα, ώστε να παρακολουθούνται παράμετροι όπως η ισχύς, οι συνθήκες και οι φυσικές ιδιότητες του ψυκτικού και του επιβραδυντή καθώς και η αποτελεσματικότητα των μέσων διακοπής λειτουργίας, η ροή νετρονίων, η θερμοκρασία ψυκτικού, η ροή του ψυκτικού, η στάθμη του νερού, η πίεση του συστήματος, η ραδιενέργεια στο ψυκτικό και η θέση εισαγωγής των ράβδων ελέγχου.

2.1.8 Ανάλυση ασφαλείας

Μια μελέτη/ανάλυση ασφαλείας θα πρέπει να περιλαμβάνει σενάρια σφαλμάτων, που προέρχονται είτε από αποτυχία του εξοπλισμού είτε από λάθη χειρισμού είτε από φυσικές καταστροφές. Οι κυριότεροι παράγοντες που χρειάζεται να εκτιμηθούν και να ληφθούν υπόψη είναι:

- Η κατάσταση λειτουργίας (υποκρίσιμη, μερικό ή πλήρες φορτίο).
- Ο συντελεστής αντιδραστικότητας θερμοκρασίας καυσίμου.
- Οι συντελεστές αντιδραστικότητας θερμοκρασίας ψυκτικού και επιβραδυντή.

- Ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του απορροφητή στον επιβραδυντή και το ψυκτικό.
- Η ικανότητα εισαγωγής θετικής ή αρνητικής αντιδραστικότητας από τις διατάξεις ελέγχου.
- Οι δυνατότητες του εξοπλισμού ασφαλείας στην περίπτωση εναλλαγών μεταξύ διάφορων καταστάσεων λειτουργίας.
- Η μεταστοιχείωση του Xe και άλλων απορροφητών νετρονίων.

2.2 Συστήματα ψύξης αντιδραστήρων

2.2.1 Αντιδραστήρας PWR

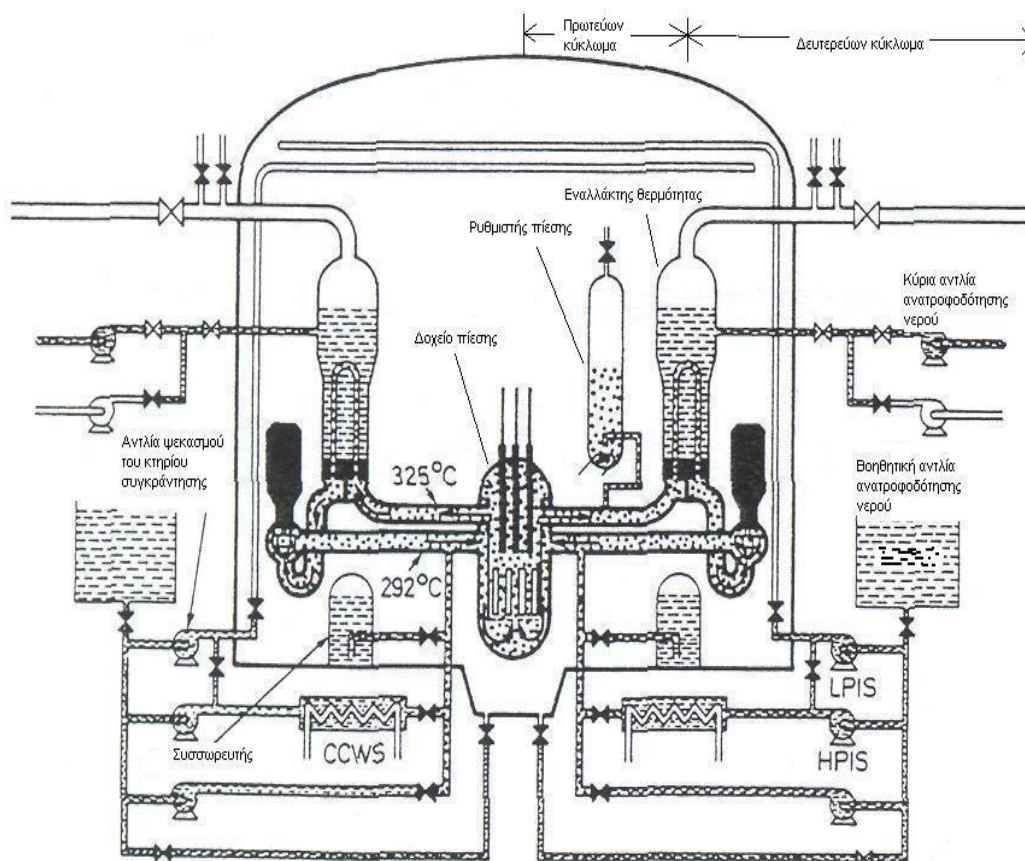
Σχηματικά ο PWR παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3 [Hewitt and Collier, 2000]. Η καρδιά του αντιδραστήρα είναι μέσα σε ένα δοχείο πίεσης, στο οποίο εισέρχεται το ψυκτικό σε θερμοκρασία 292 °C. Το νερό απορροφά τη θερμότητα, που παράγεται στα καύσιμα και εξέρχεται του δοχείου σε θερμοκρασία 325 °C. Ο κύκλος ψύξης ονομάζεται πρωτεύον σύστημα και διατηρείται υπό πίεση 15.5 MPa, που δεν επιτρέπει στο νερό να βράσει. Στη γεννήτρια ατμού η θερμότητα του νερού μεταφέρεται μέσω των τοιχωμάτων των σωληνώσεων του πρωτεύοντος συστήματος σε νερό, που ρέει στο δευτερεύον σύστημα. Αυτό το σύστημα διατηρείται σε χαμηλή πίεση, ώστε να επιτραπεί ο βρασμός του νερού. Ο ατμός που παράγεται στη γεννήτρια ατμού χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας. Ο ατμός, αφού περάσει από το στρόβιλο, υγροποιείται από έναν συμπυκνωτή και με τη βοήθεια αντλίας επιστρέφει πίσω στη γεννήτρια ατμού, για να παραχθεί και πάλι ατμός.

Πέραν του προαναφερθέντος συστήματος ψύξης κατά την κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα, υπάρχει το σύστημα ψύξης του πυρήνα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (ECCS, Emergency Core Cooling System) με έγχυση παγωμένου νερού στο πρωτεύον κύκλωμα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από:

1. *Τους συσσωρευτές [accumulators].* Αυτοί είναι μεγάλα δοχεία με νερό που συμπιέζονται με αέριο αζώτου. Συνδέονται με το πρωτεύον κύκλωμα μέσω αυτόματων βαλβίδων, οι οποίες ανοίγουν εάν η πίεση του αρχικού κυκλώματος μειωθεί κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο (χαρακτηριστικά 4 MPa).
2. *Το σύστημα εισαγωγής νερού με υψηλή πίεση [HPIS, High-Pressure Injection System].* Αυτό επιτρέπει την έγχυση νερού μέσα στο σύστημα με πίεση περίπου 10 MPa σε χαμηλή ροή.
3. *Το σύστημα εισαγωγής νερού με χαμηλή πίεση [LPIS, Low-Pressure Injection System].* Αυτό επιτρέπει την έγχυση νερού μέσα στον αντιδραστήρα σε ένα υψηλό ποσοστό ροής υπό τον όρο, ότι ο αντιδραστήρας είναι σε μία αρκετά χαμηλή πίεση (χαρακτηριστικά κάτω από 3 MPa).

Ο συνδυασμός των συστημάτων ψύξης έκτακτης ανάγκης επιτρέπει την αντιμετώπιση ατυχημάτων απώλειας της πίεσης και του ψυκτικού των

αντιδραστήρων. Εάν το νερό διαφύγει από το πρωτεύον κύκλωμα, συλλέγεται σε ένα φρεάτιο στο κατώτατο σημείο του δοχείου συγκράτησης και μπορεί να ανακυκλωθεί από εκεί μέσω των αντλιών του συστήματος ψύξης έκτακτης ανάγκης πίσω στο πρωτεύον κύκλωμα. Στο σύστημα LPIS η ροή διοχετεύεται στον αντιδραστήρα μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, όπου ψύχεται από το σύστημα ψύξης νερού [CCWS, Component Cooling Water System]. Αυτό επιτρέπει μια μακροπρόθεσμη αφαίρεση θερμότητας, λόγω ραδιενεργού διάσπασης στα καύσιμα, από τον αντιδραστήρα σε περίπτωση ατυχήματος απώλειας ψυκτικού. Το σύστημα LPIS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ψεκασμό νερού στο κτήριο συγκράτησης. Επιτυγχάνεται, λοιπόν, συμπύκνωση ατμού, που υπάρχει εκεί, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την πίεση στο κτήριο συγκράτησης σε περίπτωση ατυχήματος.



Σχήμα 2.3 Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα PWR

Η σταδιακή μείωση της λειτουργίας των αντιδραστήρων είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής λόγω βαρύτητας των ράβδων ελέγχου, που είναι επάνω από τον πυρήνα. Το προστατευτικό σύστημα πυρήνων σχεδιάζεται για να ενεργοποιήσει τη σταδιακή μείωση, όταν υπερβαίνονται τα όρια λειτουργίας. Οι πρόσθετοι αισθητήρες και ο σχεδιασμός επιστροφής των συστημάτων σε ασφαλή κατάσταση σε περίπτωση βλάβης προσθέτουν την αξιοπιστία στο σύστημα.

Η παύση λειτουργίας του PWR απαιτεί την πλήρη εισαγωγή των ράβδων ελέγχου πέραν της παρουσίας της ευδιάλυτης συγκέντρωσης βορίου, που υπάρχει κατά τη λειτουργία. Η μείωση του ύψους του ψυκτικού λόγω ενός ‘ατυχήματος απώλειας ψυκτικού’ (LOCA, ‘Loss of Coolant Accident’) έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση λειτουργίας του αντιδραστήρα λόγω απώλειας του επιβραδυντή. Η αποτελεσματικότητα των ράβδων ελέγχου να μειώσουν την αντιδραστικότητα δεν είναι επαρκής από μόνη της για να εξασφαλίσει τη συνεχόμενη υποκρισιμότητα, καθώς η καρδιά πλημμυρίζει πάλι με ψυκτικό. Κατά συνέπεια, νερό αναμιγμένο με βορικό οξύ χρησιμοποιείται για τη ψύξη έκτακτης ανάγκης. Είναι συνηθισμένη πρακτική να χορηγείται μια ευδιάλυτη συγκέντρωση βορίου, η οποία είναι ικανοποιητική από μόνη της για το πλήρες κλείσιμο του αντιδραστήρα.

2.2.2 Αντιδραστήρας BWR

Οι αντιδραστήρες BWR είναι άμεσου κύκλου. Το ψυκτικό νερό σε θερμοκρασία 285 °C, υπό πίεση μόνο 7 MPa, βράζει και ο ατμός παράγεται στον ίδιο τον πυρήνα του αντιδραστήρα (Σχήμα 2.4) [Hewitt and Collier, 2000].

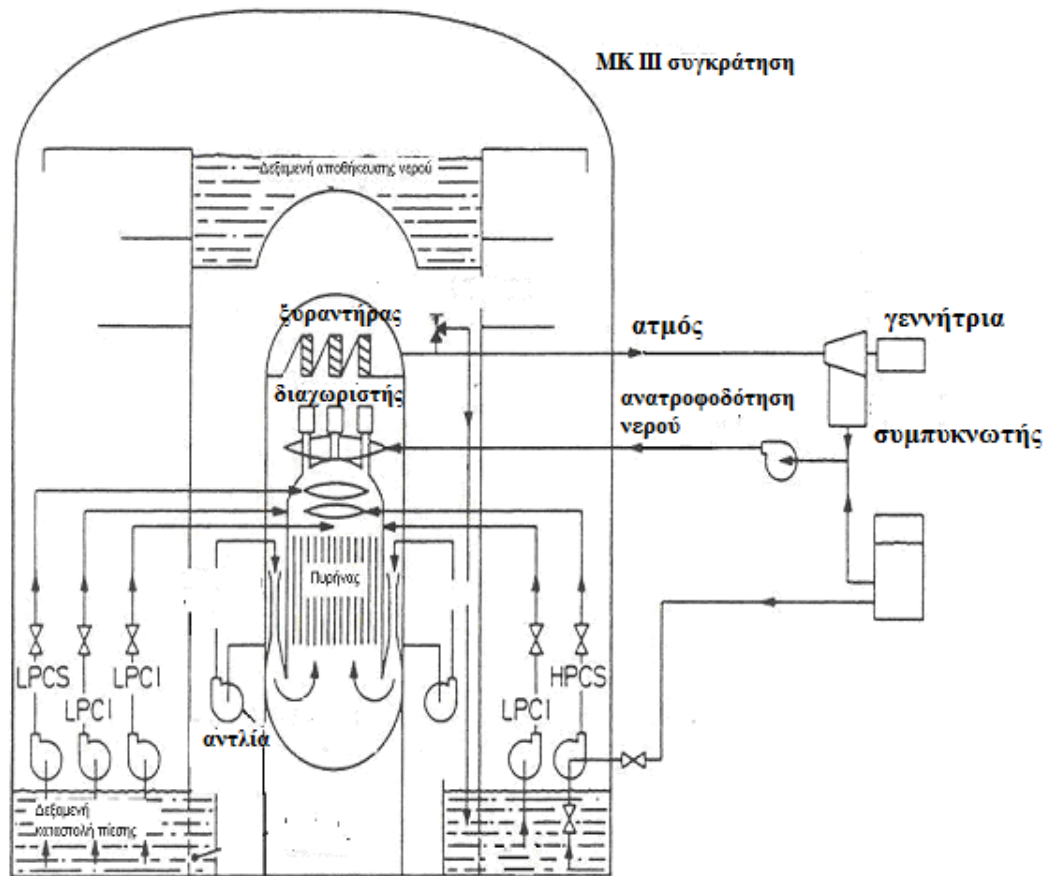
Ένα χαρακτηριστικό σύστημα έκτακτης ψύξης για τον BWR παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Αποτελείται από τέσσερα ξεχωριστά συστήματα: -το σύστημα υψηλής πίεσεως ψεκασμού του πυρήνα [HPCS, High Pressure Core Spray], -το αυτόματο σύστημα ελάττωσης της πίεσεως [ADS, Automatic Depressurisation System], -το σύστημα χαμηλής πίεσεως ψεκασμού του πυρήνα [LPCS, Low Pressure Core Spray] και -το σύστημα εισαγωγής ψυκτικού χαμηλής πίεσης μέσου [LPCI, Low Pressure Coolant Injection].

Το σύστημα HPCS αντλεί νερό από τη δεξαμενή αποθήκευσης του συμπυκνωτή ή/και από τη δεξαμενή καταστολής πίεσης (Σχήμα 2.4). Το νερό διοχετεύεται στον πυρήνα και τις συστάδες καυσίμου. Αυτό το σύστημα ενεργοποιείται, όταν η στάθμη του νερού στον αντιδραστήρα πέφτει κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο ή όταν η πίεση στο δοχείο συγκράτησης φθάνει σε μια υψηλή τιμή.

Εάν το σύστημα HPCS δεν μπορεί να διατηρήσει τη στάθμη του νερού ή αποτυγχάνει να λειτουργήσει, τότε η πίεση του αντιδραστήρα μειώνεται αυτόματα από τη λειτουργία του συστήματος ADS, το οποίο αποβάλλει το ρευστό από το δοχείο στη δεξαμενή καταστολής πίεσης. Η ελάττωση της πίεσης επιτρέπει στα συστήματα LPCI και LPCS να τεθούν σε λειτουργία και να παρέχουν ικανοποιητική ψύξη. Το σύστημα LPCI χρησιμοποιείται για την υπόλοιπη αφαίρεση της θερμότητας σε μακροπρόθεσμη βάση.

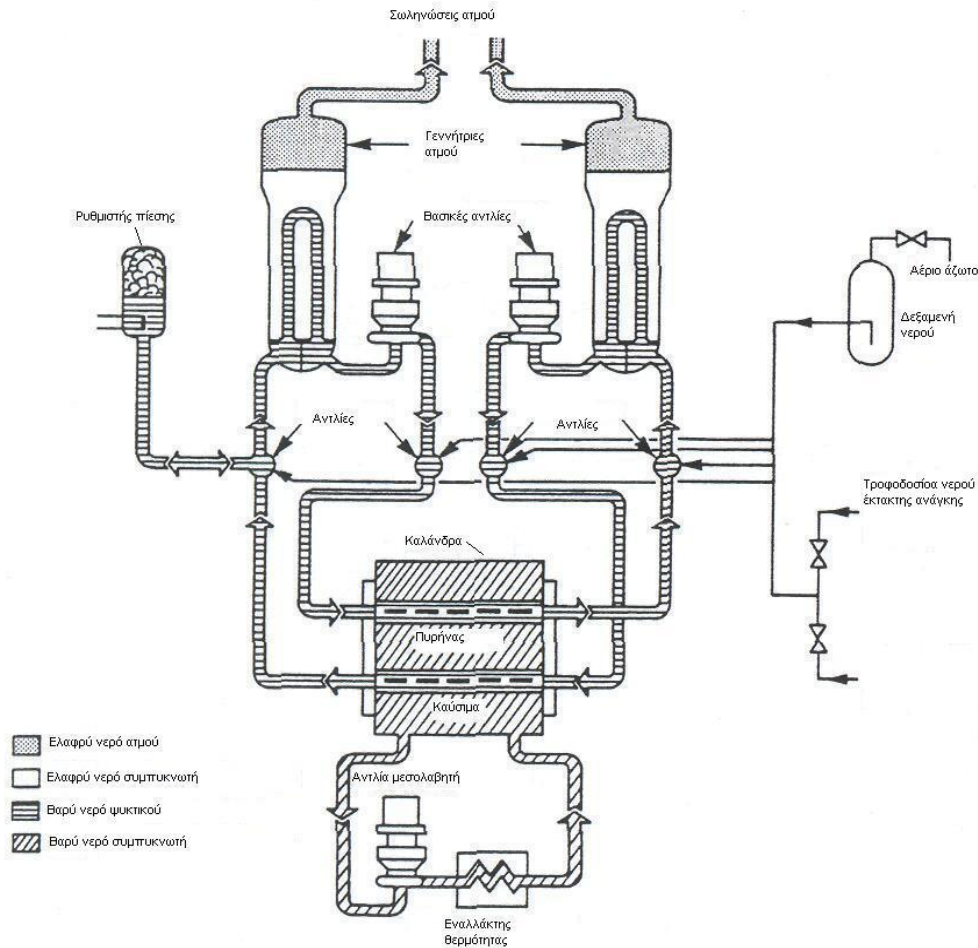
2.2.3 Αντιδραστήρας CANDU

Στον αντιδραστήρα CANDU το ψυκτικό μέσο διανέμεται και συλλέγεται από τον πυρήνα με τη βοήθεια αντλιών, που συνδέονται εναλλακτικά με κάθε ένα από τα κανάλια καυσίμου. Το κύκλωμα για τον αντιδραστήρα CANDU παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.5 (Hewitt and Collier, 2000).



Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάγραμμα ενός BWR

Σε περίπτωση απώλειας ψυκτικού, τότε ψυκτικό εκχέεται σε όλες τις αντλίες από ένα ξεχωριστό σύστημα εγχύσεων ψυκτικού μέσου έκτακτης ανάγκης [ECI, Emergency Coolant Injection]. Αυτό το σύστημα παρέχει ελαφρύ νερό στον αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια του ατυχήματος (Σχήμα 2.5). Το σύστημα έχει ένα στάδιο εγχύσεων υψηλής πίεσης, που δημιουργείται από συμπιεσμένο αέριο. Όταν η παροχή υψηλής πίεσης εξαντλείται, το νερό αντλείται σε χαμηλότερη πίεση από μια ξεχωριστή δεξαμενή νερού και τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα. Τέλος, το νερό, που εκβάλλεται από το κύκλωμα του αντιδραστήρα στο κτήριο συγκράτησης, ανακτάται και αντλείται πίσω στους συλλέκτες εξόδου μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που ψύχει το εισερχόμενο ρεύμα νερού.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα του συστήματος μεταφοράς θερμότητας στον αντιδραστήρα CANDU

2.3 Φράγματα εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων

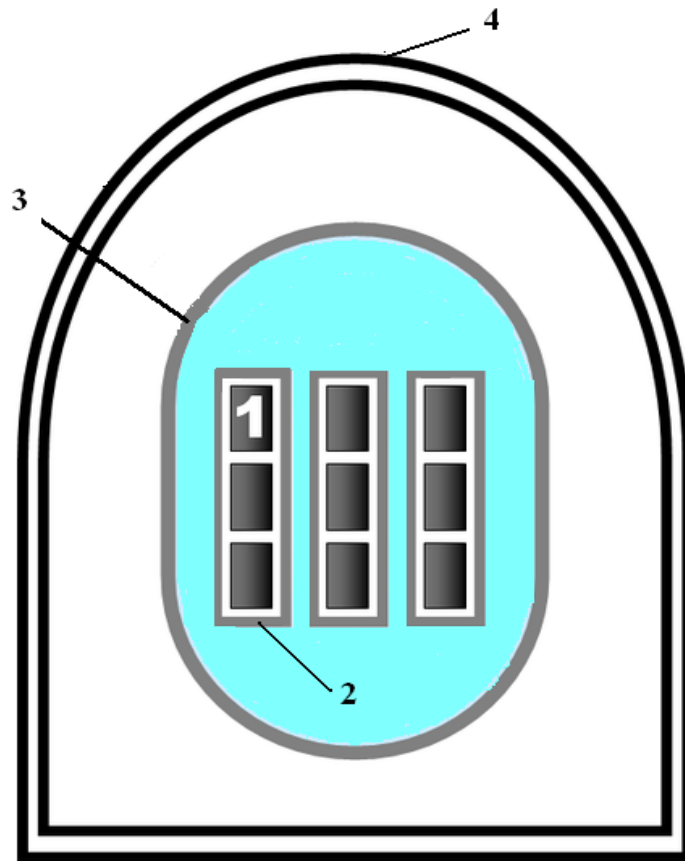
Ο σχεδιασμός ενός πυρηνικού αντιδραστήρα αποβλέπει στην παρουσία διαδοχικών φραγμάτων εγκλωβισμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση πιθανής διαφυγής των ραδιενεργών νουκλιδίων του καυσίμου στο περιβάλλον σε περίπτωση ατυχήματος. Τέσσερα επίπεδα φραγμού έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό (Σχήμα 2.6) [Knief, 1992].

Ως στερεό κεραμικό, το ίδιο το καύσιμο αποτελεί το πρώτο φράγμα. Εγκλωβίζει τα στερεά προϊόντα της σχάσης, όχι όμως και τα αέρια (νουκλίδια κρυπτού, ξένου και ιωδίου), που διαφεύγουν του φραγμού.

Τα αέρια προϊόντα της σχάσης, που διαφεύγουν του καυσίμου, εγκλωβίζονται από το δεύτερο φράγμα, που είναι το μεταλλικό περίβλημα της ράβδου καυσίμου.

Στην περίπτωση διαφυγής των αερίων νουκλιδίων από τη ράβδο καυσίμου, εγκλωβίζονται στο δοχείο πίεσης και στο κύκλωμα του ψυκτικού, που αποτελεί το τρίτο φράγμα.

Το τέταρτο φράγμα εγκλωβισμού είναι το κτήριο συγκράτησης, κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα.



- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| 1. Πυρηνικό καύσιμο | 3. Δοχείο πίεσης |
| 2. Περίβλημα ράβδου καυσίμου | 4. Κτήριο συγκράτησης |

Σχήμα 2.6 Τα τέσσερα φράγματα εγκλωβισμού

2.4 Άμυνα - σε - βάθος (Defense - in - Depth)

Ο βασικός στόχος της ασφάλειας των αντιδραστήρων είναι να διατηρηθεί η ακεραιότητα των πολλαπλών φραγμών στην απελευθέρωση των προϊόντων σχάσης στο περιβάλλον. Αυτός ο στόχος διέπεται από μια προσέγγιση τριών επιπέδων, που ονομάζεται άμυνα-σε-βάθος.

Το πρώτο επίπεδο ασφάλειας, η πρόληψη, επιδιώκει την αποφυγή (prevention) περιστατικών που θα οδηγήσουν σε βλάβη των συστημάτων, στη μείωση της συμπεριφοράς των καυσίμων, στην απελευθέρωση της ραδιενέργειας ή σε γεγονότα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ατυχήματα. Απαιτείται, λοιπόν, υψηλή αξιοπιστία στα υλικά, στα συστήματα και τις λειτουργούσες πρακτικές. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν τα περιθώρια ασφάλειας, τη δοκιμή και την επιθεώρηση, την οργάνωση του εξοπλισμού και τον αυτόματο έλεγχο, την αξιολόγηση της ασφάλειας, την ανάλυση των ελλείψεων και των διορθώσεων, την εκπαίδευση και την εξασφάλιση ποιότητας.

Παρά την προτεραιότητα, που δίνεται στην πρόληψη, πρέπει να αναγνωριστεί και να γίνει αποδεκτό ότι αστοχίες διαφόρων συνιστωσών και κάποια λάθη λειτουργίας είναι αναπόφευκτα κατά τη διάρκεια της ζωής ενός

πυρηνικού αντιδραστήρα. Επομένως, το σχέδιο είναι αναγκαίο να παρέχει ένα δεύτερο επίπεδο φραγμού, το οποίο ονομάζεται προστασία (protection), για να σταματήσει έγκαιρα χαμηλής πιθανότητας γεγονότα, που μπορούν να οδηγήσουν σε μικρές απελευθερώσεις ραδιενέργειας. Όλες οι εύλογα κατανοητές αποτυχίες, τίθενται ως αίτημα και αναλύονται, ώστε τα αξιόπιστα προστατευτικά μέτρα να μπορούν να σχεδιαστούν με σκοπό να σταματήσουν ή να αντιμετωπίσουν επιτυχώς τέτοια γεγονότα. Μερικά προστατευτικά μέτρα δρουν πολύ γρήγορα στο κλείσιμο των αντιδραστήρων, στην εκτόνωση της πίεσης, στην αυτόματη παρακολούθηση και στην έναρξη των συστημάτων ασφαλείας, στη μέτρηση και τον έλεγχο των επιπέδων ακτινοβολίας, των δόσεων και της ραδιενέργειας των καταλοίπων.

Το τρίτο επίπεδο φραγμού ονομάζεται μετριασμός (mitigation) και είναι σχεδιασμένο να περιορίζει τις συνέπειες των ατυχημάτων στο περιβάλλον, εάν αυτές εμφανίζονται παρά την παρουσία των προληπτικών και προστατευτικών μέτρων. Τα, ενδεχομένως, σοβαρά ατυχήματα λόγω ζημιάς του πυρήνα αξιολογούνται, για να καθιερώσουν κριτήρια απόδοσης για την προσθήκη ή την επέκταση πέρα από το επίπεδο προστασίας, της αποτελεσματικότητας των μηχανικών συστημάτων ασφαλείας. Τα μέτρα για το μετριασμό των ατυχημάτων περιλαμβάνουν: συστήματα έκτακτης ανάγκης που παρέχουν ανατροφοδότηση νερού, ψυκτικά μέσα στον πυρήνα, ηλεκτρική ενέργεια, κατασκευές συγκράτησης ραδιενεργών ουσιών και προγραμματισμό έκτακτης ανάγκης.

Ενώ η ανωτέρω περιγραφή της προσέγγισης άμυνα-σε-βάθος έχει μια ισχυρή έμφαση τεχνολογίας, η πυρηνική ασφάλεια εξαρτάται επίσης από άλλους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η διεθνής ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών με την κατάλληλη ανατροφοδότηση στη διαδικασία σχεδιασμού (όπως τονίστηκε δραματικά από τα ατυχήματα στους αντιδραστήρες Three Mile Island TMI-2 και Chernobyl-4).

2.5 Θάλαμος ελέγχου της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα

Ο θάλαμος ελέγχου (control room) ενός πυρηνικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο χώρος, όπου ελέγχεται πλήρως η εκκίνηση και η λειτουργία του σταθμού (Σχήμα 2.7).

Ο θάλαμος ελέγχου περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τους πίνακες ελέγχου (control panels) με όλα τα συστήματα του αντιδραστήρα και τις ενδείξεις ελέγχου. Τα συστήματα ελέγχου είναι ομαδοποιημένα με ηχητική προειδοποίηση (alarm panels). Ο κεντρικός υπολογιστής του θαλάμου δίνει προειδοποιητικές ενδείξεις στο χειριστή σχετικά με την ύπαρξη προβλημάτων. Οι πίνακες ελέγχου χωρίζονται στο:

- τμήμα δευτερεύοντος κύκλου - κυκλοφορία νερού, τροφοδοσία νερού λειτουργία συμπυκνωτή, τουρμπίνας και γεννήτριας,
- τμήμα του αντιδραστήρα - πρωτεύον κύκλωμα ψύξης, συστήματα ελέγχου του αντιδραστήρα (καύσιμα, ράβδοι ελέγχου, ισχύς),
- τμήμα ψύξης έκτακτης ανάγκης του αντιδραστήρα.



Σχήμα 2.7 Θάλαμος ελέγχου αντιδραστήρα

Στους πυρηνικούς σταθμούς υπάρχει εξοπλισμός για δειγματοληψία και μέτρηση των επιπέδων ραδιενέργειας στα συστήματα αέρα και υγρών. Οι έξοδοι του εξοπλισμού αυτού οδηγούνται στους πίνακες ελέγχου του θαλάμου ελέγχου. Επιπλέον, με την εμφάνιση κάποιας δυσλειτουργίας υπάρχει αυτόματη ενεργοποίηση - απενεργοποίηση κάποιων συστημάτων. Ο πίνακας ελέγχου περιλαμβάνει:

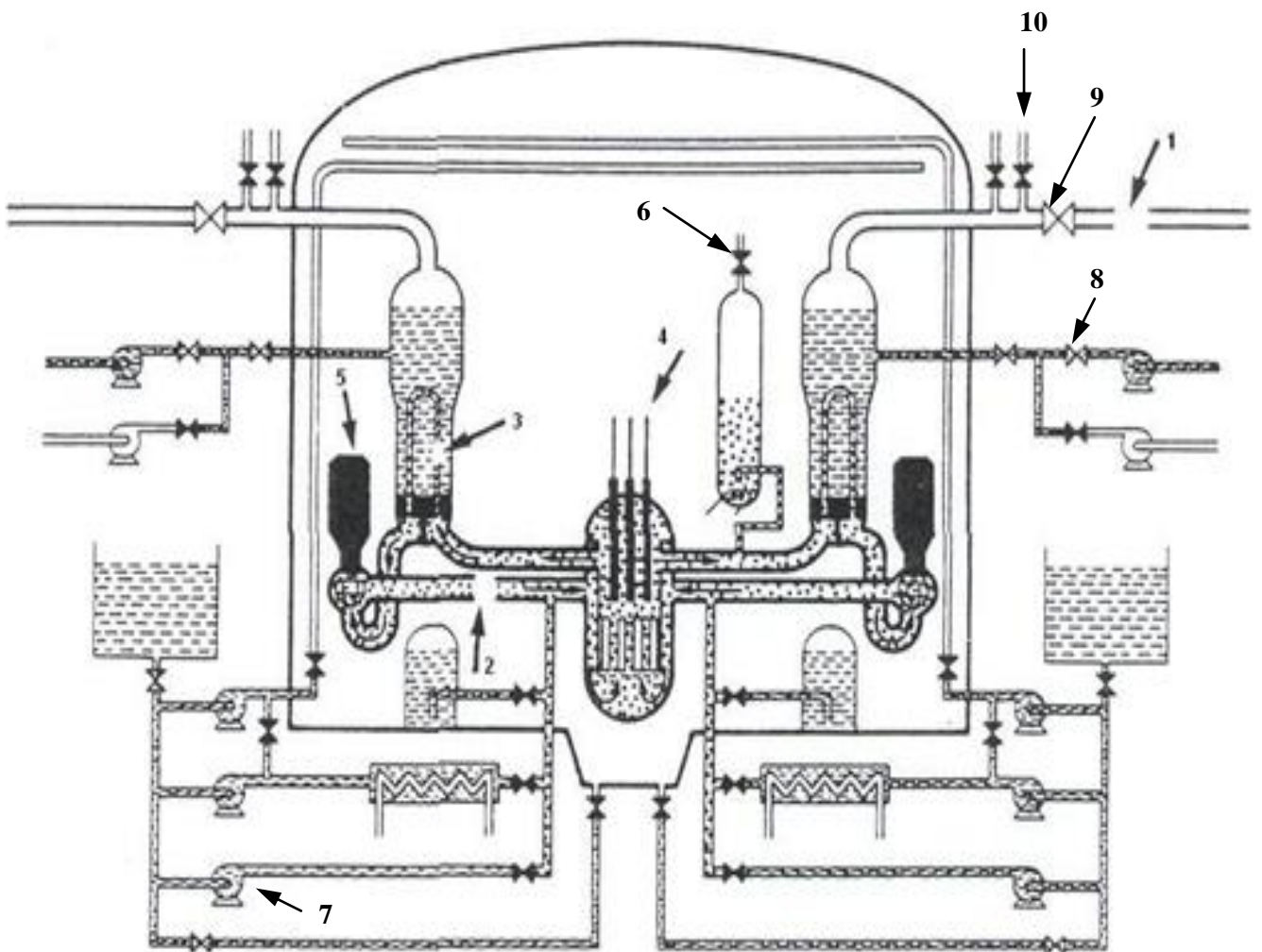
- ενδείξεις οργάνων πυρηνικού αντιδραστήρα (πίεσεως, θερμοκρασίας, στάθμης νερού κ.α.),
- σύστημα ελεγκτικών ράβδων ενεργού υλικού (έλεγχος επιλογής, εισαγωγής, εξαγωγής ράβδων),
- σύστημα ελέγχου ακολουθίας ράβδων ενεργού υλικού (επιλογή ράβδων και έλεγχος κίνησης),
- συστήματα παρακολούθησης νετρονίων (ενδείξεις ισχύος και περιόδου αντιδραστήρα),
- σύστημα προστασίας αντιδραστήρα (χειροκίνητο και αυτόματο σύστημα εγκατάλειψης αντιδραστήρα - reactor scram),
- σύστημα τροφοδοσίας νερού αντιδραστήρα (έλεγχος αντλιών τροφοδοσίας),
- σύστημα ελέγχου στάθμης νερού αντιδραστήρα (χειροκίνητο και αυτόματο σύστημα),
- σύστημα ανακυκλοφορίας νερού αντιδραστήρα (έλεγχος ταχύτητας αντλίας ανακυκλοφορίας),
- συστήματα τουρμπίνας γεννήτριας (δοκιμή μέγιστης απόδοσης, συγχρονισμός, υποστήριξη φορτίων),
- εμφάνιση και εκτύπωση λειτουργικών διαγραμμάτων ροής και ισχύος,
- εμφάνιση του πίνακα ελέγχου του συστήματος ECCS (έκτακτης ανάγκης σύστημα ψύξης πυρήνα).

2.6 Ατυχήματα σε αντιδραστήρες PWR

2.6.1 Αιτίες ατυχημάτων

Τα διάφορα σφάλματα και αναπάντεχα λειτουργικά συμβάντα ενός PWR που θα μπορούσαν να γίνουν αιτία ατυχημάτων, μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Σχήμα 2.8):

- *Οριακά* συμβάντα σε ένα σύστημα PWR: [1] ρήγμα στη γραμμή εξόδου του ατμού, [2] ρήγμα στο πρωτεύον κύκλωμα σωλήνων εισόδου του ψυκτικού, [3] ρήγμα σωλήνων γεννητριών ατμού, [4] εμπλοκή μηχανισμών των ράβδων ελέγχου και [5] εμπλοκή του στροφέα σε μια από τις κύριες αντλίες κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου. Από αυτά τα σφάλματα, ίσως, το σημαντικότερο και ευρύτερα εξεταζόμενο είναι το ρήγμα του πρωτεύοντος κυκλώματος σωλήνων εισόδου με αποτέλεσμα την απώλεια του ψυκτικού (LOCA, Loss of Coolant Accident) (το ατύχημα βάσης σχεδίου για τους PWR).



Σχήμα 2.8 Πιθανά αίτια ατυχημάτων σε αντιδραστήρα PWR

- *Αναπάντεχα συμβάντα* που οδηγούν σε αλλαγή του αποθέματος του ψυκτικού μέσου. Αυτά θα μπορούσαν να είναι: μια απώλεια ρευστού μέσω μιας βαλβίδας ανακούφισης [6] ή μέσω κάποιας άλλης γραμμής εφοδιασμού στον αντιδραστήρα [7]. Το απόθεμα του ψυκτικού μέσου μπορεί, επίσης, να αυξηθεί με την άντληση του νερού στο κύκλωμα μέσω της αντλίας εισαγωγής υψηλής πίεσης. Στην τελευταία περίπτωση ο ρυθμιστής πίεσης μπορεί να πλημμυρίσει συνολικά με νερό και ο έλεγχος πίεσης να χαθεί.
- *Αναπάντεχα συμβάντα* στο δευτερεύον κύκλωμα αφαίρεσης θερμότητας: [8] απώλεια παροχής ανεφοδιασμού νερού, [9] αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού ανεφοδιασμού, [10] κακοί χειρισμοί των ρυθμιστικών βαλβίδων πίεσης ή/και των βαλβίδων ασφαλείας.

Η "μελέτη της ασφάλειας των αντιδραστήρων" [WASH-1400, 1975] παρέχει τις επεξηγηματικές περιγραφές των σεναρίων τήξης του πυρήνα σε αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος. Η υπερθέρμανση των καυσίμων σε ένα αντιδραστήρα PWR, ως επακόλουθο ενός ατυχήματος LOCA, περιλαμβάνει:

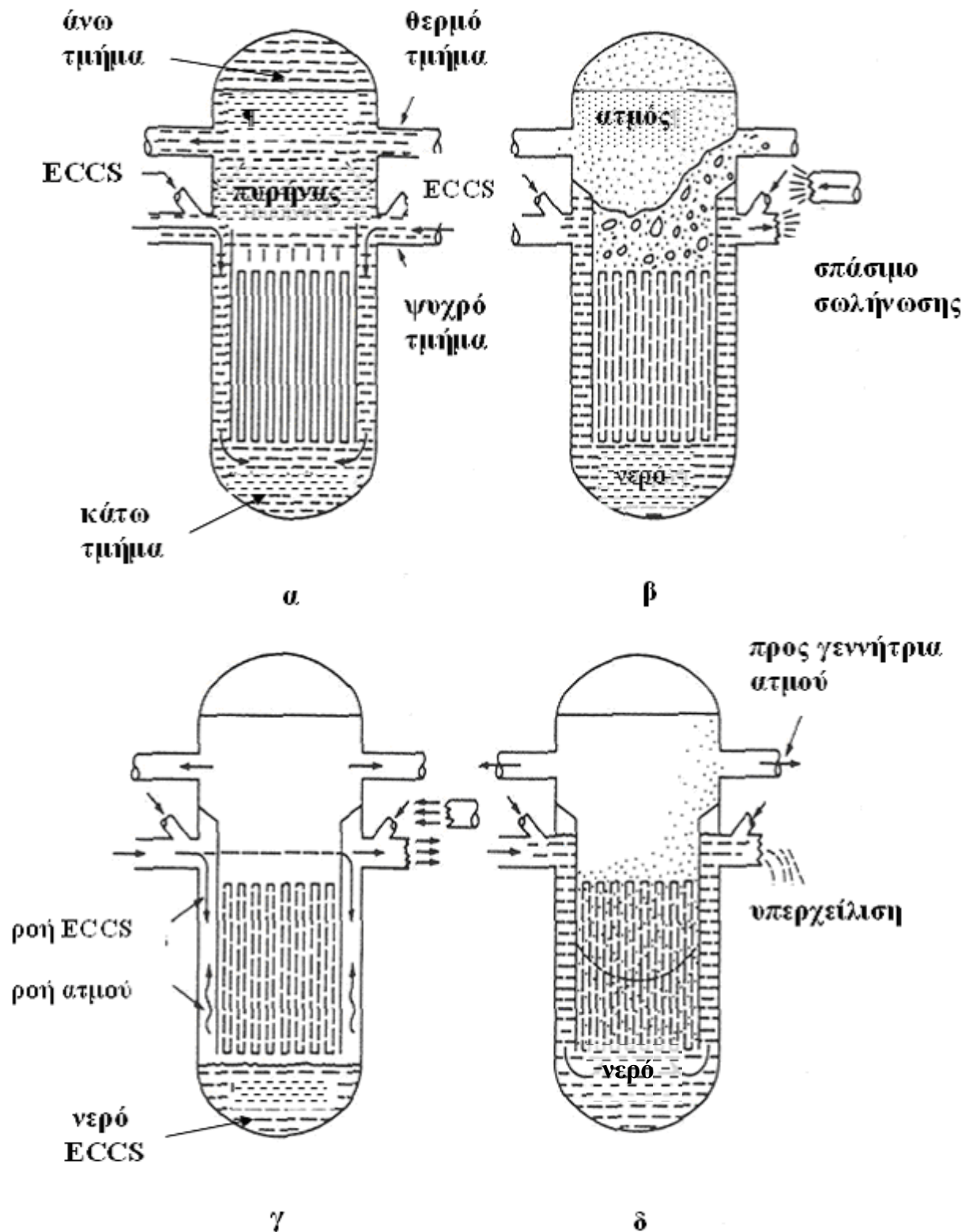
- απώλεια του μεγαλύτερου μέρους του ψυκτικού μέσου σε 10-11 δευτερόλεπτα,
- η απώλεια αυτή του ψυκτικού/επιβραδυντικού μέσου οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της αλυσωτής αντίδρασης,
- αντιδράσεις του ζirkονίου με το νερό, που παράγουν υδρογόνο και προσθέτουν ενέργεια στην ήδη συσσωρευμένη από τη ραδιενεργό διάσπαση θερμότητα,
- τήξη του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου, που ακολουθείται από την τήξη των καυσίμων,
- τήξη περίπου του 80% του πυρήνα πριν κινηθεί μαζικά προς το κατώτερο σημείο του δοχείου πίεσης,
- τήξη του δοχείου πίεσης μέσα σε περίπου 1 ώρα από τη στιγμή της επαφής του με το τετηγμένο καύσιμο,
- επαφή του τετηγμένου πυρήνα (με το ζirkόνιο, το σίδηρο και τα οξειδία τους) με τη βάση του κτηρίου συγκράτησης. Αυτό οδηγεί σε εξάτμιση του ελεύθερου νερού μέσα στο συμπαγές μείγμα με υψηλή διεισδυτικότητα και τήξη με έναν χαρακτηριστικό χρόνο περίπου 18 ωρών,
- παραγωγή ατμού και διοξειδίου του άνθρακα από την αλληλεπίδραση μεταξύ των καυσίμων και του σκυροδέματος της βάσης, που συνεισφέρουν στην αποτυχία της συγκράτησης λόγω υπερβολικής συμπίεσης πριν από την τήξη,
- παραγωγή υδρογόνου από αντιδράσεις μεταξύ του ζirkονίου με το νερό, που αναμένεται να καεί, παρά να εκραγεί, και να προσθέσει στην απειλή της υπερσυμπίεσης του συστήματος συγκράτησης.

2.6.2 Εξέλιξη ατυχήματος LOCA

Στο ατύχημα LOCA ένας από τους σωλήνες εισόδου του ψυκτικού στο δοχείο του αντιδραστήρα έχει σπάσει ολοκληρωτικά σε δύο άκρα και επιτρέπει την απώλεια του ψυκτικού μέσου και από τις δύο σπασμένες άκρες (Σχήμα 2.8, περίπτωση [2]). Αυτό το είδος σπασίματος καλείται ‘double-ended guillotine’ ή “200%” σπάσιμο. Επειδή αυτό το σπάσιμο θεωρείται συνήθως ότι αντιπροσωπεύει το χειρότερο ατύχημα, που θα μπορούσε να συμβεί στο κύκλωμα ψυκτικού του αντιδραστήρα, έχει επιλεγεί ως η βάση για το σχεδιασμό των συστημάτων έκτακτης ανάγκης.

Η ακολουθία των γεγονότων μετά από το σπάσιμο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9β, γ, δ και συγκρίνεται με την κανονική λειτουργία (Σχήμα 2.9α). Οι κύριες φάσεις είναι οι ακόλουθες:

1. *Φάση διαφυγής υπό πίεση.* Κατά την κανονική λειτουργία (Σχήμα 2.9α) το νερό ρέει μέσω των σωλήνων εισόδου (τα ψυχρά τμήματα) προς το δοχείο του αντιδραστήρα και εξέρχεται μέσω των σωλήνων εξόδου του δοχείου (θερμά τμήματα) προς τη γεννήτρια ατμού. Στην περίπτωση μεγάλου σπασίματος στα ψυχρά τμήματα το ψυκτικό διαφεύγει υπό πίεση μέσω του σπασίματος (Σχήμα 2.9β). Μετά από μια πολύ γρήγορη ελάττωση της πίεσεως, η πίεση πέφτει αργά λόγω της δημιουργίας ενός διφασικού μίγματος ατμού-νερού στο δοχείο και στο κύκλωμα. Η μαζική ροή ενός τέτοιου μίγματος μέσω ενός σπασίματος είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν για ένα μονοφασικό υγρό. Μετά την πάροδο περίπου 10 δευτερολέπτων, η πίεση πέφτει για την έναρξη της ροής ψυκτικού του συστήματος ECCS.
2. *Φάση παρακάμψης.* Μετά την έναρξη του συστήματος ECCS, υπάρχει ακόμα μια σημαντική ροή του ατμού στο τμήμα, μέσω του οποίου το παγωμένο νερό ρέει κανονικά. Αυτή η ροή ατμού αποτρέπει στο νερό των συσσωρευτών του συστήματος ECCS να εισέλθει στην περιοχή του δοχείου κάτω από τον πυρήνα και το νερό παρακάμπτει, απλά, το ανώτερο μέρος του δακτυλίου και εξέρχεται μέσω του σπασίματος (Σχήμα 2.9β).
3. *Φάση αναπλήρωσης.* Η αναπλήρωση με νερό του χώρου κάτω από τον πυρήνα (Σχήμα 2.9γ) αρχίζει μετά από την περαιτέρω ελάττωση της πίεσης. Η ροή του ατμού δεν μπορεί πλέον να περιορίσει την εισροή του νερού από το σύστημα ECCS. Σε αυτό το σημείο θα ενεργοποιηθεί το σύστημα LPIS. Στο PWR, η αναπλήρωση αρχίζει περίπου σε 23 δευτερόλεπτα μετά από το αρχικό σπάσιμο και απαιτεί 17 δευτερόλεπτα για να γεμίσει το χώρο με υγρό ολοκληρώνοντας αυτήν τη φάση του ατυχήματος.
4. *Φάση επαναπλημμυρισμού.* Σε ένα πολύ αρχικό στάδιο στη φάση διαφυγής η καρδιά έχει αποξηρανθεί και η θερμοκρασία των καυσίμων αυξάνεται γρήγορα. Κατόπιν, πέφτει σχετικά αργά λόγω της ύπαρξης ροής ατμού στον πυρήνα. Αυτό οδηγεί στη ρήξη των καυσίμων, τα οποία απελευθερώνουν προϊόντα σχάσης σε αέρια μορφή στο πρωτεύον κύκλωμα και μέσω του σπασίματος στο δοχείο πίεσεως [Knief, 1992].



Σχήμα 2.9 Γεγονότα μέσα στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου σπασίματος LOCA

Όταν ο χώρος κάτω από τον πυρήνα γεμίσει, αρχίζει η φάση επαναπλημμυρισμού με τα στοιχεία των καυσίμων να καλύπτονται με νερό από το κατώτατο σημείο προς τα πάνω (Σχήμα 2.9δ). Ουσιαστικά, μια

ποσότητα σταθερού υγρού διατηρείται μέσα στον πυρήνα με υπερβολική υπερχειλίση νερού από το σύστημα ECCS μέσω του σπασίματος. Όσο τα καύσιμα καλύπτονται σταδιακά από νερό, ένας σημαντικός όγκος ατμού διαμορφώνεται και τα υγρά σταγονίδια ρέουν προς το χώρο πάνω από τον πυρήνα. Το μίγμα ατμού-σταγονιδίων περνά από αυτό το χώρο στη γεννήτρια ατμού μέσω της αντλίας κυκλοφορίας και πίσω στο ψυχρό τμήμα, όπου εξέρχεται από το σπάσιμο. Τα σταγονίδια του νερού τείνουν να εξατμιστούν στη γεννήτρια ατμού λόγω της θερμότητας του ρευστού που επανέρχεται από το δευτερεύον κύκλωμα. Η αντίσταση που παρουσιάζεται από τη διαδρομή της εκροής προκαλεί μια πίεση στο χώρο πάνω από τον πυρήνα, η οποία περιορίζει το ποσοστό στο οποίο ο επαναπλημμυρισμός μπορεί να λάβει χώρα. Η αντίσταση μειώνεται και το ποσοστό πλημμυρισμού αυξάνεται πιο πολύ, εάν τα σταγονίδια εγκλωβίζονται στο χώρο πάνω από τον πυρήνα και δεν μεταφέρονται έξω από το δοχείο, εάν ο στροφέας της αντλίας συνεχίζει να περιστρέφεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Hewitt G.F., Collier J.C.: Introduction To Nuclear Power, Taylor & Francis, (2000)
- IAEA: Design of the reactor Core for Nuclear Power Plants, Safety Guide NS-G-1.12, (2005)
- Knief R.A.: Nuclear Engineering: Theory and Technology of Commercial Nuclear Power, Taylor & Francis, (1992)
- Nicolaou G.: Core neutronic parameters of nuclear power reactors in the case of emerging nuclear fuels. Annals of Nuclear Energy 37 p. 285, (2010)
- WASH – 1400: Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regular Commission, (1975)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Όταν συμβεί ένα πυρηνικό ατύχημα είναι πολύ πιθανό ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις θα αποτελέσουν πηγές έκλυσης σημαντικών ποσοτήτων ραδιενεργών προϊόντων [Nicolau, 2009]. Η έκλυση αυτή θα πραγματοποιηθεί είτε στην ατμόσφαιρα είτε στο υδάτινο περιβάλλον με σοβαρές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πιο πιθανό είναι να έχουμε διοχέτευση των ραδιενεργών υλικών στην ατμόσφαιρα, όπου ο χρόνος παραμονής τους εκεί εξαρτάται από το υλικό και τις μετεωρολογικές συνθήκες, και μπορεί να είναι της τάξεως των μερικών λεπτών ή ωρών ή ακόμα και ετών. Επομένως, οποιαδήποτε εκτίμηση της λογικής κατάστασης ξεκινά με τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής διασποράς εντός του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος. Στο κεφάλαιο αυτό θα καλυφθούν οι μηχανισμοί διάχυσης, διασποράς και εναπόθεσης του ραδιενεργού υλικού στην ατμόσφαιρα μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα καθώς και οι επιπτώσεις της έκλυσης αυτής.

3.1 Χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού στρώματος

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα αποτελεί το χαμηλότερο στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα, που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της γης. Το πάχος του ξεκινά από τα 300 m και φτάνει μέχρι και τα 2 km σε ορισμένα σημεία. Εντός του στρώματος αυτού εμφανίζεται έντονη στροβιλώδης κίνηση καθώς και άλλα μετεωρολογικά φαινόμενα, τα οποία εντείνονται από τις ανωμαλίες του εδάφους. Η ατμόσφαιρα αποτελείται κυρίως από άζωτο, οξυγόνο, αργό και διοξείδιο του άνθρακα. Στη σύστασή της περιέχονται ακόμα σε μικρότερο ποσοστό μεθάνιο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδιο του αζώτου, όζον και άλλα στοιχεία που ποικίλουν ποσοτικά και ποιοτικά ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο.

Η στροβιλώδης κατάσταση του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος περιγράφεται από τις κατηγορίες ατμοσφαιρικής ευστάθειας, οι οποίες ταξινομούνται ως εξής: Α Εξαιρετικά ασταθής, Β Μέτρια ασταθής, C Ελαφρά ασταθής, D Ουδέτερη, E Μέτρια ευσταθής, F Ελαφρά ευσταθής, G Εξαιρετικά ευσταθής.

Η διάχυση των ραδιενεργών υλικών στον ατμοσφαιρικό αέρα εξαρτάται από την ατμοσφαιρική ευστάθεια, η οποία μπορεί να υπολογιστεί είτε από τις διακυμάνσεις της τυπικής απόκλισης σ_θ του οριζόντιου άνεμου που συμβαίνουν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα από 15 sec μέχρι 1 h, είτε από την εισερχόμενη ακτινοβολία και την ταχύτητα του άνεμου. Στον Πίνακα 3.1 [Slade, 1968] παρουσιάζονται οι ταξινομήσεις της ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά τον Pasquill σε συνάρτηση του σ_θ . Οι αρχικές ταξινομήσεις της ευστάθειας από τον

Pasquill σχετίζονται και με την ταχύτητα του ανέμου, τη νεφοκάλυψη και την εισερχόμενη ακτινοβολία και δίνονται στον Πίνακα 3.2 [Gifford,1976].

Από τον Πίνακα 3.2 προκύπτει ότι η κατάσταση της ατμόσφαιρας είναι ευσταθής ή ουδέτερη κατά τη διάρκεια της νύχτας και ο βαθμός ευστάθειας εξαρτάται από το βαθμό νέφωσης της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, η ευστάθεια εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Γενικά σε ημέρα με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 6 m/s η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας είναι ουδέτερη.

Πίνακας 3.1 Ταξινομήσεις ευστάθειας κατά Pasquill βασισμένες στις διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου

Ταξινομήσεις ευσταθείας	Κατηγορία	σ_{θ} (μοίρες)
Εξαιρετικά ασταθής	A	25.0
Μέτρια ασταθής	B	20.0
Ελαφρά ασταθής	C	15.0
Ουδέτερη	D	10.0
Μέτρια ευσταθής	E	5.0
Ελαφρά ευσταθής	F	2.5
Εξαιρετικά ευσταθής	G	1.7

Πίνακας 3.2 Κατηγορίες της ευστάθειας

Ταχύτητα (m/s) σε ύψος 10 m	Ημέρα			Νύχτα	
	Ισχυρή Ηλιοφάνεια	Μέση Ηλιοφάνεια	Ασθενής Ηλιοφάνεια	Νέφωση > 4/8	Νέφωση < 4/8
$u < 2$	A	A-B	B	F	G
$2 \leq u \leq 3$	A-B	B	C	E	F
$3 \leq u \leq 4$	B	B-C	C	D	E
$4 \leq u \leq 6$	C	C-D	D	D	D
$u > 6$	C	D	D	D	D

Η ταχύτητα του ανέμου \bar{u} [m/sec] καθορίζεται κυρίως από την αλληλεπίδραση μεταξύ των περιοχών με υψηλή πίεση και των περιοχών με χαμηλή πίεση. Ο υπολογισμός της χρειάζεται να γίνει σε συνάρτηση του κατακόρυφου ύψους z . Ο νόμος της ισχύος χρησιμοποιείται συχνά για να συνάγουμε την ταχύτητα του ανέμου σε ύψη διαφορετικά από αυτά που γίνεται η μέτρησή της, η οποία συνήθως πραγματοποιείται στα 10 m. Ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου γίνεται βάση της σχέσεως:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(10) \cdot (z/10)^a \quad (3.1)$$

όπου ο εκθέτης a εξαρτάται από την κατηγορία της ευστάθειας και οι χαρακτηριστικές τιμές του δίνονται στον Πίνακα 3.3 [Irwin,1979].

Πίνακας 3.3 Τιμές του εκθέτη της κατανομής του ανέμου με το ύψος

Κατηγορία ευστάθειας	Εκθέτης a	
	Αστική περιοχή	Ύπαιθρος
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.20	0.10
D	0.25	0.15
E	0.30	0.35
F	0.30	0.55
G	0.30	0.65

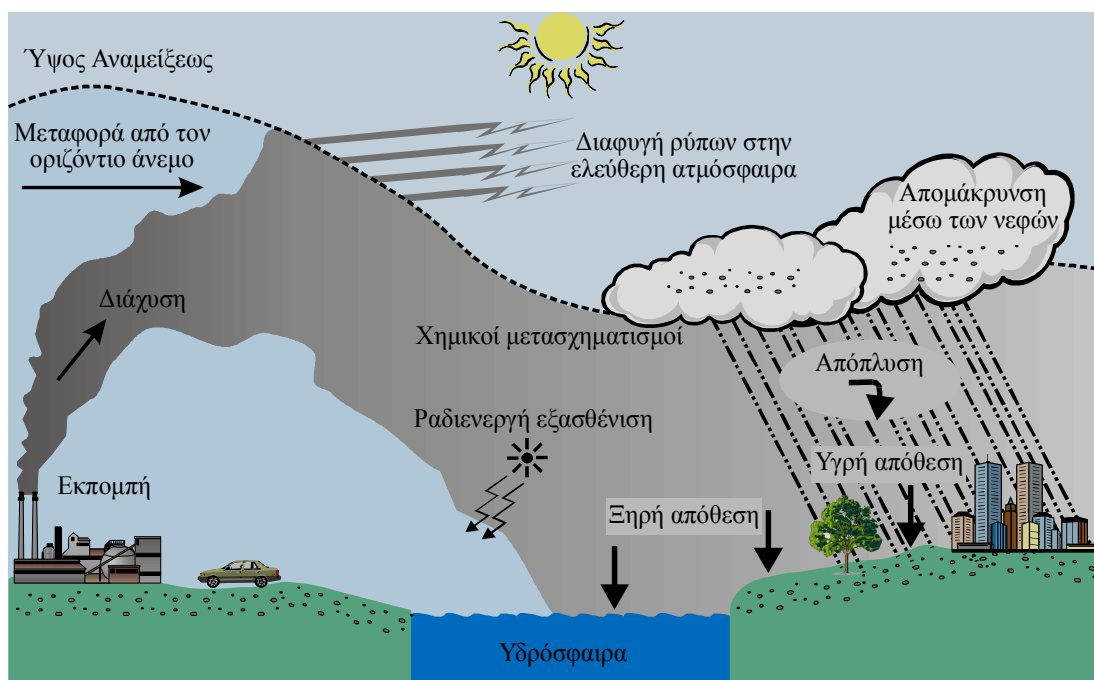
Η εκθετική σχέση μεταβολής της ταχύτητας ισχύει για το επιφανειακό οριακό στρώμα και εφαρμόζεται το πολύ μέχρι το ύψος των 150 m από την επιφάνεια του εδάφους. Επειδή ο αέρας δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι θερμοκρασιακές μεταβολές μιας αέριας μάζας, όταν μετακινείται σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα, είναι αδιαβατικές. Η θερμοκρασία ελαττώνεται γραμμικά, όταν αυξάνεται το ύψος με ρυθμό $\Delta T/\Delta z$, ο οποίος πειραματικά έχει βρεθεί ίσος με $-1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Επειδή όμως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ενός τόπου αλλάζουν συνεχώς, η θερμοκρασιακή κατανομή ανάλογα με το ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Σε συνθήκες ζέστης, με διαυγή ατμόσφαιρα και μικρές ταχύτητες ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει την επιφάνεια του εδάφους και τον αέρα κοντά σε αυτήν. Τα θερμά αυτά στρώματα τείνουν να μετακινηθούν προς τα επάνω μεταφέροντας ποσά θερμότητας από την επιφάνεια της γης προς την ατμόσφαιρα. Αυτή η ατμοσφαιρική κατάσταση για την οποία έχουμε έντονη

αρνητική κλίση της θερμοκρασίας ($\Delta T/\Delta z < -1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) ονομάζεται ασταθής. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας με μικρές και πάλι ταχύτητες ανέμου, η επιφάνεια του εδάφους χάνει μέρος της θερμότητάς της με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους και ο αέρας κοντά σε αυτήν να είναι ψυχρότεροι από τα στρώματα αέρα, που βρίσκονται σε μεγαλύτερα ύψη. Στην περίπτωση αυτή έχουμε θετική κλίση της θερμοκρασίας ($\Delta T/\Delta z > -1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) και η ατμοσφαιρική αυτή κατάσταση ονομάζεται σταθερή. Τέλος, όταν επικρατούν άνεμοι με μεγάλες ταχύτητες και μεγάλο μέρος του ουρανού είναι καλυμμένο από σύννεφα, έχουμε ακαθόριστες κλίσεις θερμοκρασίας και η ατμοσφαιρική αυτή κατάσταση ονομάζεται ουδέτερη.

3.2 Ατμοσφαιρικός κύκλος του ραδιενεργού υλικού

Μια ποικιλία ατμοσφαιρικών μηχανισμών είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά και το μετασχηματισμό των ραδιενεργών υλικών, που εκλύονται στην ατμόσφαιρα μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα. Οι διαδικασίες οι οποίες συντελούν στη διασπορά των αέριων υλικών που εκπέμπονται από έναν πυρηνικό σταθμό, δίνονται στο Σχήμα 3.1 [Dobbins, 1979].



Σχήμα 3.1 Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά του ραδιενεργού νέφους (πλουμίου)

Οι αέριοι ρύποι, όταν αφήνουν την καμινάδα ενός αντιδραστήρα μετά από ατύχημα, είναι κατά κανόνα θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αρχική ορμή που έχουν τα καυσαέρια, όταν φθάνουν στην κορυφή της καμινάδας, έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωσή τους μέχρι ενός σημείου. Το ύψος αυτό είναι βέβαια υψηλότερο του φυσικού ύψους της καμινάδας και ονομάζεται ενεργό ύψος. Η διαφορά αυτή ανάμεσα στο φυσικό

και στο ενεργό ύψος της καμινάδας ονομάζεται αρχική ανύψωση του πλουμίου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού στο έδαφος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του ενεργού ύψους εκπομπής, είναι φανερό ότι η ανύψωση του πλουμίου μπορεί, στην ακραία περίπτωση, να μειώσει τη συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού στο έδαφος κατά ένα παράγοντα της τάξης του 100.

Στη συνέχεια ο καπνός μεταφέρεται μακριά από το σημείο εκλύσεως του από τον οριζόντιο άνεμο. Η οριζόντια αυτή μεταφορά (διασπορά) αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραιώσης των ρύπων. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μικρή οι συνθήκες διασποράς είναι άσχημες και υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης μεγάλων συγκεντρώσεων ραδιενεργών υλικών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο σημείο εκπομπής.

Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα είναι υπεύθυνες για την κατακόρυφη μεταφορά και τη διαπλάτυνση του ραδιενεργού νέφους. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάχυση. Η κλίμακα και η ένταση της διάχυσης εξαρτώνται από την κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Σε συνθήκες ευστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρής κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας η διάχυση είναι πολύ έντονη. Η διάχυση του ραδιενεργού υλικού γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμειξης.

Καθώς τα ισότοπα πλησιάζουν το έδαφος, ένα μέρος αυτών θα προσκολληθεί στην επιφάνειά του και δε θα ανακλαστεί. Η διαδικασία ονομάζεται εναπόθεση και παρατηρείται έντονα σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο σημείο εκλύσεως του ραδιενεργού υλικού. Η εναπόθεση των σωματιδίων στο έδαφος χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

- Καθίζηση: που είναι η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων.
- Ξηρή εναπόθεση: την οποία υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριες ενώσεις οι οποίες ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται από την επιφάνεια, όταν έρθουν σε επαφή με αυτήν.
- Υγρή εναπόθεση: η οποία λαμβάνει χώρα σε περίπτωση υετού, οπότε μπορεί να συμβεί κάποιο από τα ακόλουθα ενδεχόμενα: είτε σάρωση των ραδιενεργών υλικών τα οποία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα από τη βροχή ή το χιόνι είτε πρόληψή τους από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής.

Μετά την εναπόθεσή τους στο έδαφος τα ισότοπα είναι δυνατόν να ακολουθήσουν τις εξής διαδρομές: α) την επαναδιασπορά τους στον αέρα, β) την απορρόφησή τους από τα φυτά μέσω των ριζών τους και την εισχώρησή τους στην τροφική αλυσίδα και γ) την παραπέρα μετακίνησή τους, οριζόντια και κάθετη, στο έδαφος προκαλώντας τη μόλυνση των υπογείων υδάτων.

Ένα μέρος της ρύπανσης διαφεύγει από το στρώμα ανάμειξης στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Η απουσία αναταρακτικών κινήσεων στην ελεύθερη ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα η διάχυση και η κατακόρυφη μεταφορά των υλικών να γίνεται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς. Από την άλλη μεριά, οι αντίστοιχοι ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί είναι μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής κλίμακας με αποτέλεσμα τα φαινόμενα να επηρεάζουν ευρύτερες περιοχές της γης.

Κατά το χρόνο παραμονής του ραδιενεργού νέφους στην ατμόσφαιρα, το νέφος υφίσταται διάφορους χημικούς μετασχηματισμούς λόγω αντιδράσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα είναι ένα αποτελεσματικό εργαστήριο αντιδράσεων μέσα στο οποίο διοχετεύονται χημικά ενεργά συστατικά με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός αριθμού καινούριων ουσιών. Οι καινούριες ουσίες παράγονται από αέρια και υγρά τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους και με τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Οι χημικές αντιδράσεις των ραδιενεργών υλικών μπορούν να δώσουν ουσίες, οι οποίες δεν είναι ραδιενεργές. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις τα προϊόντα των χημικών αυτών αντιδράσεων περιλαμβάνουν και νέα ραδιενεργά υλικά τα οποία ονομάζονται δευτερογενή.

Σε κάθε περίπτωση, όταν μελετάμε τις εκλύσεις ραδιενεργών υλικών και τις επιπτώσεις τους, είναι πολύ σημαντικό να ξεχωρίζουμε από τη μια πλευρά την αέρια ρύπανση και της επιπτώσεις της και από την άλλη πλευρά την αποτιθέμενη ρύπανση με τις αντίστοιχες επιπτώσεις. Ο λόγος για τον οποίο είναι τόσο σημαντικός αυτός ο διαχωρισμός, είναι επειδή η κλίμακα των δυο φαινομένων είναι πολύ διαφορετική. Οι άμεσες επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης είναι περισσότερο τοπικό πρόβλημα και οι επιδράσεις της είναι συνήθως μεγαλύτερες στις περιοχές κοντά στην πηγή της μόλυνσης. Η επίδραση της απόθεσης εξαπλώνεται σε πολλές εκατοντάδες ή χιλιάδες χιλιόμετρα.

3.3 Μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής διασποράς και της εναπόθεσης

Όπως έχει αναφερθεί μέχρι τώρα, τα ραδιενεργά υλικά, που εισάγονται στην ατμόσφαιρα, διαχέονται μέσα σε αυτή σε έκταση και με ταχύτητα που εξαρτάται τόσο από τη φυσική κατάσταση και τις ιδιότητές τους όσο και από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Ο θεωρητικός υπολογισμός της συγκεντρώσεως των αέριων αυτών υλικών σε ένα τυχαίο σημείο του χώρου (x , y , z), τη χρονική στιγμή t , αποτελεί ένα δύσκολο και πολύπλοκο μαθηματικό πρόβλημα δεδομένου ότι όλοι οι παράγοντες, που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς δεν παραμένουν σταθεροί αλλά μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά. Ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων για τον υπολογισμό της συγκεντρώσεως των αέριων ρύπων έχει αναπτυχθεί, αλλά το μοντέλο του Γκαουσσσιανού πλουμίου είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο ατμοσφαιρικής διασποράς.

Στα Γκαουσσσιανά μοντέλα πλουμίου, σύμφωνα με την Γκαουσσσιανή κατανομή [Datez & Pantel, 1974] το ραδιενεργό υλικό διασκορπίζεται κάθετα σε

μια διεύθυνση ευθύγραμμης μεταφοράς. Το μοντέλο αυτό μας δίνει μια εκτίμηση της συγκέντρωσης συναρτήσει της απόστασης από μια διαρκή σημειακή πηγή. Είναι πολύτιμο, καθώς το μοντέλο εκτιμά για διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες τη διασπορά των υλικών που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και οι εκλύσεις υποτίθεται ότι παραμένουν σταθερές, γεγονός το οποίο μπορεί να εισάγει διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και της πραγματικότητας.

3.3.1 Υπολογισμός συγκεντρώσεως ραδιενεργού υλικού στον αέρα

Στην περίπτωση έκλυσης ραδιενέργειας Q_k [Bq] του νουκλιδίου k από μια συνεχή σημειακή πηγή η οποία βρίσκεται σε ύψος h πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η συγκέντρωση του νουκλιδίου k στον αέρα $X_{air,k}$ δίνεται από την Εξίσωση

$$X_{air,k}(x,y,z) = \frac{Q_k}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h_{eff})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{eff})^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (3.2)$$

όπου

\bar{u} η μέση ταχύτητα του ανέμου [m/s] στο ύψος h ,

σ_y η τυπική απόκλιση κατά την οριζόντια διεύθυνση [m],

σ_z η τυπική απόκλιση [m] στον κατακόρυφο άξονα.

Επειδή το ραδιενεργό νέφος εξέρχεται από την καμινάδα με κάποια αρχική ορμή, ανέρχεται μέσα στην ατμόσφαιρα σε ύψος μεγαλύτερο από αυτό της καμινάδας παρασυρόμενο συγχρόνως και από τον άνεμο. Το ύψος αυτό ονομάζεται ενεργό ύψος h_{eff} και χρησιμοποιείται στην Εξίσωση 3.2. Το ενεργό ύψος υπολογίζεται βάση της σχέσης

$$h_{eff} = h_s + \Delta h \quad (3.3)$$

όπου

h_s το ύψος εκπομπής, το οποίο είναι μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της θέσης της πηγής της πυρηνικής εγκατάστασης,

Δh η ανύψωση του πλουμίου.

Υπάρχουν διάφορα αριθμητικά μοντέλα για τον υπολογισμό της ανύψωσης του πλουμίου, τα οποία είναι πολύπλοκα και εισάγουν μεγάλη

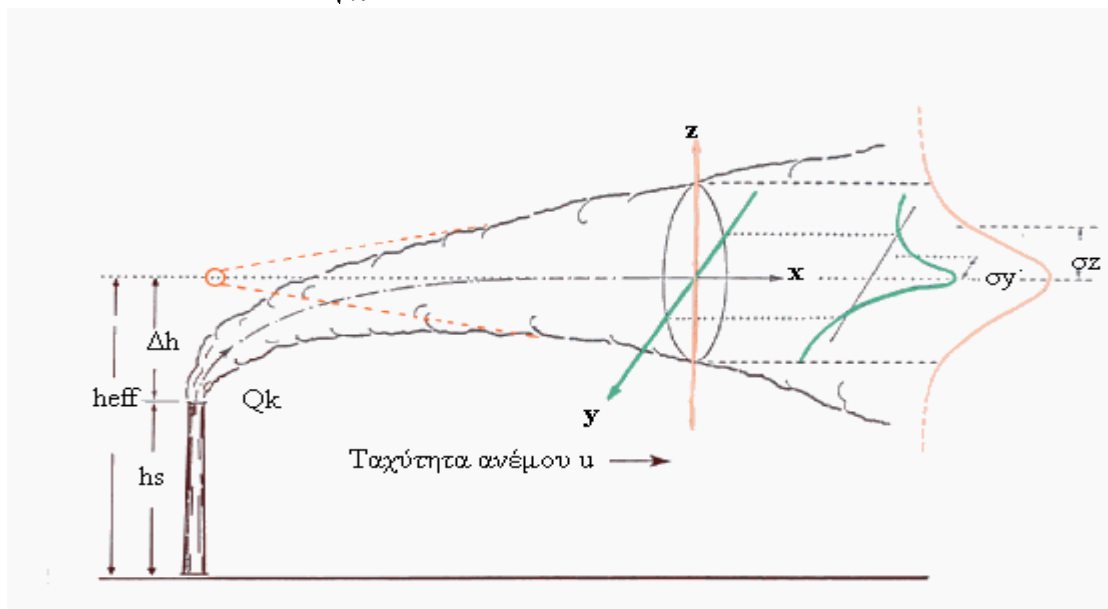
αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Το Σχήμα 3.2 περιγράφει την Γκαουσιανή διασπορά του νέφους καθώς και τις σχετικές παραμέτρους.

Αν υποθέσουμε τώρα ότι η αντανάκλαση του διασκορπισμένου υλικού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους είναι ολική, η συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού στην επιφάνεια δίνεται από την Εξίσωση 3.4 θέτοντας $z = 0$ στη σχέση 3.2. Έτσι προκύπτει

$$x_{air,k}(x, y, 0) = \frac{Q_K}{\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3.4)$$

Επειδή η μοντελοποίηση της Γκαουσιανής διασποράς περιορίζεται από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, η κάθετη διασπορά εμφανίζεται μόνο μέσα στο μικτό στρώμα. Η στροβιλώδης ανταλλαγή στρωμάτων της ατμόσφαιρας σταματά πάνω από το μικτό ύψος και η παράμετρος της κάθετης διασποράς σ_z είναι σταθερή στην τιμή $\sigma_{z,max}$. Υπάρχει, λοιπόν, η ακόλουθη σχέση μεταξύ του μικτού ύψους h_{mix} και της $\sigma_{z,max}$

$$\sigma_{z,max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} h_{min} \approx 0,8 h_{min} \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.2 Γκαουσιανή ατμοσφαιρική διασπορά

Οι παράμετροι διάχυσης σ_y και σ_z καθορίζουν το πλάτος και το ύψος του ραδιενεργού νέφους ως συνάρτηση της απόστασης (x) κατά τη διεύθυνση του ανέμου από το σημείο εκλύσεως και δίνονται από τους τύπους

$$\sigma_y(x) = q_y x^{p_y} \quad (3.6a)$$

$$\sigma_z(x) = q_z x^{p_z} \quad (3.6\beta)$$

όπου οι συντελεστές q_y , p_y , q_z και p_z καθορίζονται με την προσέγγιση της Εξίσωσης 3.4, με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στις τιμές της συγκεντρώσεως που μετρώνται.

Για αποστάσεις x [m] από την πηγή κατά τη φορά του ανέμου, που κυμαίνονται μεταξύ 100 m και 1000 m ο Briggs [Briggs, 1973] πρότεινε τις σχέσεις, που παρατίθενται στον Πίνακα 3.4, για τον υπολογισμό των παραμέτρων διάχυσης $\sigma_y(x)$ και $\sigma_z(x)$.

Είναι δυνατό να βρεθούν οι μέσες ημερήσιες τυπικές αποκλίσεις μέσω ενός παράγοντα, ο οποίος θα μετατρέπει τις προκύπτουσες από τον πίνακα τιμές - που βασίζονται με τη σειρά τους σε μέσες τιμές από χρόνο μέτρησης 10 min με τις οποίες καταλήξαμε στις παραπάνω σχέσεις - προς αντίστοιχες τιμές για κάποιο άλλο χρονικό διάστημα t

$$\sigma(t) = \sigma(t) \cdot (t/10)^p \quad (3.7)$$

όπου το $p = 0.3$ για t μεταξύ 60 και 600 min και $p = 0.2$ για $t < 60$ min. Συνεπώς, για την εύρεση ημερήσιων μέσων τιμών χρειάζεται να πολλαπλασιαστούν οι τιμές από τον Πίνακα 3.4 με το 4.44.

Πίνακας 3.4 Τύποι του Briggs για το σ_y και σ_z

Κατηγορία ευστάθειας	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
A – B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E – F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.00015x)^{-1/2}$

Οι συντελεστές διάχυσης q_y , p_y , q_z και p_z εξαρτώνται από την κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας, την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφία της περιοχής. Η τραχύτητα του εδάφους ορίζεται από το μήκος της τραχύτητας, δηλαδή από τα εμπόδια και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του εδάφους και έχει χαρακτηριστικές τιμές 0.3 m για γεωργικές περιοχές και περίπου 1.5 m για δασικές και αστικές περιοχές. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών διάχυσης για μήκος τραχύτητας 0.3 m [Panitz et al., 1989].

Πίνακας 3.5 Συντελεστές διάχυσης σε ύψος 70 m

Κατηγορία ευστάθειας	Συντελεστές διάχυσης			
	ρ_y	q_y	ρ_z	q_z
A	0.946	0.796	1.321	0.711
B	0.826	0.796	0.950	0.711
C	0.586	0.796	0.700	0.711
D	0.418	0.796	0.520	0.711
E	0.297	0.796	0.382	0.711
F	0.235	0.796	0.311	0.711

3.3.2 Υπολογισμός συγκεντρώσεως ραδιενεργού υλικού στο έδαφος

Τα μικροσωματίδια και το ιώδιο απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με τις διαδικασίες της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης, ενώ τα ευγενή αέρια δεσμεύονται από την ατμόσφαιρα. Η υγρή εναπόθεση η οποία λαμβάνει χώρα, όταν οι ρύποι πέφτουν στο έδαφος ή στη θάλασσα με τη βροχόπτωση, τη χιονόπτωση, το χαλάζι ή το χιονόνερο, είναι πολύ αποτελεσματική στην απομάκρυνση των μικροσωματιδίων από το ραδιενεργό νέφος.

Η υγρή εναπόθεση στην επιφάνεια της γης είναι ευθέως ανάλογη με τη συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού στη βροχή, το χιόνι ή τη φάση πάγου και ορίζεται από την εξίσωση:

$$F_{\text{wet}} = I \cdot C_w \quad (3.8)$$

όπου:

F_{wet} ροή της επιφανειακής υγρής εναπόθεσης [$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

I ταχύτητα κατακρήμνισης [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$],

C_w συγκέντρωση ραδιενεργού υλικού που συνδέεται με την κατακρήμνιση [$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$].

Η υγρή εναπόθεση μετρείται με έναν κάδο συλλογής και ένα βροχόμετρο. Το βροχόμετρο τοποθετείται στην περιοχή του αποδέκτη και παρέχει μια ακριβή μέτρηση της ταχύτητας κατακρήμνισης I . Ο υγρός κάδος συλλογής είναι ανοιχτός μόνο κατά τη διάρκεια της κατακρήμνισης και τα περιεχόμενά του αναλύονται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ραδιενεργού υλικού C_w . Διακρίνονται δυο διαδικασίες υγρής εναπόθεσης:

I) Έκπλυση (Washout): Σταγόνες βροχής ή νιφάδες χιονιού πέφτουν από τα υψηλά ατμοσφαιρικά στρώματα και κατά τη διέλευσή τους μέσα από το ραδιενεργό νέφος δεσμεύουν τα μικροσωματίδια και τα αέρια ιωδίου

μεταφέροντάς τα με αυτόν τον τρόπο στην επιφάνεια του εδάφους. Τυπικά, ένα εκατομμύριο σταγόνες, που υπάρχουν στα σύννεφα, χρειάζονται για να σχηματίσουν μια σταγόνα βροχής διαμέτρου 1 mm. Θεωρώντας ένα μέσο διάστημα 1 mm ανάμεσα στις σταγόνες που υπάρχουν στα σύννεφα, η συμπύκνωση 10^6 σταγόνων, που υπάρχουν στα σύννεφα σε μια σταγόνα βροχής 1 mm θα παγίδευε αρκετό αέρα για ένα λόγο έκπλυσης (Washout ratio) της τάξεως του 10^6 [Schnoor, 1976]. Η έκπλυση μοντελοποιείται από το συντελεστή έκπλυσης Λ [s^{-1}], το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από την ένταση της βροχής και δίνεται από τη σχέση:

$$\Lambda = a \cdot I^b \quad (3.9)$$

όπου τα μεγέθη a , b εξαρτώνται από τον τύπο του νουκλιδίου και το μέγεθος των μορίων τους αντίστοιχα [Panitz et al., 1989].

II) Βροχή (Rainout): Η βροχή αναφέρεται σε διεργασίες κάτω από τα σύννεφα όπου τα ραδιενεργά υλικά που έχουν παγιδευτεί ως σταγόνες βροχής, πέφτουν μέσα από τον αέρα, ο οποίος έχει υποστεί τη ρύπανση από το ραδιενεργό νέφος. Επειδή τα σύννεφα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες αέρα και δεσμεύουν αέρα που έχει υποστεί μόλυνση από την επιφάνεια της γης, η έκπλυση προκαλείται κυρίως από διεργασίες μέσα στα σύννεφα. Για το λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός των δυο αυτών διεργασιών.

Στην περίπτωση της ξηρής εναπόθεσης, η οποία λαμβάνει χώρα απουσία βροχής, η εναπόθεση του ραδιενεργού υλικού συναντά τρεις αντιστάσεις: την αεροδυναμική αντίσταση, την αντίσταση του οριακού στρώματος και την αντίσταση της επιφάνειας. Η αεροδυναμική αντίσταση περιλαμβάνει τυρβώδη ανάμιξη και μεταφορά από την ατμόσφαιρα στο οριακό στρώμα πάνω από την επιφάνεια της γης. Η οριακή αντίσταση αναφέρεται στη δυσκολία της μεταφοράς του ραδιενεργού υλικού μέσα από το οριακό στρώμα, ενώ η αντίσταση επιφάνειας περιλαμβάνει τις φυσικές και χημικές αντιδράσεις που μπορεί να πραγματοποιηθούν στην επιφάνεια του αποδέκτη (επιφάνεια της θάλασσας, βλάστηση, επιφάνεια χιονιού κ.τ.λ.). Η ταχύτητα της ξηρής εναπόθεσης περικλείει τις τρεις αυτές αντιστάσεις και δίνεται από την Εξίσωση

$$V_d = 1 / (r_a + r_b + r_s) \quad (3.10)$$

όπου ως V_d ορίζεται η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης [$cm \cdot s^{-1}$], r_a είναι η αεροδυναμική αντίσταση, r_b είναι η αντίσταση του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος και η r_s είναι η αντίσταση στην επιφάνεια.

Η ταχύτητα της εναπόθεσης επηρεάζεται από έναν αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων της σχετικής υγρασίας, του τύπου και του μεγέθους του ραδιενεργού αερίου, της κατανομής της ταχύτητας του άνεμου, του τύπου της επιφάνειας του αποδέκτη, του συντελεστή τραχύτητας, της ατμοσφαιρικής

σταθερότητας και της θερμοκρασίας. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί αυξημένες κατακόρυφες αναταράξεις και στροβίλους με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας εναπόθεσης V_d . Επειδή η διάμετρος των μορίων των μικροσωματιδίων μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των μεταβολών στη σχετική υγρασία - εξατμίζουν ή συμπυκνώνουν διαρκώς νερό - χρησιμοποιείται ο διάμεσος της διαμέτρου της μάζας (Mass Median Diameter, MMD) ως ένα μέτρο της κατανομής του μεγέθους τους. Οι Milford και Davidson (1985) έδειξαν ένα γενικό νόμο συσχέτισης για την εξάρτηση του V_d από το μέγεθος των σωματιδίων

$$V_d = 0.388 \text{ MMD}^{0.76} \quad (3.11)$$

Χαρακτηριστικές τιμές της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης σε συνάρτηση της διαμέτρου των μικροσωματιδίων και του είδους της περιοχής δίνονται στον Πίνακα 3.6 [Panitz et al., 1989].

Αν τώρα υποθέσουμε ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ της συγκέντρωσης του υλικού που εναποτίθεται και της συγκέντρωσης του αέρα στο επίπεδο του εδάφους (Σχέση 3.4), τότε ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ραδιενεργού υλικού στην επιφάνεια του εδάφους ($X_{GR,k}$) θα γίνεται βάσει της Σχέσης

$$X_{GR,k}(x,y) = V_d X_{air,k}(x,y,0) \quad (3.12)$$

Πίνακας 3.6 Τιμές ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης [m/s]

Επιφάνεια εδάφους	Διάμετρος μικροσωματιδίων (μm)	V_d ιωδίου	
		στοιχειακό	οργανικό
Ομαλή	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Γεωργική	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Δασική	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$

Εκτός από την επιφάνεια του εδάφους ένα μέρος των ραδιενεργών σωματιδίων προσκολλάται και στην επιφάνεια της βλάστησης. Η μελέτη της εναπόθεσης επάνω στη βλάστηση χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, διότι η κατανάλωση των μολυσμένων αυτών φυτών αποτελεί σημαντική οδό για την είσοδο των νουκλιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό. Το ποσοστό των ισοτόπων που εναποτίθενται στη βλάστηση χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή f_{veg} . Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται συντελεστής κατακράτησης της βλάστησης και ορίζεται ως το κλάσμα της ποσότητας του υλικού που εναποτέθηκε πάνω στη βλάστηση προς την ολική ποσότητα του υλικού που εναποτέθηκε τόσο στη βλάστηση όσο και στο έδαφος.

Συνεπώς, η συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού πάνω στη βλάστηση σε μια οριζόντια επιφάνεια εδάφους δίνεται από τη Σχέση

$$X_{veg,k}(x,y) = f_{veg} V_d X_{air,k}(x,y,0) = V_{veg} X_{air,k}(x,y,0) \quad (3.13)$$

όπου V_{veg} είναι η ταχύτητα εναπόθεσης πάνω στη βλάστηση. Οι τιμές των V_{veg} και f_{veg} εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το είδος και η χημική σύσταση του ισότοπου, ο τύπος της βλάστησης και η πυκνότητά της, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τραχύτητα του εδάφους καθώς και το ποσοστό της υγρασίας. Γενικά ο συντελεστής f_{veg} αυξάνει όσο αυξάνει και η πυκνότητα της βλάστησης. Για χόρτα τα οποία έχουν σχετικά μεγάλο ύψος η τιμή του κυμαίνεται από 0.5 έως 0.7, ενώ για χαμηλότερα σε ύψος χόρτα από 0.7 έως 0.85. Στον Πίνακα 3.7 [Panitz et al., 1989] δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της ταχύτητας εναπόθεσης πάνω στη βλάστηση για f_{veg} ίσο με 57%.

Πίνακας 3.7 Τιμές ταχύτητας εναπόθεσης πάνω στη βλάστηση

Είδος νουκλιδίου	V_d (m/sec)
Ενεργό αέριο (π.χ. μοριακό ιώδιο)	0.035
Μικρά σωματίδια (με διάμετρο < 4 μm)	0.0018
Μη ενεργά αέρια (CH_3I)	0.00018

3.4 Υπολογισμός ραδιενεργών δόσεων

Μέρος της ραδιενέργειας που εκλύεται μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα καταλήγει μοιραία και στον άνθρωπο. Ο υπολογισμός της δόσης ακτινοβολίας, που θα δεχτεί ο πληθυσμός είναι καθοριστικής σημασίας για τις αποφάσεις και τα μέτρα προστασίας, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν. Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να διακριθεί σε εσωτερική και εξωτερική. Η εσωτερική έκθεση σε ακτινοβολία προέρχεται από την κατάποση τροφών που έχουν μολυνθεί από την εισπνοή του ραδιενεργού νέφους και από την εισπνοή των νουκλιδίων που επαναιωρήθηκαν και πάλι στην ατμόσφαιρα. Η εξωτερική έκθεση προέρχεται από την έκθεση ολόκληρου ή μέρους του ανθρωπίνου σώματος σε ακτινοβολία από το νέφος, από το έδαφος και από την εναπόθεση νουκλιδίων στο δέρμα και στο ρουχισμό. Στο Κεφάλαιο 3.4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι οδοί εσωτερικής και εξωτερικής έκθεσης καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις με τη βοήθεια των οποίων γίνονται οι υπολογισμοί των ραδιενεργών δόσεων.

3.4.1 Οδοί εσωτερικής έκθεσης

1) Εισπνοή

Κατά τη διέλευση του ραδιενεργού νέφους ο άνθρωπος δέχεται δόση ραδιενέργειας από την εισπνοή του μολυσμένου αέρα. Οι δόσεις που οφείλονται στην εισπνοή των νουκλιδίων δίνονται από τη σχέση

$$D_{IH,OG}^T = A_{IH} \sum_k X_{air,k} g_{IH,OG,K}^T \quad (3.14)$$

όπου:

- $D_{IH,OG}^T$ η χρονικά ολοκληρωμένη δόση [Sv] από την εσωτερική ακτινοβολία μέσω της εισπνοής, στο χρονικό διάστημα T,
 $X_{air,k}$ η χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση της ραδιενέργειας στον αέρα [Bq·s·m⁻³] κοντά στην επιφάνεια του εδάφους,
 A_{IH} ο ρυθμός αναπνοής [m³·s⁻¹],
 $g_{IH,OG,K}^T$ ο παράγοντας μετατροπής της δόσης που εισπνεύστηκε [Sv/Bq] για το όργανο OG και για το νουκλίδιο k.

Ο παράγοντας μετατροπής της δόσης εξαρτάται από την ηλικία του ανθρώπου και στους Πίνακες 3.8 και 3.9 [Jacobi et al., 1989 – Phipps et al., 1991] δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του για διάφορους τύπους νουκλιδίων. Ο ρυθμός αναπνοής εξαρτάται από την ηλικία του ανθρώπου και τη δραστηριότητά του κατά τη στιγμή της εισπνοής του μολυσμένου αέρα, και κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του δίνονται στον Πίνακα 3.10 [KfK, 1991].

Πίνακας 3.8 Παράγοντες μετατροπής δόσης για ενήλικες [Sv/Bq]

Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός δόση
⁹⁰ Sr	3.1·10 ⁻⁰⁷	2.3·10 ⁻⁰⁹	4.6·10 ⁻⁰⁸
¹⁰³ Ru	3.4·10 ⁻¹⁰	2.8·10 ⁻¹⁰	1.9·10 ⁻⁰⁹
¹⁰⁶ Ru	4.0·10 ⁻⁰⁹	4.0·10 ⁻⁰⁹	3.3·10 ⁻⁰⁸
¹³² Te	4.1·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻⁰⁸	3.0·10 ⁻⁰⁹
¹³¹ I	5.7·10 ⁻¹¹	2.7·10 ⁻⁰⁷	1.3·10 ⁻⁰⁸
¹³⁵ I	2.2·10 ⁻¹¹	7.6·10 ⁻⁰⁹	4.6·10 ⁻¹⁰
¹³⁴ Cs	1.2·10 ⁻⁰⁸	1.1·10 ⁻⁰⁸	1.2·10 ⁻⁰⁸
¹³⁷ Cs	8.2·10 ⁻⁰⁹	8.0·10 ⁻⁰⁹	8.5·10 ⁻⁰⁹

II) Επαναιώρηση ραδιενεργών ουσιών

Κατά τη μεταφορά του ραδιενεργού νέφους η μεγαλύτερη ποσότητά του εναποτίθεται στο έδαφος. Το ποσοστό ραδιενεργών ουσιών, που θα εισπνεύσει ο άνθρωπος κατά τη διέλευση του νέφους, είναι περίπου ίσο με το 1% της συνολικής ποσότητάς τους που περιέχεται στο νέφος, ακόμα και για τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές. Το υπόλοιπο θα κατακαθίσει στο έδαφος μολύνοντας την περιοχή και με διάφορους μηχανισμούς, όπως ο άνεμος, οι

εκσκαφές, η κυκλοφορία των αυτοκινήτων και το βάδισμα θα επαναιωρηθεί και πάλι στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 3.9 Παράγοντες μετατροπής δόσης για παιδιά (1 έτους) [Sv/Bq]

Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός δόση
^{90}Sr	$1.2 \cdot 10^{-06}$	$1.4 \cdot 10^{-08}$	$1.8 \cdot 10^{-07}$
^{103}Ru	$1.4 \cdot 10^{-09}$	$1.1 \cdot 10^{-09}$	$1.1 \cdot 10^{-08}$
^{106}Ru	$2.4 \cdot 10^{-08}$	$2.4 \cdot 10^{-08}$	$2.3 \cdot 10^{-07}$
^{132}Te	$2.2 \cdot 10^{-09}$	$5.4 \cdot 10^{-07}$	$2.9 \cdot 10^{-08}$
^{131}I	$2.3 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-06}$	$1.1 \cdot 10^{-07}$
^{135}I	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$7.8 \cdot 10^{-08}$	$4.4 \cdot 10^{-09}$
^{134}Cs	$7.7 \cdot 10^{-09}$	$6.7 \cdot 10^{-09}$	$8.6 \cdot 10^{-09}$
^{137}Cs	$6.0 \cdot 10^{-09}$	$5.6 \cdot 10^{-09}$	$7.0 \cdot 10^{-09}$

Πίνακας 3.10 Ρυθμοί αναπνοής για διάφορες ηλικίες

Ηλικία	Ρυθμός αναπνοής (1/min)		
	Ξεκούραση	Ελαφριά άσκηση	Έντονη άσκηση
Ενήλικες	5 - 10	10 - 30	30 - 45
Παιδιά (10 ετών)	3 - 7	7 - 15	15 - 20
Παιδιά (1 έτους)	1.3 - 2.5	2.5 - 5	-
Νεογέννητα	0.5 - 1	1 - 2	-

Εάν, λοιπόν, δε ληφθούν άμεσα μέτρα απολύμανσης της περιοχής ή αν δεν απομακρυνθεί ο πληθυσμός, τότε θα υπάρχει μια διαρκής έκθεση των ανθρώπων σε ραδιενεργές ουσίες με δυσάρεστες επιπτώσεις στην υγεία τους. Αξίζει να τονιστεί ότι το μεγαλύτερο κίνδυνο διατρέχουν τα ζώα, που βοσκούν στις συγκεκριμένες περιοχές, γιατί εισπνέουν μεγάλες ποσότητες σκόνης λόγω της μικρής απόστασής τους από το έδαφος κατά τη διάρκεια της βοσκής τους.

Το μαθηματικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις αυτές είναι ο συντελεστής επαναιώρησης $K(h,t)$ [m^{-1}], ο οποίος είναι συνάρτηση τόσο του ύψους από το έδαφος όσο και του χρόνου. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της συγκέντρωσης της ραδιενεργής ουσίας στον αέρα σε ύψος h διά της συγκέντρωσης της ουσίας στο έδαφος. Ειδικότερα για ένα συγκεκριμένο ύψος, περίπου ίσο με το ύψος ενός ανθρώπου, μετά από μια στιγμιαία επαναιώρηση ο δείκτης αυτός βρέθηκε πειραματικά ότι φθίνει εκθετικά με το χρόνο. Η ελάττωση αυτή οφείλεται στο γεγονός, ότι τα αερολύματα της ουσίας σταδιακά

προσκολλούνται στα σωματίδια του εδάφους και συνεπώς παύουν να επαναιωρούνται. Ο συντελεστής αυτός σε σταθερό ύψος εκφράζεται ως άθροισμα δύο όρων. Ο πρώτος φθίνει εκθετικά με το χρόνο, ενώ ο δεύτερος είναι σταθερός και αποτελεί την ασυμπτωτική τιμή του συντελεστή

$$K(t) = K_0 e^{-t/\tau} + K_\infty \quad (3.15)$$

όπου $K_0=10^{-5} \text{ m}^{-1}$ και $K_\infty=10^{-9} \text{ m}^{-1}$. Για το μέγεθος τ έχουν δοθεί δυο τιμές μέχρι σήμερα (μετρούμενες σε χρόνια), που καθορίζουν και τα όριά του δηλαδή $\tau = 0.736$ και $\tau = 0.2$.

Η ραδιενεργός δόση που θα εισπνεύσει ο άνθρωπος μετά την επαναιώρηση του ραδιενεργού υλικού, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση με το ρυθμό αναπνοής, τον παράγοντα μετατροπής δόσης για εισπνοή και το συντελεστή επαναιώρησης.

III) Κατάποση ραδιενεργών ουσιών μέσω της τροφής

Μετά την έκλυση ραδιενεργών ουσιών μια ποσότητα θα κατακαθίσει αναπόφευκτα σε καλλιεργήσιμο έδαφος ρυπαίνοντας τα φυτά και διαπερνώντας το χώμα. Στη συνέχεια η ραδιενέργεια θα εισχωρήσει στην τροφική αλυσίδα είτε άμεσα μέσω της κατανάλωσης των φυτών αυτών είτε έμμεσα μέσω της κατανάλωσης ζώων, που ετράφηκαν με τα φυτά αυτά. Παράλληλα, η καλλιέργεια του εδάφους μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα προκαλέσει καθυστερημένα μεγαλύτερη επιβάρυνση των ανθρώπων. Η μόλυνση του νερού θα επιφέρει και αυτή με τη σειρά της επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, διότι τα ισότοπα θα φθάσουν και στον υδροφόρο ορίζοντα με την πάροδο του χρόνου. Ειδικά για το Ουράνιο, οι επιπτώσεις από κατάποση είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες από εισπνοή, διότι τα αντίστοιχα αερολύματα είναι αδιάλυτα. Άρα, η κύρια επίπτωση θα προέλθει από την κατανάλωση φυτών στα φύλλα των οποίων έχουν εναποτεθεί ραδιενεργά υλικά τόσο κατά το πέρασμα του νέφους όσο και κατά τις διάφορες επαναιωρήσεις.

Η κατανάλωση των μολυσμένων αυτών τροφών δεν περιορίζεται μόνο στα άτομα που βρίσκονται στην περιοχή, όπου συνέβη το ατύχημα, αλλά και στον ευρύτερο πληθυσμό, γιατί τα μολυσμένα αυτά προϊόντα μπορεί να μεταφερθούν και σε άλλες περιοχές.

Αφού πρώτα υπολογίσουμε την ποσότητα του ραδιενεργού υλικού, που έχει εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της τροφής, μπορούμε στη συνέχεια να καθορίσουμε τη δόση, μέσω πολλαπλασιασμού της ποσότητας αυτής με τον παράγοντα μετατροπής δόσης για την κατάποση [Eckerman et al., 1988 – Eckerman & Rymann, 1993].

3.4.2 Οδοί εξωτερικής έκθεσης

I) Έκθεση από το νέφος

Κατά την πρώιμη φάση πυρηνικού ατυχήματος, ο πληθυσμός που βρίσκεται κάτω από το ραδιενεργό νέφος δέχεται σημαντική δόση ακτινοβολίας- γ .

Για τον υπολογισμό της δόσης αυτής θεωρούμε ότι το ραδιενεργό υλικό έχει κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε μια άπειρη έκταση πάνω από την επιφάνεια της γης. Για μια συγκεκριμένη θέση (x,y) κάτω από το νέφος η δόση ακτινοβολίας γ που θα δεχτεί ο άνθρωπος είναι:

$$D_{EC,OG}(x, y) = \sum_k X_{air,k} g_{EC,OG,k} K(x, y) \quad (3.16)$$

όπου:

$D_{EC,OG}$ η ραδιενεργός δόση του οργάνου από την έκθεση στο νέφος [Sv],

$X_{air,k}$ η ολοκληρωμένη συγκέντρωση στον αέρα του νουκλιδίου k [Bq · s · m⁻³],

$K(x, y)$ ο συντελεστής διόρθωσης του νέφους,

$g_{EC,OG,k}$ ο παράγοντας μετατροπής δόσης για την εξωτερική έκθεση από το νέφος, για το όργανο OG και το νουκλιδίου k [Sv/(Bq · s · m⁻³)].

Στην περίπτωση υπολογισμού της δόσης, που θα δεχτεί ο ανήλικος πληθυσμός, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη και οι παράγοντες διόρθωσης. Στον Πίνακα 3.11 [KfK, 1991] δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών διόρθωσης για τις διάφορες ηλικίες. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη είναι η ηλικία του ανθρώπου τόσο μεγαλύτερη είναι η δόση ραδιενέργειας που θα δεχτεί. Οι παράγοντες μετατροπής δόσης $g_{OG,k}$ λαμβάνονται από τη σχετική βιβλιογραφία [Jacobi et al, 1990]. Στον Πίνακα 3.12 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές που έχουν οι παράγοντες μετατροπής δόσεων για τους ενήλικες και για συγκεκριμένα νουκλίδια.

Πίνακας 3.11 Συντελεστές διόρθωσης

Ηλικία	Συντελεστής διόρθωσης
0	1.5
1	1.5
5	1.4
10	1.3
15	1.15
20	1.0

Πίνακας 3.12 Παράγοντες μετατροπής δόσης για την έκθεση από ραδιενεργό νέφος [Sv/(Bq·s· m⁻³)]

Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός δόση
⁸⁸ Kr	9.5 · 10 ⁻¹⁴	1.1 · 10 ⁻¹³	1.0 · 10 ⁻¹⁴
¹⁰³ Ru	2.1 · 10 ⁻¹⁴	2.5 · 10 ⁻¹⁴	2.2 · 10 ⁻¹⁴
¹⁰⁶ Ru	9.2 · 10 ⁻¹⁵	1.1 · 10 ⁻¹⁴	9.7 · 10 ⁻¹⁵
¹³² Te	8.9 · 10 ⁻¹⁵	1.1 · 10 ⁻¹⁴	9.8 · 10 ⁻¹⁵
¹³¹ I	1.7 · 10 ⁻¹⁴	2.1 · 10 ⁻¹⁴	1.8 · 10 ⁻¹⁴
¹³⁵ I	7.6 · 10 ⁻¹⁴	9.2 · 10 ⁻¹⁴	7.9 · 10 ⁻¹⁴
¹³³ Xe	9.8 · 10 ⁻¹⁶	1.6 · 10 ⁻¹⁵	1.4 · 10 ⁻¹⁶
¹³⁵ Xe	1.0 · 10 ⁻¹⁴	1.3 · 10 ⁻¹⁴	1.1 · 10 ⁻¹⁴
¹³⁴ Cs	7.3 · 10 ⁻¹⁴	8.9 · 10 ⁻¹⁴	7.6 · 10 ⁻¹⁴
¹³⁷ Cs	2.5 · 10 ⁻¹⁴	3.0 · 10 ⁻¹⁴	2.7 · 10 ⁻¹⁴

II) Μόλυνση του δέρματος

Μέρος του ραδιενεργού υλικού εναποτίθεται στο δέρμα και στα ενδύματα του ανθρώπου. Οι συνθήκες εναπόθεσης, που περιλαμβάνουν το είδος των ενδυμάτων, το ποσοστό του σώματος που είναι ακάλυπτο και ο τρόπος εναπόθεσης της μόλυνσης, δηλαδή υγρή ή ξηρή, είναι αυτές που καθορίζουν το μέγεθος της ραδιενεργού δόσης, που θα δεχτεί τελικά ο ανθρώπινος πληθυσμός. Η μόλυνση του δέρματος προκαλείται κυρίως από τα νουκλίδια που εκπέμπουν ακτινοβολία-β η οποία έχει τέτοιες φυσικές ιδιότητες που της επιτρέπουν να διεισδύει στην ύλη με μεγάλη ευκολία. Αντίθετα, τα σωματίδια-α, όταν προσπίπτουν στην ύλη επιβραδύνονται και δεν κατορθώνουν να διαπεράσουν την επιδερμίδα. Συνεπώς, η ακτινοβολία-α δεν είναι επικίνδυνη για τα εσωτερικά όργανα του ανθρώπινου σώματος. Επιπλέον, η δόση από ακτινοβολία-γ, που προήλθε από νουκλίδια τα οποία επικάθησαν στο δέρμα είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν που προκαλείται από την ακτινοβολία-β.

Συμπερασματικά, η ραδιενεργός δόση δέρματος από ακτινοβολία-β που συσσωρεύεται σε ένα χρονικό διάστημα T δίνεται από τη σχέση

$$D_{SK}^T(x, y) = f_{SK} \sum_k X_{GR,k}(x, y) \int_0^T g_{SK,k} \exp(-\lambda t) dt \quad (3.17)$$

όπου:

- D_{SK}^T η δόση ακτινοβολίας-β του δέρματος [Sv],
 $X_{GR,k}$ η αρχική συγκέντρωση του νουκλιδίου k στο έδαφος [Bq/m²],
 f_{SK} ο παράγοντας διόρθωσης που μετατρέπει τη μόλυνση του εδάφους σε μόλυνση του δέρματος,
 $g_{SK,k}$ ο παράγοντας μετατροπής δόσης [Sv·s⁻¹/Bq·m⁻²] του δέρματος για την ακτινοβολία-β,
 λ η αποτελεσματική σταθερά διάσπασης που εξετάζει τη ραδιενεργό διάσπαση λ_r [s⁻¹] και τη βιολογική ημιζωή της μόλυνσης του δέρματος λ_b [s⁻¹] και δίνεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{\lambda_r \lambda_b}{\lambda_r + \lambda_b} \quad (3.18)$$

Χαρακτηριστικές τιμές για τους παράγοντες μετατροπής δόσης g_{SK} , για συγκεκριμένα νουκλίδια παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13 [KfK, 1991].

Πίνακας 3.13 Παράγοντες μετατροπής δόσης για μόλυνση του δέρματος [(Sv·s⁻¹)/(Bq·m⁻²)]

Νουκλίδιο	Ακτινοβολία-β	Ακτινοβολία-γ
⁸⁸ Rb	2·10 ⁻¹⁰	1·10 ⁻¹¹
⁹⁰ Sr	5·10 ⁻¹⁰	—
¹⁰³ Ru	2·10 ⁻¹⁰	9·10 ⁻¹²
¹⁰⁶ Ru	4·10 ⁻¹⁰	4·10 ⁻¹²
¹³² Te	2·10 ⁻¹⁰	5·10 ⁻¹²
¹³¹ I	4·10 ⁻¹⁰	7·10 ⁻¹²
¹³⁵ I	4·10 ⁻¹⁰	3·10 ⁻¹²
¹³⁴ Cs	3·10 ⁻¹⁰	3·10 ⁻¹¹
¹³⁷ Cs	4·10 ⁻¹⁰	—

III) Έκθεση από το έδαφος

Για τον υπολογισμό της δόσεως που προκύπτει από εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία-γ από τα νουκλίδια που επικάθισαν στο έδαφος, θεωρούμε και πάλι ότι το ραδιενεργό υλικό έχει κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο επίπεδο του εδάφους. Οι δόσεις των οργάνων από την ακτινοβολία-γ υπολογίζονται από τη σχέση

$$D_{EC,OG}^T(x,y) = \sum_k X_{GR,k} g_{EC,OG,K}^T K(x,y) \quad (3.19)$$

όπου:

$D_{EC,OG}^T$ η ολοκληρωμένη δόση του οργάνου OG, στο χρόνο T από την εναπόθεση του νουκλιδίου [Sv],

$X_{GR,k}$ η αρχική συγκέντρωση του νουκλιδίου k στην επιφάνεια του εδάφους [Bq/m^2],

$g_{EC,OG,K}^T$ ο παράγοντας μετατροπής δόσης για την ακτινοβολία-γ από το έδαφος, για το συγκεκριμένο όργανο OG και νουκλίδιο k, ολοκληρωμένος στον χρόνο T [$Sv/(Bq\ m^{-2})$].

Στον Πίνακα 3.14 παρουσιάζονται οι τιμές για τους παράγοντες μετατροπής δόσης, για διάφορους τύπους νουκλιδίων και χρόνους ολοκλήρωσης όπως έχουν δημοσιευθεί [Panitz et al, 1989]. Οι συντελεστές διόρθωσης για τις διαφορές ηλικίας δίνονται στον Πίνακα 3.15 [KfK, 1991].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Briggs G.A.: Diffusion Estimation for Small Emissions Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, (1973)
- Datz D., Pantel R.H., Environmental Modeling: Analysis and Management, Dowden, Hutchinson and Ross, (1974)
- Dobbins R.A.: Atmospheric Motion and Air Pollution, John Wiley and Sons, (1979)
- Eckerman K.F., Wolbarst A.B. and Richardson A.C.B., Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, (1988)
- Eckerman K.F., and Ryman J.C.: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, (1993)
- Gifford F.A.: Turbulent Diffusion – typing schemes: a review, Nuclear Safety, (1976)
- Irwin J.I.: A Theoretical Variation of the Wind Profile Power Law Exponent as a Function of Surface Roughness and Stability, Atmos. Environ, (1979)
- Jacobi W., Paretzke H.G. and Henrichs K.: Dosisfaktoren für Inkorporierte Radionuclide und Kontamination der Haut, GSF – Report 14/89, (1989)
- Jacobi W., Paretzke H., Jacob P. and Meckbach R.: Externe Strahlenexposition, Report GSG – 13/89, issn 0721 – 1694, (1990)
- KfK, COSYMA: A New Programme Package for Accident Consequence Assessment, EUR 13028, CEC Brussels, (1991)
- Milford J.B., and Davidson D.I.J.: Air Pollution Control Assoc. 35, 1249, (1985)

- Nicolaou G.: Relative radiological impact from a reactor accident in the case of emerging nuclear fuels. Health Physics Journal 97, p. 157, (2009)
- Panitz H.J., Matzerath C. and Pasler – Saurer J., UFOMOD: Atmospheric Dispersion and Deposition, Report KfK – 4332, (1989)
- Phipps A.W., Kendall G.M., Stather J.W. and Fell T.P.: Committed Equivalent Organ Doses and Committed Effective Doses from Intakes of Radionuclides, (1991)
- Schoor L. J.: Environmental Modeling Fate and Transport of Pollutants in Water Air and Soil, University of Iowa, Iowa, (1976)
- Slade D.H.: Meteorology and Atomic Energy, Washington DC, (1968)

Πίνακας 3.14 Παράγοντες μετατροπής για την έκθεση από το έδαφος
[Sv/(Bq·m⁻²)]

Χρόνος ολοκλήρωσης 1d			
Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός Δόση
¹⁰³ Ru	2.7·10 ⁻¹¹	3.2·10 ⁻¹¹	2.8·10 ⁻¹¹
¹⁰⁶ Ru	1.2·10 ⁻¹¹	1.4·10 ⁻¹¹	1.2·10 ⁻¹¹
¹³² Te	1.1·10 ⁻¹⁰	1.3·10 ⁻¹⁰	1.1·10 ⁻¹⁰
¹³¹ I	2.2·10 ⁻¹¹	2.6·10 ⁻¹¹	2.3·10 ⁻¹¹
¹³⁵ I	3.4·10 ⁻¹¹	4.1·10 ⁻¹¹	3.5·10 ⁻¹¹
¹³⁴ Cs	8.6·10 ⁻¹¹	1.0·10 ⁻¹⁰	8.8·10 ⁻¹¹
¹³⁷ Cs	3.1·10 ⁻¹¹	3.7·10 ⁻¹¹	3.2·10 ⁻¹¹
Χρόνος ολοκλήρωσης 7d			
Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός Δόση
¹⁰³ Ru	1.8·10 ⁻¹⁰	2.1·10 ⁻¹⁰	1.8·10 ⁻¹⁰
¹⁰⁶ Ru	8.0·10 ⁻¹¹	9.4·10 ⁻¹¹	8.2·10 ⁻¹¹
¹³² Te	5.0·10 ⁻¹⁰	5.9·10 ⁻¹⁰	5.1·10 ⁻¹⁰
¹³¹ I	1.2·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	1.5·10 ⁻¹⁰
¹³⁵ I	4.0·10 ⁻¹¹	4.7·10 ⁻¹¹	4.1·10 ⁻¹¹
¹³⁴ Cs	6.0·10 ⁻¹⁰	7.0·10 ⁻¹⁰	6.1·10 ⁻¹⁰
¹³⁷ Cs	2.2·10 ⁻¹⁰	2.6·10 ⁻¹⁰	2.2·10 ⁻¹⁰
Χρόνος ολοκλήρωσης 7d			
Νουκλίδιο	Μυελός των οστών	Θυρεοειδής	Ενεργός Δόση
¹⁰³ Ru	1.8·10 ⁻¹⁰	2.1·10 ⁻¹⁰	1.8·10 ⁻¹⁰
¹⁰⁶ Ru	8.0·10 ⁻¹¹	9.4·10 ⁻¹¹	8.2·10 ⁻¹¹
¹³² Te	5.0·10 ⁻¹⁰	5.9·10 ⁻¹⁰	5.1·10 ⁻¹⁰
¹³¹ I	1.2·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	1.5·10 ⁻¹⁰
¹³⁵ I	4.0·10 ⁻¹¹	4.7·10 ⁻¹¹	4.1·10 ⁻¹¹
¹³⁴ Cs	6.0·10 ⁻¹⁰	7.0·10 ⁻¹⁰	6.1·10 ⁻¹⁰
¹³⁷ Cs	2.2·10 ⁻¹⁰	2.6·10 ⁻¹⁰	2.2·10 ⁻¹⁰

Πίνακας 3.15 Συντελεστές πολλαπλασιασμού

Ηλικία (yr)	Συντελεστής διόρθωσης
0	1.8
1	1.8
5	1.5
10	1.4
15	1.15
20	1.0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΩΔΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ

Ένα πυρηνικό ατύχημα έχει ως αποτέλεσμα τη διαρροή ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα ή στο υδάτινο περιβάλλον και, ως επακόλουθο, πιθανές σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο [Nicolau, 2010]. Οι υπολογισμοί των επιπτώσεων (ραδιενεργές δόσεις) γίνονται μέσω της εκτίμησης της πηγής εκπομπής (source term), των μετεωρολογικών συνθηκών μετά το ατύχημα, καθώς και του ελέγχου και της παρακολούθησης του περιβάλλοντος (monitoring) (Σχήμα 4.1).

4.1 Υπολογισμός πηγής εκπομπής

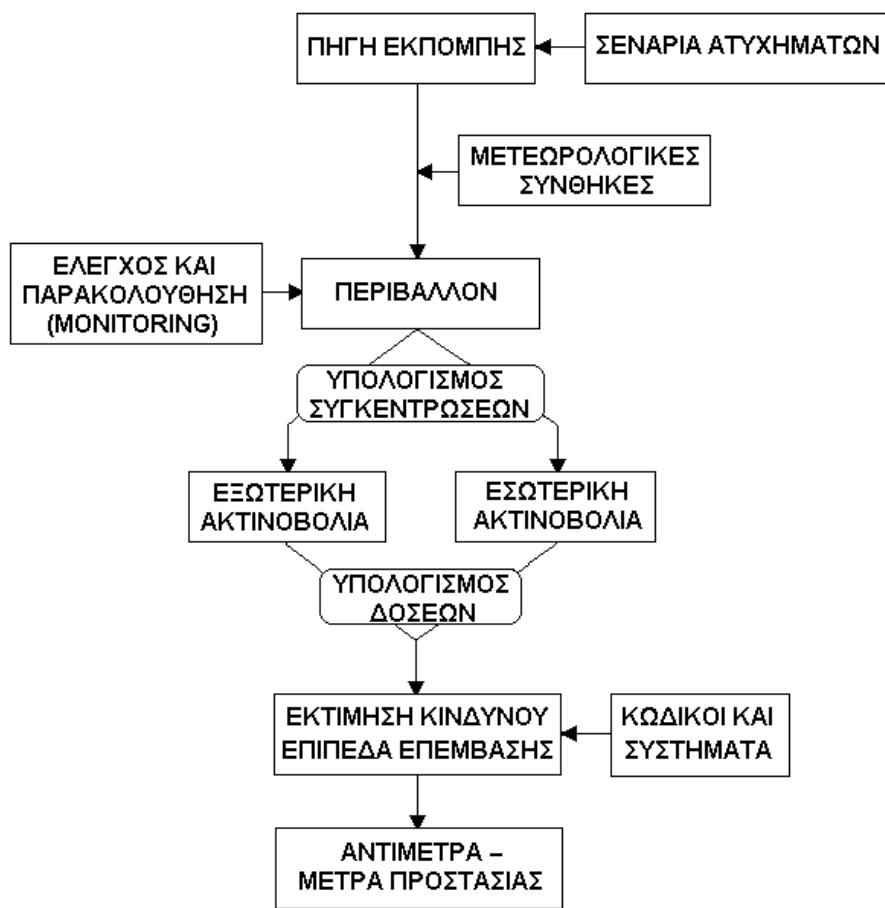
Η ραδιενέργεια ανά νουκλίδιο, που εκλύεται στο περιβάλλον μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα, ονομάζεται πηγή εκπομπής και καθορίζεται από:

- το απόθεμα των νουκλιδίων στον πυρήνα του αντιδραστήρα τη στιγμή του ατυχήματος, δηλαδή η ραδιενέργεια των ακτινίδων και των προϊόντων σχάσης, που υπάρχουν στον αντιδραστήρα στη συγκεκριμένη στιγμή της λειτουργίας του που συμβαίνει το ατύχημα, και
- το ποσοστό του αποθέματος που μπορεί να διαφύγει στο περιβάλλον ως συνέπεια του ατυχήματος.

Στην περίπτωση του ατυχήματος στο Chernobyl, το ποσοστό του αποθέματος του αντιδραστήρα που διέρρευσε στην ατμόσφαιρα ήταν [Devvel et al., 1995 - Soffer et al., 1995 – UNSCEAR, 2000]: ^{90}Sr 5%, ^{140}Ba 5.6%, ^{103}Ru 3%, ^{106}Ru 3%, ^{131}I 40%, ^{134}Cs 40%, ^{137}Cs 40%. Το απόθεμα αυτό εξαρτάται από την αρχική σύσταση του πυρηνικού καυσίμου του αντιδραστήρα και το ιστορικό της ακτινοβόλησης του καυσίμου (περίοδος ακτινοβόλησης, φάσμα νετρονίων, ισχύς αντιδραστήρα, τελική εξάντληση καυσίμου).

Οι επιπτώσεις από την πηγή εκπομπής καθορίζονται από:

- τις παραμέτρους που συνδέονται με τη διασπορά των νουκλιδίων στο περιβάλλον και περιλαμβάνουν τη θέση του σημείου, το ύψος, την περιεκτικότητα σε ραδιενέργεια, τη χρονική στιγμή, την ογκομετρική ροή και την ταχύτητα εξόδου της έκλυσης,
- τις παραμέτρους που συνδέονται με τις διαδικασίες εναπόθεσης και μείωσης του ραδιενεργού νέφους (πλουμίου) στον αέρα, όπως τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ευγενών αερίων, του στοιχειακού ή του οργανικού ιωδίου και των μικροσωματιδίων (aerosol),
- τις παραμέτρους που συνδέονται με την έκθεση σε ακτινοβολία, όπως η ισοτοπική σύνθεση.



Σχήμα 4.1 Τα στάδια εκτίμησης πυρηνικού ατυχήματος

4.1.1 Ο κώδικας *ORIGEN*

Το απόθεμα στον πυρήνα του αντιδραστήρα μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση κωδικών υπολογισμού. Ξεκινώντας από ένα δεδομένο αρχικό καύσιμο στον πυρηνικό αντιδραστήρα μπορεί να καθοριστεί η αλλαγή των αρχικών συγκεντρώσεων των νουκλιδίων, η οποία προκαλείται από αντιδράσεις με τα νετρόνια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα και με τη ραδιενεργό διάσπαση των νουκλιδίων.

Παραδείγματα τέτοιων κωδικών είναι ο *ORIGEN* (*Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code*) [Croff, 1980 και 1983] και ο *SCALE* (*Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation*) [Scale, 1995]. Ο πρώτος είναι μηδενικής διάστασης, δηλαδή σημειακός κώδικας. Ο δεύτερος είναι τρισδιάστατος συνδυάζοντας τους κώδικες *MCNP-5* (*Monte Carlo N-Particle*) [X-5 Monte Carlo Team, 2003] για τη διάχυση (φάσμα) των νετρονίων στον αντιδραστήρα εφαρμόζοντας τον *ORIGEN* σε κάθε σημείο του.

Ο *ORIGEN* είναι ένας σημειακός κώδικας που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των κύκλων πυρηνικού καυσίμου και τον υπολογισμό της σύστασης και των χαρακτηριστικών των νουκλιδίων που περιέχονται στο

πυρηνικό καύσιμο. Τα κυριότερα φαινόμενα που εξετάζονται με αυτόν είναι οι αντιδράσεις με νετρόνια, δηλαδή σκέδαση [(n,n), (n, n')], σχάση (n, f) και αρπαγή (n, γ), καθώς και η ραδιενεργός διάσπαση.

Η λειτουργία του ORIGEN είναι ο υπολογισμός της σύστασης του καυσίμου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή με: -τη χρήση βάσεων δεδομένων που απαιτούνται (βάσεις διάσπασης, ενεργών διατομών, παραγωγή προϊόντων σχάσης και εκπομπής φωτονίων και νετρονίων), -την αρχική σύσταση του καυσίμου, -το ιστορικό της ακτινοβόλησής του (για συγκεκριμένο αντιδραστήρα). Τα χαρακτηριστικά του πυρηνικού καυσίμου, που μπορούν να υπολογιστούν από τον ORIGEN είναι:

- η μάζα των στοιχείων (συγκεντρώσεις),
- η σύσταση των νουκλιδίων σε ποσοστό του κάθε στοιχείου,
- η ραδιενέργεια (ακτινοβολία-α και -γ),
- η θερμική ενέργεια σε (ανακτηθείσα ενέργεια),
- η τοξικότητα:
 - κατάποσης (ραδιενεργός και χημική) σε m³ ύδατος που απαιτούνται, για να διαλυθεί το νουκλίδιο και να είναι η τοξικότητα σε αποδεκτά επίπεδα,
 - εισπνοής (ραδιενεργός) σε m³ αέρα που απαιτούνται για να διαλυθεί το νουκλίδιο και να είναι η τοξικότητα σε αποδεκτά επίπεδα,
- η εκπομπή των νετρονίων ανά μονάδα χρόνου που προκαλείται από:
 - την αυτογενή σχάση,
 - την αντίδραση (α,n),
- η εκπομπή των φωτονίων ανά μονάδα χρόνου με τον αριθμό τους σε 18 διαφορετικές ενεργειακές ομάδες.

Περιγραφή της μεθόδου υπολογισμού

Το πρόβλημα που λύνεται με τον ORIGEN είναι η εύρεση του ρυθμού με τον οποίο η ποσότητα (συγκέντρωση) του νουκλιδίου i αλλάζει σε συνάρτηση με το χρόνο (=dN_i/dt). Αυτός ο ρυθμός περιγράφεται από μια ανομοιογενή συνήθη διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης:

$$dN_i / dt = \sum_{j=1}^M l_{ij} \lambda_j N_j + \Phi \sum_{k=1}^M f_{ik} \sigma_k N_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) N_i + F_i \quad i = 1, \dots, M \quad (4.1)$$

όπου:

N_i πυκνότητα ατόμων του νουκλιδίου i ,

M αριθμός νουκλιδίων,

l_{ij} ποσοστό των διασπάσεων του νουκλιδίου j , που οδηγούν στο σχηματισμό του νουκλιδίου i ,

λ_i σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του νουκλιδίου i ,

λ_j σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του νουκλιδίου j ,

Φ	ροή νετρονίων,
f_{ik}	ποσοστό απορρόφησης νετρονίων από το νουκλίδιο k , που οδηγεί στο σχηματισμό του νουκλιδίου i ,
σ_k	μέση ενεργός διατομή απορρόφησης για το νουκλίδιο k ,
σ_i	μέση ενεργός διατομή απορρόφησης για το νουκλίδιο i .

Δεδομένου ότι εξετάζονται N νουκλίδια, υπάρχουν N εξισώσεις της ίδιας γενικής μορφής, μία για κάθε νουκλίδιο. Η ταυτόχρονη επίλυση (ολοκλήρωση) αυτών των εξισώσεων με τον κώδικα ORIGEN δίνει τις ποσότητες του κάθε νουκλιδίου, (N_i) που υπάρχουν στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος (διάστημα ολοκλήρωσης).

Οι δύο πρώτοι παράγοντες της Εξίσωσης 4.1 περιγράφουν τον σχηματισμό του νουκλιδίου i από τη ραδιενεργό διάσπαση των νουκλιδίων j με εκπομπή ακτινοβολίας- α και - β και από την απορρόφηση νετρονίων από το νουκλίδιο k αντίστοιχα. Ο τρίτος παράγοντας είναι η μείωση του νουκλιδίου i μέσω της ραδιενεργού διάσπασής του και της αντίδρασης με νετρόνια.

Βάσεις δεδομένων εισόδου

Ο κώδικας ORIGEN χρησιμοποιεί τρεις τύπους βάσεων δεδομένων εισόδου:

1. Βάση δεδομένων ραδιενεργού διάσπασης

Απαιτείται για όλους τους υπολογισμούς του ORIGEN και παρέχει τις εξής πληροφορίες:

- Τις ημιζωές διάσπασης και τα κλάσματα διάσπασης για:
 - διάσπαση με εκπομπή ακτινοβολίας- β σε σταθερές καταστάσεις και σε καταστάσεις διέγερσης,
 - διάσπαση από τη σύλληψη ποζιτρονίου και ηλεκτρονίου σε σταθερές καταστάσεις και σε καταστάσεις διέγερσης,
 - διάσπαση με εκπομπή ακτινοβολίας- α ,
 - διάσπαση ή σχάση με εκπομπή νετρονίων,
 - διάσπαση με εκπομπή καθυστερημένων νετρονίων.
- Την παραγόμενη θερμότητα ανά διάσπαση για κάθε νουκλίδιο.
- Την μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση (MPC, Maximum Permissible Concentration) των νουκλιδίων κατά την εισπνοή και κατάποση.

2. Βάση δεδομένων φωτονίων

Παρέχει τον αριθμό των φωτονίων ανά διάσπαση σε διάρθρωση 18 ενεργειακών ομάδων. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός πίνακα, που δίνει τον αριθμό των φωτονίων τα οποία εκπέμπονται και το ποσοστό της ενέργειας της εκπομπής φωτονίων της καθεμιάς από τις 18 ενεργειακές ομάδες. Οι τύποι των φωτονίων που περιέχονται στη βάση δεδομένων είναι ακτίνες- γ , ακτίνες- x , ακτίνες- γ από πυρηνικές αντιδράσεις, ακτίνες- γ από προϊόντα σχάσης και bremsstrahlung.

3. Βάση δεδομένων ενεργών διατομών (ENDF/B-V)

Αυτή η βάση δεδομένων δημιουργήθηκε για να προμηθεύσει στον ORIGEN τις ενεργές διατομές και τις παραγωγές των προϊόντων σχάσης [ENDF/B-V, 1979]. Οι τύποι των ενεργών διατομών που περιλαμβάνονται είναι: (n,γ), (n,2n) και (n,fission) για ακτινίδες και, τέλος, (n,γ) για ραδιενεργά προϊόντα και προϊόντα σχάσης [Rose, 1991 – Sasahara et al., 2008 a & b].

Οι τύποι των αντιδραστήρων για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμες βιβλιοθήκες είναι για αντιδραστήρες:

- PWR και BWR με κύκλο καυσίμου U και U-Pu,
- PWR με εναλλακτικό κύκλο καυσίμου (καύσιμο βασισμένο στο θόριο και παρατεταμένη καύση),
- CANDU, με κύκλο καυσίμου U,
- LMFBR με κύκλο καυσίμου U-Pu,
- LMFBR με κύκλο καυσίμου Th.

4.2 Ο κώδικας RASCAL

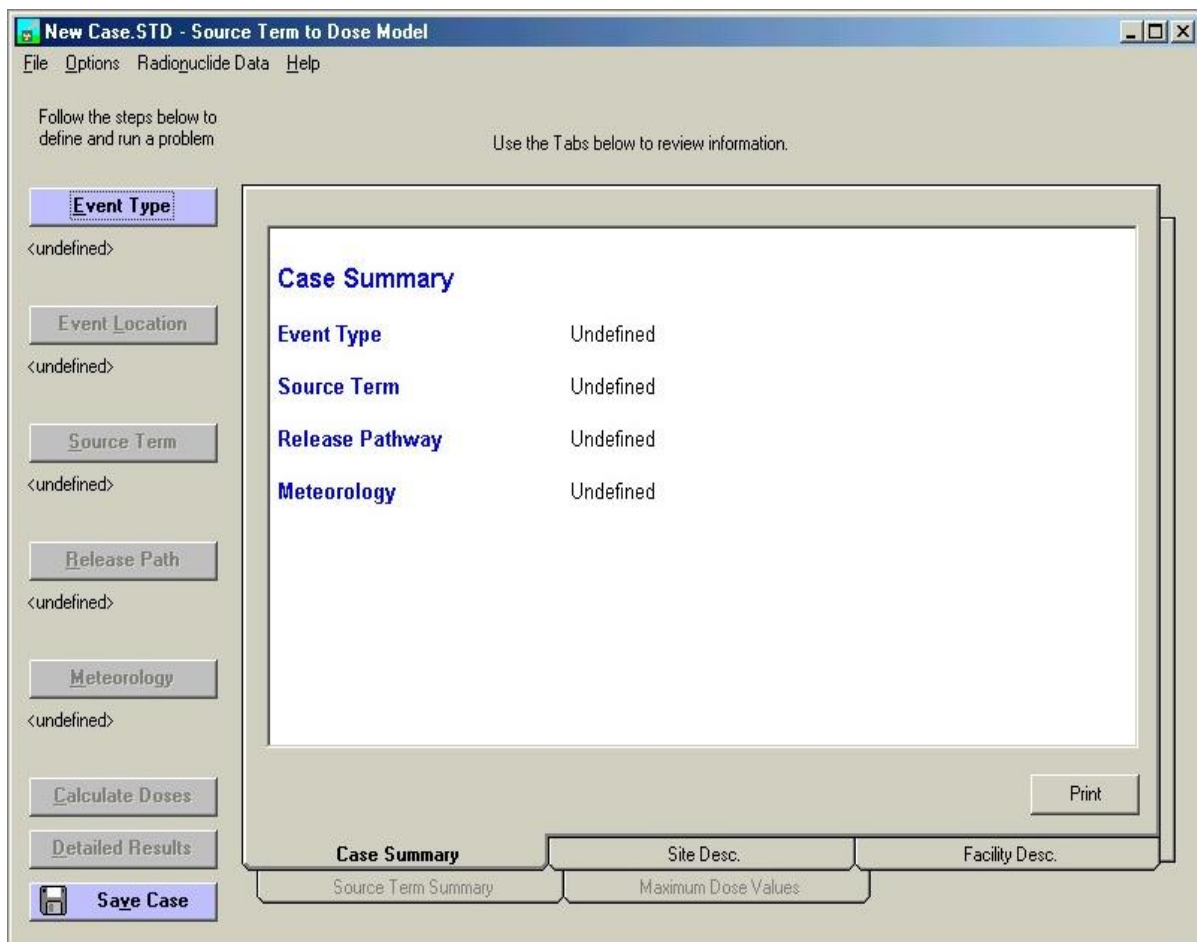
Ο κώδικας RASCAL (*Radiological Assessment System for Consequence Analysis*) [Athey, 1993] είναι ένας κώδικας αξιολόγησης και εκτίμησης των λογικών επιπτώσεων ενός πυρηνικού ατυχήματος. Ο κώδικας είναι διαθέσιμος στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας και περιγράφεται σε λεπτομέρειες, διότι θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια του μαθήματος. Άλλοι κώδικες είναι ο COSYMA (*Code System for Methods for Assessing the Radiological Impact of Accidents*) [KfK, 1991], ο MACCS (*Melcor Accident Consequence Code System*) [Chanin et al., 1990].

Ο RASCAL περιλαμβάνει 4 ομάδες εργαλείων, την STDose, την FMDose, την DecayCalc και την MetProc για την ανάλυση των συνεπειών μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα. Η STDose (Source Term-to-Dose model) υπολογίζει: (α) την πηγή εκπομπής κάποιου ατυχήματος, β) την ατμοσφαιρική μεταφορά, τη διάχυση και την απόθεση των ραδιενεργών υλικών που εκλύθηκαν από την πυρηνική εγκατάσταση και γ) τις δόσεις από την έκθεση στα υλικά αυτά. Η FMDose (Field Measurement-to-Dose model), υπολογίζει τη δραστηριότητα του ραδιενεργού υλικού στον αέρα και στο έδαφος και εκτιμά τις δόσεις μέσω εργαστηριακών μετρήσεων. Η DecayCalc υπολογίζει τη ραδιενέργεια των νουκλιδίων σε ένα μελλοντικό χρόνο μετά από την έκλυσή τους στην ατμόσφαιρα. Τέλος, η MetProc (Meteorological Data Processor) είναι η ενότητα της STDose που χρησιμοποιείται για την είσοδο των μετεωρολογικών δεδομένων και προετοιμάζει τα δεδομένα για την επεξεργασία τους από τα μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς και διάχυσης, που χρησιμοποιεί ο κώδικας RASCAL.

4.2.1 Εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα

Για την εισαγωγή των δεδομένων, δηλαδή για τον καθορισμό του σεναρίου του ατυχήματος στο περιβάλλον της STDose, θα πρέπει να ακολουθηθούν τα 6 βήματα όπως αυτά υποδεικνύονται στην κυρία οθόνη του (Σχήμα 4.2). Η ακολουθία των βημάτων αυτών είναι:

1. Τύπος Γεγονότος (Event Type),
2. Τοποθεσία Γεγονότος (Event Location),
3. Πηγή Εκπομπής (Source Term),
4. Δίοδος Διαφυγής (Release Path),
5. Μετεωρολογικές Συνθήκες (Meteorology),
6. Υπολογισμός Δόσεων (Calculate Doses).



Σχήμα 4.2 Κύρια οθόνη της STDose

Event Type

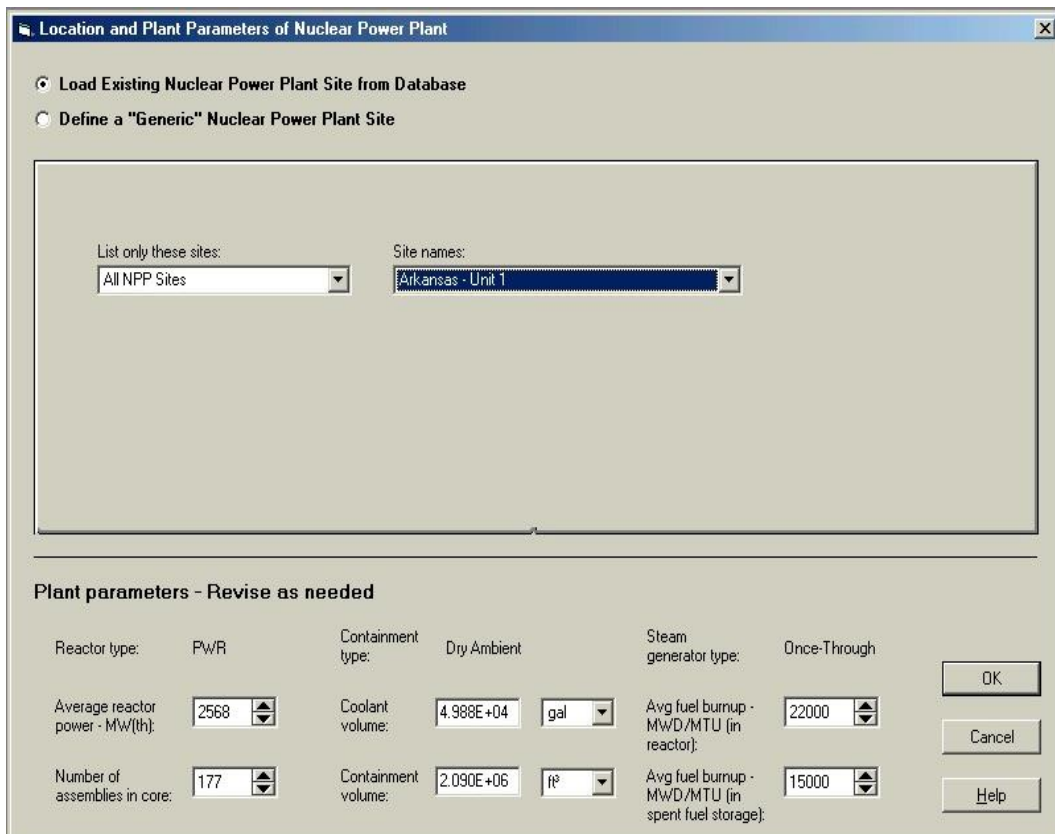
Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τύπος γεγονότος για τον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί από τον RASCAL μέσα από τους τέσσερις διαθέσιμους τύπους. Επειδή οι υπολογισμοί από τον κώδικα γίνονται προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα, θα πρέπει να επιλεγθεί το Nuclear Power Plant (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Επιλογή τύπου γεγονότος

Event Location

Στη συνέχεια ορίζεται η θέση, ο τύπος και οι παράμετροι του σταθμού παραγωγής πυρηνικής ενέργειας επιλέγοντας μία από τις προϋπάρχουσες επιλογές (αρχικό καύσιμο και ολική ποσότητα στην καρδιά, εξάντληση), που διαθέτει ο κώδικας (Σχήμα 4.4). Οι παράμετροι του πυρηνικού σταθμού είναι αυτοί που καθορίζουν το συνολικό ποσό της ραδιενέργειας, που θα είναι διαθέσιμη για διαφυγή, σε περίπτωση κάποιου ατυχήματος στις πυρηνικές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 4.4 Καθορισμός της τοποθεσίας και των παραμέτρων του πυρηνικού ατυχήματος

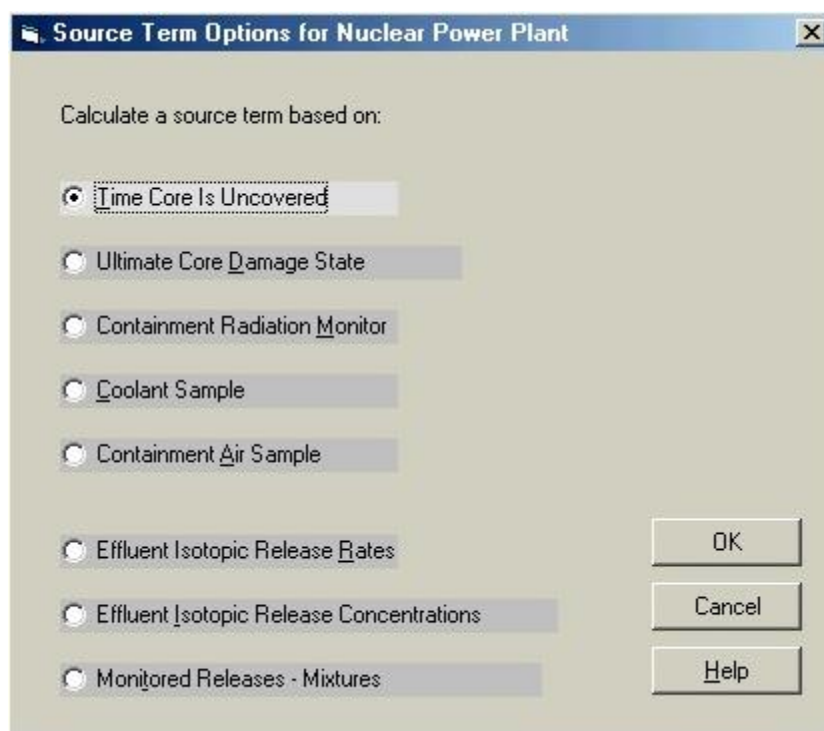
Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Αριθμός συστάδων καυσίμου που καθορίζει τη συνολική ποσότητα καυσίμων, τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της καρδιάς.
- Η εξάντληση του καυσίμου. Το μέγεθος αυτό είναι ενδεικτικό της κατανάλωσης του σχάσιμου υλικού του πυρηνικού καυσίμου στον αντιδραστήρα. Η ρύθμιση για την εξάντληση του καυσίμου εφαρμόζεται μόνο στα νουκλίδια που έχουν ημιζωή μεγαλύτερη από ένα έτος με υποθετική εξάντληση ίση με 18.000 MWD/MTU.

Υπάρχει, ακόμα, η δυνατότητα να ορισθεί η πυρηνική εγκατάσταση χωρίς να γίνει χρήση των προεπιλογών αυτών.

Source Term

Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται η πηγή εκπομπής του πυρηνικού ατυχήματος. Ο RASCAL διαθέτει οκτώ επιλογές (Σχήμα 4.5) για τον καθορισμό της πηγής εκπομπής: α) χρόνος αποκάλυψης του πυρήνα (Time Core Is Uncovered), β) ολική καταστροφή του πυρήνα (Ultimate Core Damage State), γ) έλεγχος ακτινοβολίας στο κτήριο συγκράτησης (Containment Radiation Monitor), δ) δείγμα ψυκτικού για ανάλυση (Coolant Sample), ε) δείγμα του αέρα στο κτήριο συγκράτησης (Containment Air Sample), στ) ρυθμός διαρροής ραδιενέργειας (Effluent Isotopic Release Rates), ζ) συγκέντρωση ραδιενέργειας που διαφεύγει (Effluent Isotopic Release Concentrations) και η) έλεγχος διαρροής (Monitored Releases – Mixtures).



Σχήμα 4.5 Καθορισμός της πηγής εκπομπής

Στην περίπτωση του Time Core Is Uncovered, η απελευθέρωση των ραδιενεργών ουσιών αρχίζει από τη χρονική στιγμή κατά την οποία παρουσιάζεται το πρόβλημα στην καρδιά του αντιδραστήρα. Ωστόσο, στην περίπτωση του Ultimate Core Damage State η απελευθέρωση του ραδιενεργού υλικού και οι μηχανισμοί μείωσής του αρχίζουν, όταν έχουμε την τελική κατάσταση (καταστροφή) της καρδιάς.

Ανάλογα τώρα με την πηγή εκπομπής, που έχει ορισθεί, θα πρέπει να εισαχθούν και κάποιες πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με αυτήν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6. Χρειάζεται, δηλαδή, να ορισθεί η χρονική στιγμή (ημέρα και ώρα) κατά την οποία η λειτουργία της καρδιάς του αντιδραστήρα σταματά, καθώς και η ζημία που έχει υποστεί.

Ultimate Core Damage State (Reactor Source Term)

Reactor shutdown? Yes 05/05/2006 10:00
 No

Ultimate core damage state: No core damage - normal coolant activity
 Increased fuel pin leakage
Coolant contamination spike by factor of 100
 Cladding failure (gap release) 100 percent
 Core melt 100 percent
 Vessel melt through

Completion of vessel melt through: 05/05/2006 16:48

OK
Cancel

Σχήμα 4.6 Καθορισμός παραμέτρων της πηγής εκπομπής

Release Path

Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τρόπος/δίοδος διαφυγής του ραδιενεργού υλικού από τον αντιδραστήρα. Για την περίπτωση του PWR, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.7, τρεις είναι οι διαθέσιμοι δίοδοι διαφυγής: α) διαρροή/καταστροφή κτιρίου συγκράτησης, β) διαρροή από τις σωληνώσεις της γεννήτριας ατμού και γ) παράκαμψη κτιρίου συγκράτησης. Στη συνέχεια (Σχήμα 4.8) εισάγονται τα χαρακτηριστικά της ραδιενεργούς απελευθέρωσης, δηλαδή το ύψος της εκλύσεως, η επίδραση ή όχι των κτηρίων στη ραδιενεργό μεταφορά και διάχυση, η χρονική στιγμή κατά την οποία αρχίζει η απελευθέρωση, καθώς και

το εάν οι μηχανισμοί περιορισμού (εγκλωβισμού), που διαθέτει το κτήριο συγκράτησης, είναι ενεργοί ή όχι.

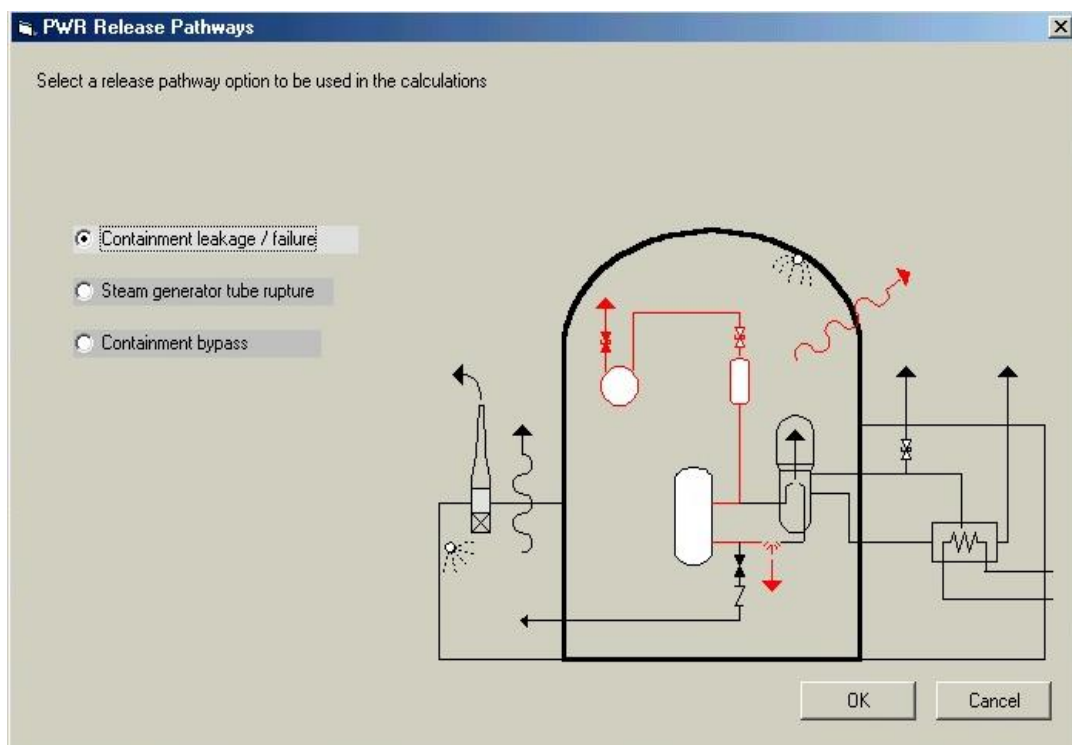
Meteorology

Η εισαγωγή των μετεωρολογικών συνθηκών, που επικρατούν κατά τη διάρκεια του ατυχήματος, γίνεται με τη χρήση των προκαθορισμένων μετεωρολογικών στοιχείων που διαθέτει ο RASCAL (Σχήμα 4.9).

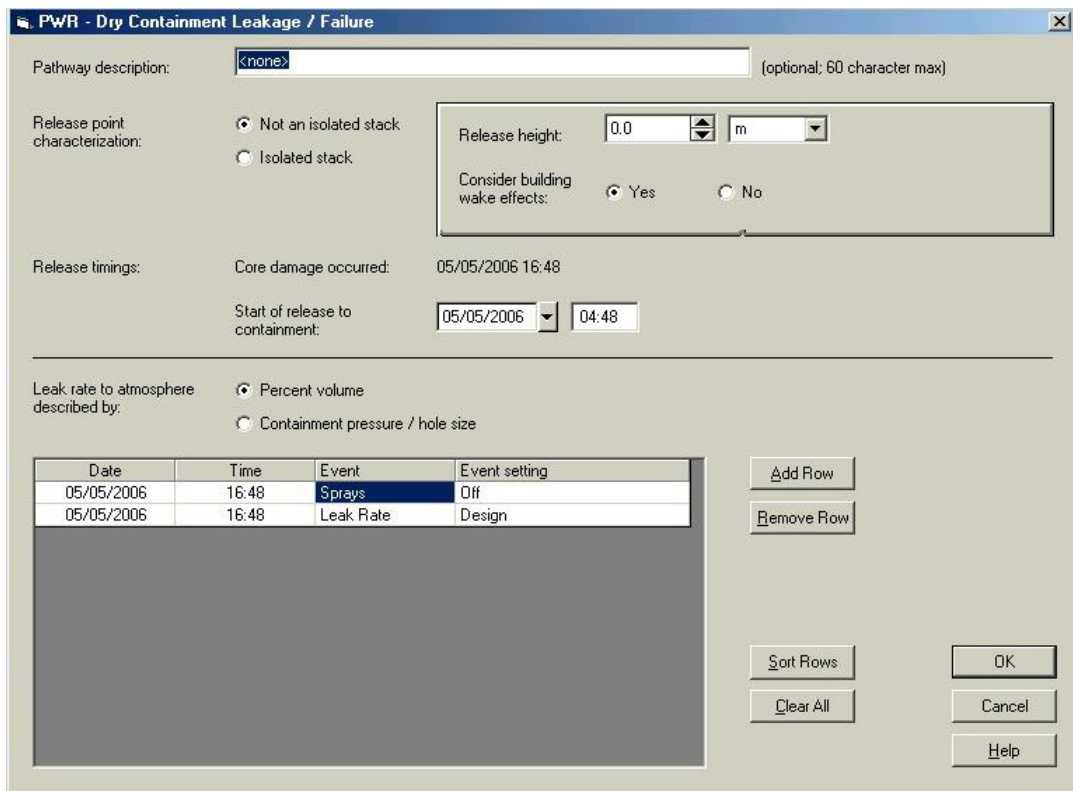
Calculate Doses

Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή των δεδομένων κρίνεται απαραίτητο να διευκρινιστεί το πόσο μακριά από το σημείο εκλύσεως του ραδιενεργού υλικού θα γίνουν οι υπολογισμοί των δόσεων, καθώς και η χρονική διάρκεια των υπολογισμών αυτών (Σχήμα 4.10).

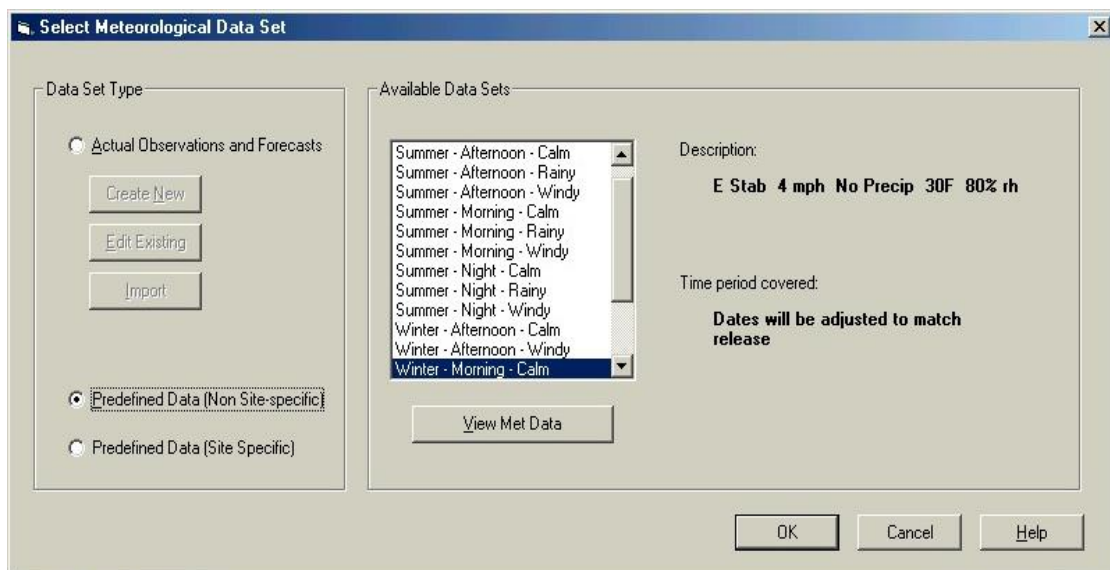
Ο κώδικας διαθέτει τέσσερις επιλογές για τον καθορισμό της απόστασης μέχρι την οποία θα γίνουν οι υπολογισμοί: α) περιοχή κοντά και μακριά μέχρι τα 16 km, β) περιοχή κοντά και μακριά μέχρι τα 40 km, γ) περιοχή κοντά και μακριά μέχρι τα 80 km και δ) κοντινή μόνο περιοχή μέχρι τα 3.2 km. Εάν η προκαθορισμένη από το χρήστη διάρκεια υπολογισμών είναι πολύ μικρή, οι δόσεις που θα υπολογιστούν θα έχουν μικρές τιμές, επειδή το ραδιενεργό νέφος δε θα προλάβει να διοχετεύσει την ραδιενέργεια, που μεταφέρει στο περιβάλλον.



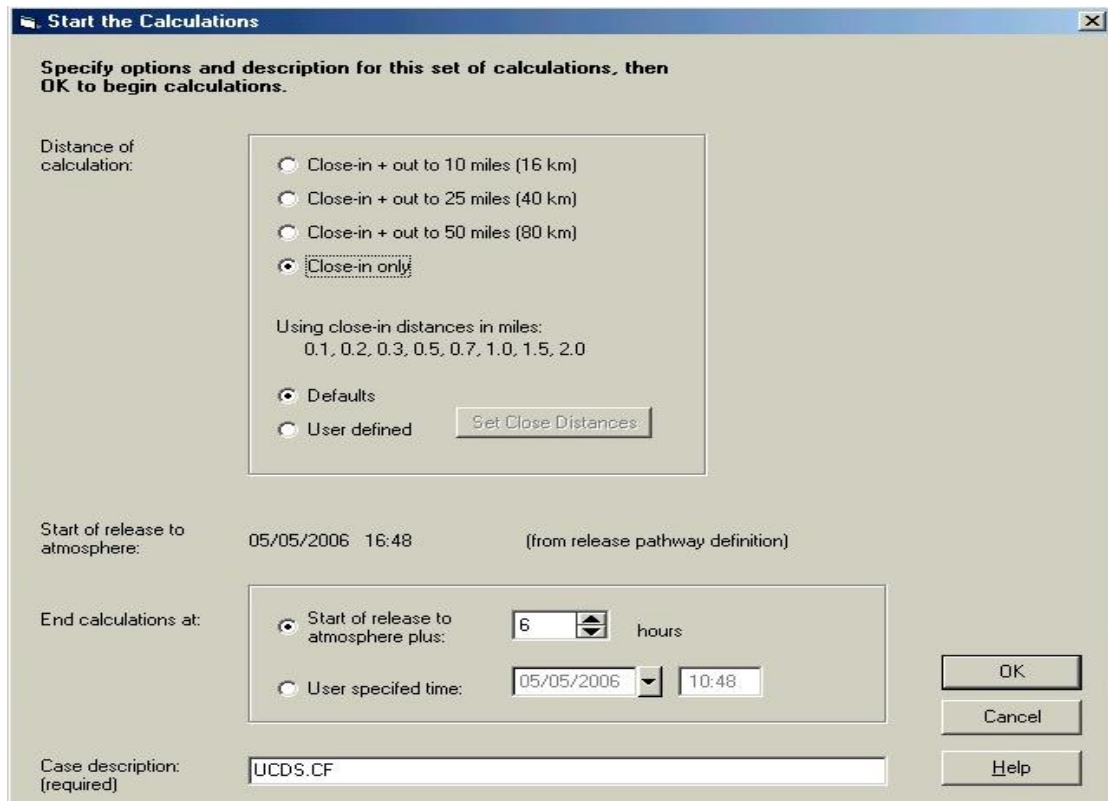
Σχήμα 4.7 Επιλογή της οδού διαφυγής



Σχήμα 4.8 Καθορισμός των χαρακτηριστικών της διαβάσεως απελευθέρωσης



Σχήμα 4.9 Επιλογή μετεωρολογικών συνθηκών



Σχήμα 4.10 Έναρξη υπολογισμών δόσεων

4.2.2 Έξοδος του RASCAL

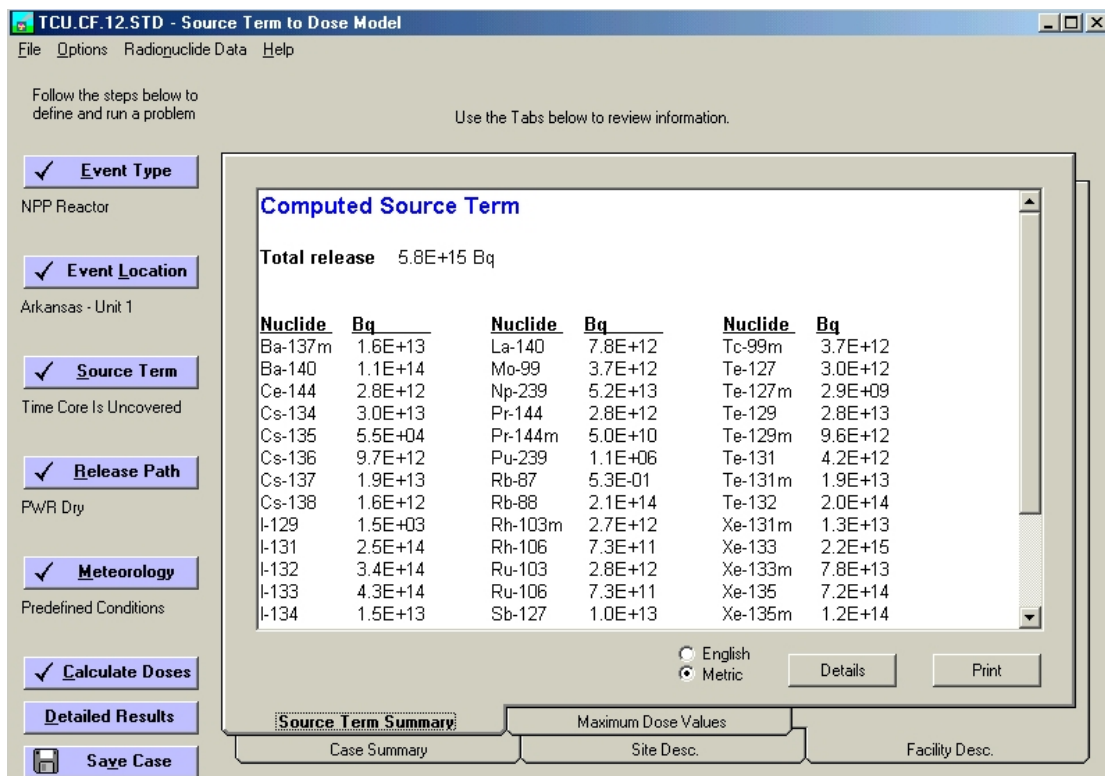
Στην έξοδο του RASCAL τα αποτελέσματα, με άλλα λόγια οι δόσεις, παρουσιάζονται στην οθόνη του υπολογιστή με τη μορφή γραφικών παραστάσεων και πινάκων. Για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων αρκεί να επιλεγθεί το Source Term Summary (Σύνοψη Πηγής Εκπομπής) και το Maximum Doses Values (Μέγιστες Τιμές Δόσεων).

Στο Source Term Summary (Σχήμα 4.11) παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της ραδιενέργειας που εκλύεται από τον πυρηνικό αντιδραστήρα καθώς και η ραδιενέργεια των σημαντικότερων νουκλιδίων.

-Ενεργή Δόση (TEDE): είναι το άθροισμα των δόσεων από τετραήμερη ακτινοβολία εδάφους με διόρθωση για την τραχύτητα του εδάφους (0.7), ακτινοβολίας νέφους και ισοδύναμης δεσμευμένης ενεργής δόσης (CEDE) από εισπνοή. Το TEDE θα πρέπει να χρησιμοποιείται για συγκρίσεις με τις Κατευθυντήριες Γραμμές Προστατευτικών Μέτρων.

-Δεσμευμένη Ισοδύναμη Δόση (CDE) Θυρεοειδή: η δόση αυτή είναι μια δεσμευμένη δόση 50 ετών σε ενήλικα άνδρα.

-Οξεία Ισοδύναμη Δόση Πνευμόνων: χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των πρώιμων επιπτώσεων στην υγεία λόγω των δόσεων στον πνεύμονα. Η δόση, που υπολογίζεται, είναι δεσμευμένη δόση 30 ημερών σε ενήλικα άνδρα.



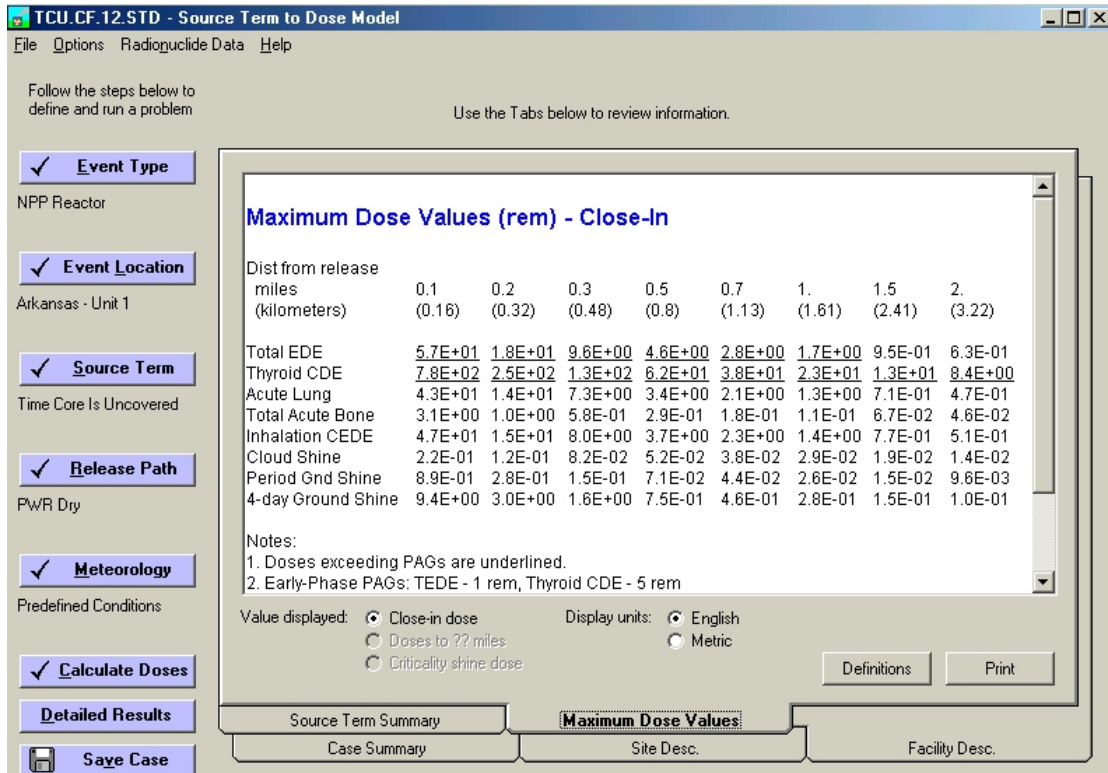
Σχήμα 4.11 Αποτελέσματα του Source Term Summary

-Συνολική Οξεία Ισοδύναμη Δόση Οστών: είναι το άθροισμα της αποτελεσματικής δόσης από ακτινοβολία εδάφους, ακτινοβολία νέφους και οξείας δόσης μυελού των οστών από εισπνοή. Η δόση αυτή χρησιμοποιείται για πληροφορίες σχετικά με τις πρώιμες επιπτώσεις για την υγεία των ανθρώπων, που καταγράφονται στα ατυχήματα αντιδραστήρων.

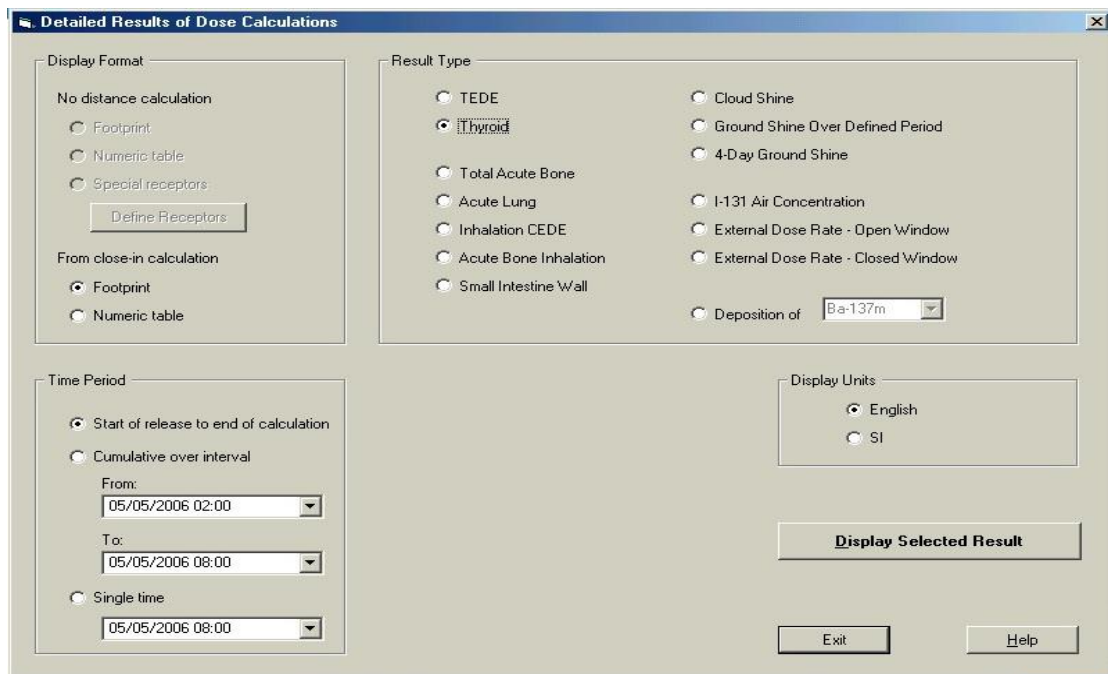
-Ισοδύναμη Δεσμευμένη Ενεργή Δόση (CEDE) από εισπνοή: το CEDE εισπνοής που υπολογίζεται είναι δεσμευμένη δόση 50 ετών σε ενήλικο άνδρα και αποτελεί συστατικό στοιχείο της TEDE. Η δόση αυτή δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως δείκτης για τις πρώιμες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου.

Στην οθόνη του Maximum Doses Values (Σχήμα 4.12) εμφανίζονται οι τιμές των ραδιενεργών δόσεων. Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι οι υψηλότερες δόσεις σε σταθερές αποστάσεις από την πηγή έκλυσης του ραδιενεργού υλικού. Οκτώ τύποι δόσεων παρουσιάζονται και αυτοί είναι:

-Ακτινοβολία νέφους: με την επιλογή αυτή εξετάζουμε την αποτελεσματική δόση από την ακτινοβολία του νέφους. Η δόση αυτή χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της συνεισφοράς της στην ενεργή δόση (TEDE) και στη συνολική οξεία δόση μυελού των οστών.



Σχήμα 4.12 Αποτελέσματα του Maximum Doses Values



Σχήμα 4.13 Οθόνη του Detailed Results

-Ακτινοβολία εδάφους σε ορισμένη περίοδο: με αυτή την επιλογή εξετάζουμε την αποτελεσματική δόση από την ακτινοβολία του εδάφους κατά την περίοδο έκθεσης με διόρθωση για την τραχύτητα του εδάφους (0.7).

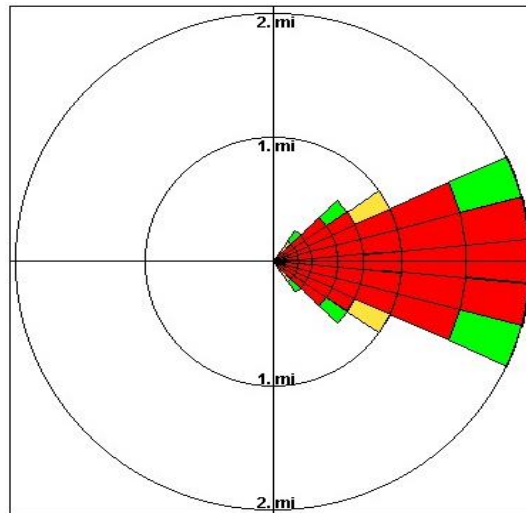
-Τετραήμερη ακτινοβολία εδάφους: είναι η αποτελεσματική δόση από την ακτινοβολία του εδάφους για έκθεση 4 ημερών.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα αποτελέσματα του κώδικα παρέχονται με την επιλογή του 'Detailed Results' (Λεπτομερή Αποτελέσματα), που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της οθόνης. Με την επιλογή αυτή παρουσιάζονται στην οθόνη του υπολογιστή τέσσερις ενότητες (Σχήμα 4.13):

- α) Display Format (Σχηματική Απεικόνιση Αποτελεσμάτων): σε αυτό το τμήμα επιλέγεται η μορφή με την οποία θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Υπάρχει η δυνατότητα να εμφανίζονται είτε σε έναν αριθμητικό πίνακα είτε ως γραφικό ίχνος (footprint) (Σχήμα 4.14).
- β) Result Type (Τύπος Αποτελέσματος): το τμήμα αυτό περιέχει μια επιλογή για κάθε ένα από τα 14 αποτελέσματα (δόσεις), τα οποία υπολογίζονται από το RASCAL. Οι δόσεις αυτές είναι οι 8 τύποι δόσεων στην οθόνη του Maximum Doses Values και επιπλέον οι: 1) οξεία δόση τοιχωμάτων λεπτού εντέρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί εάν θα εμφανιστεί γαστρεντερικό σύνδρομο, 2) συγκέντρωση I-131 στον αέρα, 3) συγκέντρωση όλων των νουκλιδίων που εναποτέθηκαν στο έδαφος και 4) ρυθμοί εξωτερικών δόσεων για κλειστό και ανοιχτό παράθυρο.
- γ) Time Period (Χρονικό Διάστημα): όπου καθορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο θα υπολογιστούν και θα εμφανιστούν οι ραδιενεργές δόσεις και
- δ) Display Units (Μονάδες Μέτρησης) όπου επιλέγονται οι μονάδες (SI ή Αγγλικό Σύστημα) με τις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα του κώδικα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Athey G.F., Mcguire S.A., Ramsdell.V.: "RASCAL3.0.5 Workbook", NUREG-1889, (2007)
- Chanin D.I., Sprung J.L., Ritchie L.T., Jow H.N., Rollstin J.A.: MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), US NRC, (1990)
- Croff A.G.: ORIGEN 2 A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials, Nuclear Technology Vol.62 p. 335, (1983)
- Devel L., Guntay S., Powers D.A.:The Chernobyl Reactor Accident Source Term, NEA/CSNI/R(95)24, (1995)



Σχήμα 4.14 Χωρική (2D) κατανομή της δόσης

- ENDF/B-V Library: National Nuclear Data Centre, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY (1979)
- KfK: COSYMA-a new program package for accident consequence assessment. EUR 13028, (1991)
- Nicolaou G.: Relative radiological impact from a reactor accident in the case of emerging nuclear fuels. Health Physics Journal 97, p. 157, (2009)
- Rose P.F.: ENDF-201, ENDF/B-VI Summary Documentation, BNL-NCS-17541, 4th Edition, Brookhaven National Laboratory (BNL), (1991)
- Sasahara A., Matsumura T., Nicolaou G., Kiyonagi Y.: Isotopic Analysis of Actinides and Fission Products in LWR High-Burnup UO₂ Spent Fuels and its Comparison with Nuclide Composition Calculated Using JENDL, ENDF/B, JEF and JEFF. Journal of Nuclear Sciences and Technology 45, p. 313, (2008a)
- Sasahara A., Matsumura T., Nicolaou G., Kiyonagi Y.: Chemical Isotopic Analysis of Fission Products in PWR-MOX Spent Fuels and Computational Evaluation Using JENDL, ENDF/B, JEF, and JEFF. Journal of Nuclear Sciences and Technology 45, p. 390, (2008b)
- SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUREG/CR-0200, Revision 4 (ORNL/NUREG/CSD-2/Revision 4), Volumes I, II, and III, (1995)
- Soffer L., Burson S.B., Ferrell C.M., Lee R.Y., Ridgely J.N.: Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants, Final Report. NUREG-1465, (1995)
- UNSCEAR: Vol. II Sources and Effects of Ionising Radiation; Annex J on 'Exposures and effects of the Chernobyl accident'; (2000)
- X-5 Monte Carlo Team: MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code (version 5), LA-UR-03-1987, Los-Alamos, USA, (2003)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

5.1 Ραδιενέργεια στο περιβάλλον

Φυσικά ισότοπα είναι αυτά του ουρανίου (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U), του θορίου (Th-232) με τα θυγατρικά τους, καθώς και του καλίου (^{40}K) που αποτελούν συστατικά του φλοιού της γης από τη στιγμή της δημιουργίας της. Σύμφωνα με την Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιδράσεις της Πυρηνικής Ακτινοβολίας (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) [UNSCEAR 1988] το ήμισυ της συνολικής φυσικής ακτινοβολίας, που δέχεται το ανθρώπινο σώμα, οφείλεται στο ραδόνιο. Το ραδόνιο υπάρχει σε διάφορες ισοτοπικές μορφές, από τις οποίες οι σημαντικότερες είναι τρεις: το ραδόνιο (^{222}Rn), μέλος της φυσικής σειράς του ουρανίου (^{238}U), το θορόνιο (^{220}Rn), μέλος της φυσικής σειράς του θορίου (^{232}Th) και το ακτινόνιο (^{219}Rn), μέλος της φυσικής σειράς του ουρανίου (U-235). Στις τρεις αυτές σειρές διάσπασης τα ισότοπα του ραδονίου είναι αέρια. Η συγκέντρωση του ακτινόνιου και του θορονίου είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν του ραδονίου λόγω των μικρότερων χρόνων ημιζωής που έχουν (55 και 4 δευτερόλεπτα αντίστοιχα, έναντι 3.82 ημερών του ραδονίου). Συνεπώς, το ακτινόνιο και το θορόνιο διασπώνται γρήγορα και επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό το περιβάλλον ή τον άνθρωπο. Γι' αυτό το λόγο, η χρήση του όρου ραδόνιο αναφέρεται στο ^{222}Rn .

Το ραδόνιο διαφεύγει στον αέρα από τους κόκκους του υπεδάφους μέσα στους οποίους παράγεται. Η διαδικασία εξαρτάται α) από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του εδάφους μιας συγκεκριμένης περιοχής, όπως είναι οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους, δηλαδή το μέγεθος και η δομή των κόκκων, β) το πορώδες και η υγρασία του εδάφους, γ) καθώς και η περιεκτικότητα του εδάφους στην πρωτογενή πηγή του ραδονίου, δηλαδή το ^{238}U . Ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα του ραδονίου στον αέρα χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περιοχή.

Τα περισσότερα θυγατρικά του ραδονίου (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi και ^{214}Po) είναι βραχύβια, ακολουθώντας στο έδαφος την ίδια, με το μητρικό ισότοπο, διαδρομή. Ενώ το ραδόνιο είναι αδρανές αέριο, τα θυγατρικά του στον αέρα εμφανίζονται υπό μορφή ατμοσφαιρικών αιωρημάτων. Τα θυγατρικά ^{214}Pb και ^{214}Bi είναι σημαντικοί εκπομποί ακτινοβολίας-γ με ενέργειες [242 keV (8%), 295.2 keV (18%), 352 keV (35%)] και [609 keV (43%), 768 keV (5%), 934 keV (3%), 1120 keV (14%), 1238 keV (6%), 1377 keV (7%), 1764 keV (16%), 2204 keV (5%)] αντίστοιχα. Η ραδιενέργεια-γ της επιφάνειας του εδάφους απεικονίζει τη συγκέντρωση του ραδονίου κοντά στο έδαφος.

Τεχνητά ισότοπα ονομάζονται αυτά που έχουν παραχθεί σε εγκαταστάσεις όπως οι πυρηνικοί αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματιδίων. Παρόλο που αρκετές εκατοντάδες ισότοπων παράγονται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός από αυτά συμβάλλουν

σημαντικά σε επιπτώσεις στον άνθρωπο μέσω της ραδιενεργού έκθεσής του. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται προϊόντα σχάσης και ενεργοποίησης. Στον Πίνακα 5.1 [IAEA, 1989 - UNSCEAR, 2000] παρουσιάζονται τα ισότοπα, που βρέθηκαν στο περιβάλλον μετά από το ατύχημα στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Chernobyl. Αυτά παρήχθησαν από τις πυρηνικές αντιδράσεις σχάσης και αρπαγής κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Στον Πίνακα 5.2 [UNSCEAR, 1988] παρουσιάζονται τα σημαντικότερα από αυτά που συμβάλλουν στη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Ο αρμόδιος εθνικός φορέας για θέματα ραδιενέργειας, ακτινοπροστασίας και πυρηνικής ασφάλειας στη χώρα είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Η ΕΕΑΕ ιδρύθηκε το 1954 και ανασυστάθηκε ως υπηρεσία εποπτευόμενη από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας με νομοθετική ρύθμιση το 1987 (Ν. 2750 ΦΕΚ 33/Α/26 του 02/1954 και Ν. 1733 ΦΕΚ 171/Α/22 του 09/1987). Κύριο μέλημα της ΕΕΑΕ είναι η προστασία του πληθυσμού, των εργαζομένων και του περιβάλλοντος από τις ιοντίζουσες και μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες (www.eeae.gr).

5.2 Μετρήσεις ακτινοβολίας-α του αέρα

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το ταχύτερο μέσο διάδοσης ραδιενέργειας. Επομένως, οι μετρήσεις ραδιενέργειας στον αέρα δίνουν τη δυνατότητα για έλεγχο μιας περιοχής ως προς τη φυσική ακτινοβολία, που προέρχεται κυρίως από το ραδόνιο. Σε περίπτωση πρόσθετης ραδιενέργειας η μετρούμενη ακτινοβολία του αέρα αναμένεται να είναι πάνω από τα επίπεδα της φυσικής ραδιενέργειας. Η πρόσθετη αυτή τεχνητή ραδιενέργεια μπορεί να προέρχεται από πυρηνικό ατύχημα ή κάποια σεισμική δραστηριότητα. Κατ' επέκταση, η μέτρηση ραδιενέργειας μπορεί να συμβάλλει στην έγκαιρη ανίχνευση τεχνητών ισότοπων προερχόμενων από πυρηνικό ατύχημα [Venuti et al, 1990] ή κάποια σεισμική δραστηριότητα [Karangelos et al, 2002].

Η μέτρηση του ραδονίου και των θυγατρικών του βασίζονται στην ανίχνευση της ακτινοβολίας-α, που εκπέμπεται από τα ισότοπα αυτά κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η συσκευή μέτρησης της ακτινοβολίας-α στον αέρα, που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης στην Ξάνθη. Η συσκευή είναι της εταιρίας FAG, μοντέλο FHT 59S. Η προσαγωγή του ατμοσφαιρικού αέρα στη συσκευή μέτρησης γίνεται μέσω ενός σωλήνα, το στόμιο του οποίου βρίσκεται στο δώμα του κτηρίου, όπου στεγάζεται η συσκευή και σε ύψος 12 m περίπου από το έδαφος.

Πίνακας 5.1 Ισότοπα που βρέθηκαν στο περιβάλλον μετά από το ατύχημα του Chernobyl

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής*
H-3	12.35 a
Sr-89	50.5 d
Sr-90	28.7 d
Zr-95	64.09 d
Nb-95	35.0 d
Mo-99	2.74 d
Ru-103	39.27 d
Ru-106	372.6 d
Ag-110m	249.79 d
Cd-115	2.2 d
Sb-125	1008.1 d
Sb-127	3.9 d
Te-129m	33.6 d
Te-131m	30.0 d
Te-132	3.20 d
I-131	8.02 d
I-133	20.3 h
Cs-134	754.2 d
Cs-136	13.0 d
Cs-137	30.0 a
Ba-140	12.75 d
Ce-141	32.50 d
Ce-144	284.45 d
Np-239	2.35 d
Am-241	432.0 a
Cm-242	162.94 d
Pu-238	87.70 a
Pu-239/240	2.411·E4 a/6.563·E3 a
Pu241	14.35 a
Pu-242	3.735·E5 a

* a: έτος, d: ημέρα, h: ώρα, m: λεπτό, s: δευτερόλεπτο

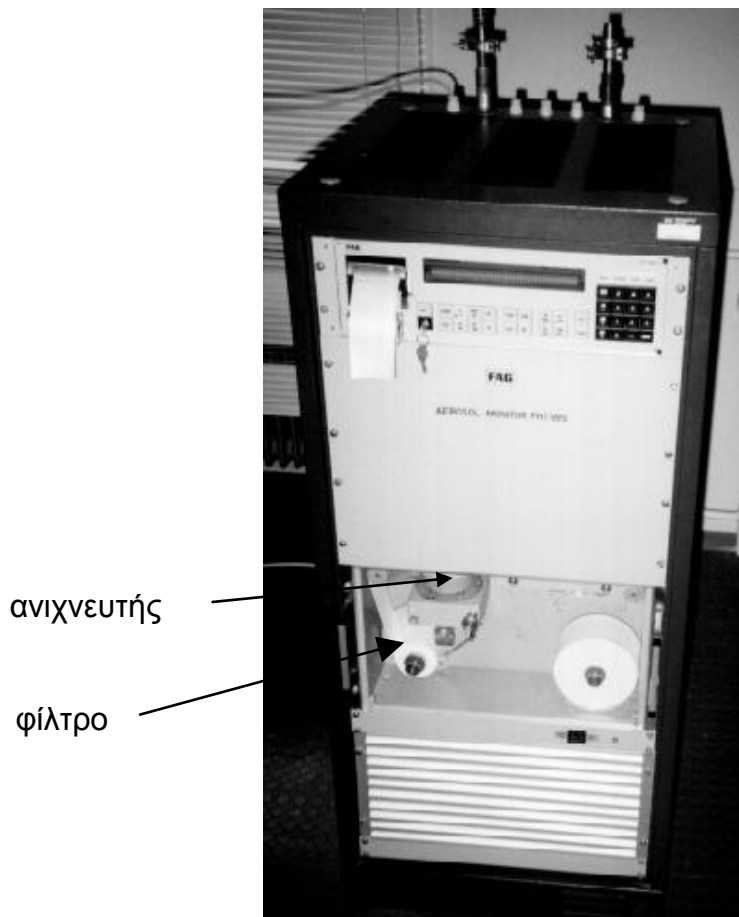
Πίνακας 5.2 Ισότοπα που συμβάλλουν στη ρύπανση του περιβάλλοντος

Δείγμα	Ισότοπα
Αέρας	I-131, Cs-134, Cs-137
Νερό	H-3, Sr-89, Sr-90, I-131, Cs-134, Cs-137
Γάλα	Sr-89, Sr-90, I-131, Cs-134, Cs-137
Κρέας	Cs-134, Cs-137
Άλλες τροφές	Sr-89, Sr-90, Cs-134, Cs-137
Λαχανικά	Sr-89, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Ru-103, Ru-106, I-131, Cs-134, Cs-137, Ce-141, Ce-144
Έδαφος	Sr-90, Cs-134, Cs-137, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Cm-242

Ο αέρας συλλέγεται από το περιβάλλον και μέσω του σωλήνα διοχετεύεται, με μέση ροή 10 m³/h, πάνω σε ένα φίλτρο όπου επικάθονται τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα. Ο ανιχνευτής της συσκευής, που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι τοποθετημένος επάνω από την περιοχή του φίλτρου, όπου γίνεται η επικάθηση της σκόνης. Αυτός είναι ένας πλαστικός κρύσταλλος Bicron BC 408 με διάμετρο 50 mm και επίστρωση ZnS πάχους 0.25 mm. Ο ανιχνευτής είναι θωρακισμένος με 3 cm μολύβδου ώστε να είναι μειωμένη η ανίχνευση της ακτινοβολίας-γ του περιβάλλοντος χώρου. Αισθητήρια μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα υπάρχουν δίπλα στο στόμιο του σωλήνα για την προσαγωγή του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η μέτρηση της ακτινοβολίας-γ του εδάφους στο ενεργειακό διάστημα από 40 keV έως 3 MeV πραγματοποιείται με έναν κυλινδρικό κρύσταλλο σπινθηρισμού NaI(Tl) διαστάσεων 3 in. x 3 in. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε εξωτερικά του εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας και σε ύψος 2 m περίπου από το έδαφος. Η διάταξη καταγραφής των μετρήσεων τοποθετήθηκε εντός του εργαστηρίου. Οι παραγόμενοι από τον ανιχνευτή παλμοί οδηγούνται σε έναν ενισχυτή και, ακολούθως, σε μια κάρτα απαριθμητή, όπου και καταμετρείται το σύνολο αυτών. Η μέτρηση διαρκεί ένα λεπτό και πραγματοποιείται κάθε 10 λεπτά. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις είναι κρούσεις ανά λεπτό (cps).

Η ημερήσια μεταβολή των ακτινοβολιών-α και -γ του αέρα και του εδάφους αντίστοιχα δίνονται στο Σχήμα 5.2 [Σεφτελής, 2007 - Seftelis et al., 2007].

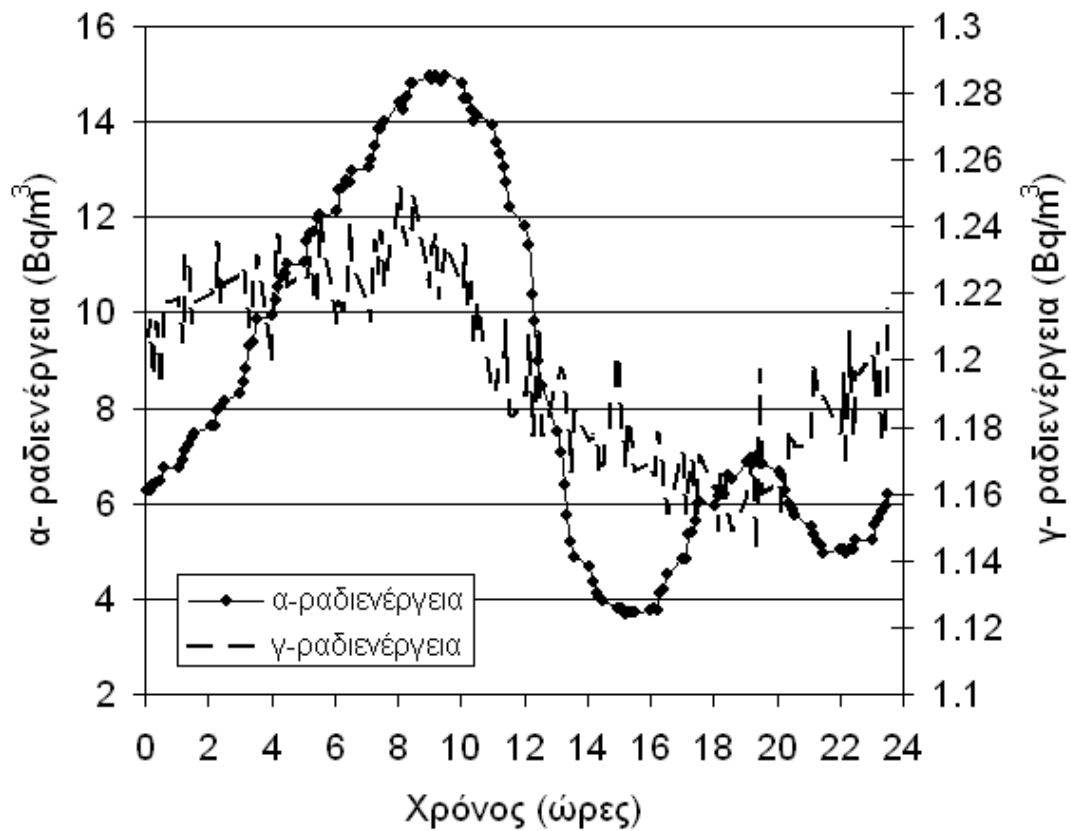


Σχήμα 5.1 Συσκευή ενεργητικής μέτρησης της ακτινοβολίας του αέρα

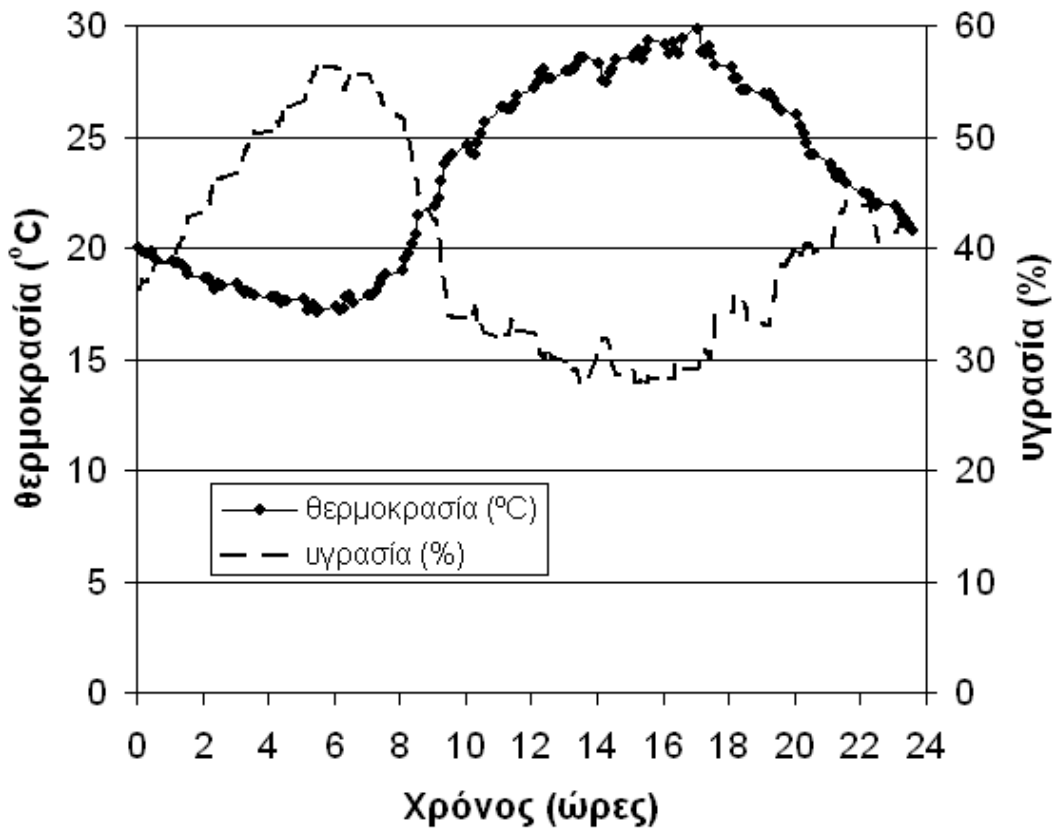
Η μεταβολή παρουσιάζει περιοδικότητα. Μετά την πρωινή κορυφή, η συγκέντρωση θα μειωθεί και θα φτάσει στη μικρότερη τιμή της περίπου το μεσημέρι. Ακολούθως, θα αρχίσει να αυξάνεται προς το μέγιστο το πρωί της επόμενης μέρας. Οι ημερήσιες μεταβολές της ακτινοβολίας- γ στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζουν περιοδικότητα, παρόμοια με αυτήν της α -ακτινοβολίας του αέρα.

Στο Σχήμα 5.3 μπορούν να παρατηρηθούν οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Οι αυξημένες τιμές της σχετικής υγρασίας των πρωινών ωρών ακολουθούνται από μείωση με κορύφωση τις μεσημεριανές ώρες. Αντίθετα, η θερμοκρασία έχει τις χαμηλότερες τιμές τις πρώτες πρωινές ώρες, ενώ οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται λίγο μετά το μεσημέρι. Ακόμα, μπορεί να παρατηρηθεί μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας.

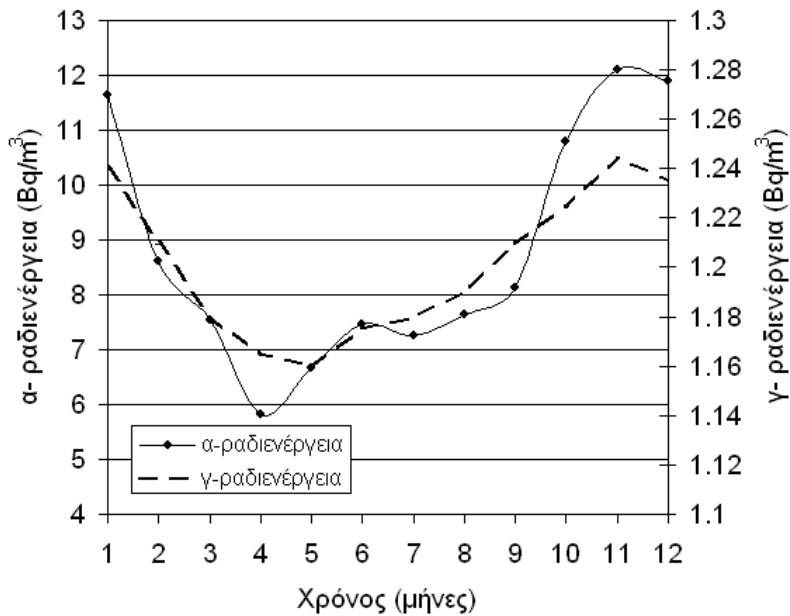
Οι μεταβολές των μέσων μηνιαίων τιμών για την α - ακτινοβολία του αέρα παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 5.4. Οι τιμές της συγκέντρωσης παρουσιάζουν αύξηση κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και χειμώνα, ενώ παρατηρείται μείωση κατά τους μήνες της άνοιξης και του καλοκαιριού [Σεφτελης, 2007 - Sesana et al., 2003 - Nagarajaa et al., 2003].



Σχήμα 5.2 Ημερήσια μεταβολή των ακτινοβολιών-α και -γ



Σχήμα 5.3 Ημερήσια μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών

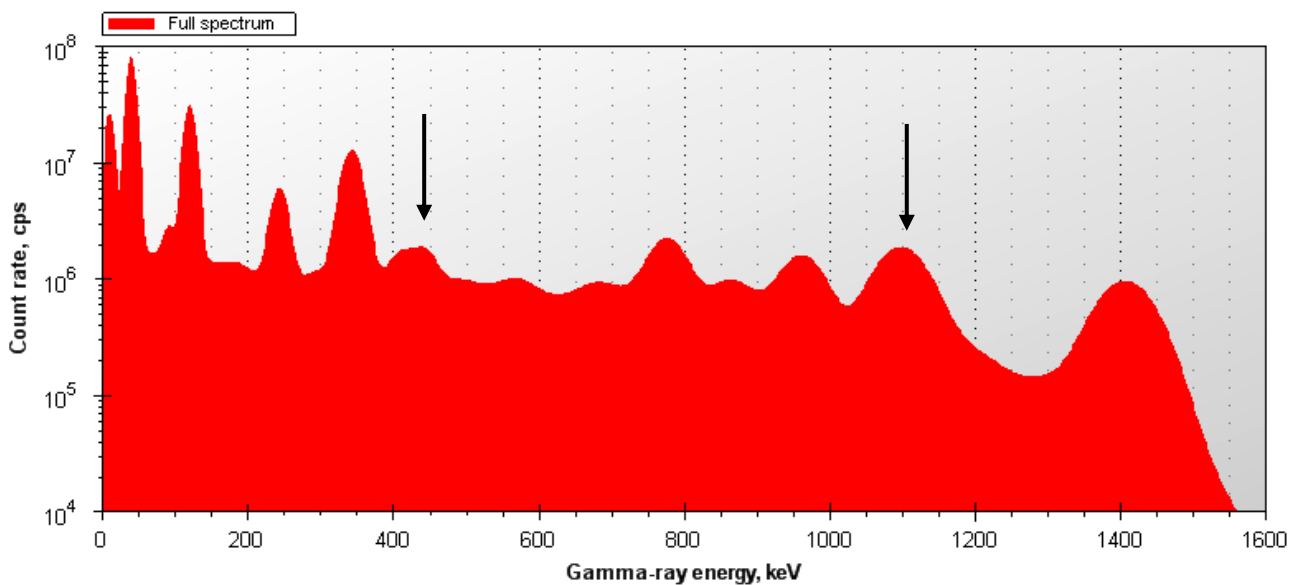
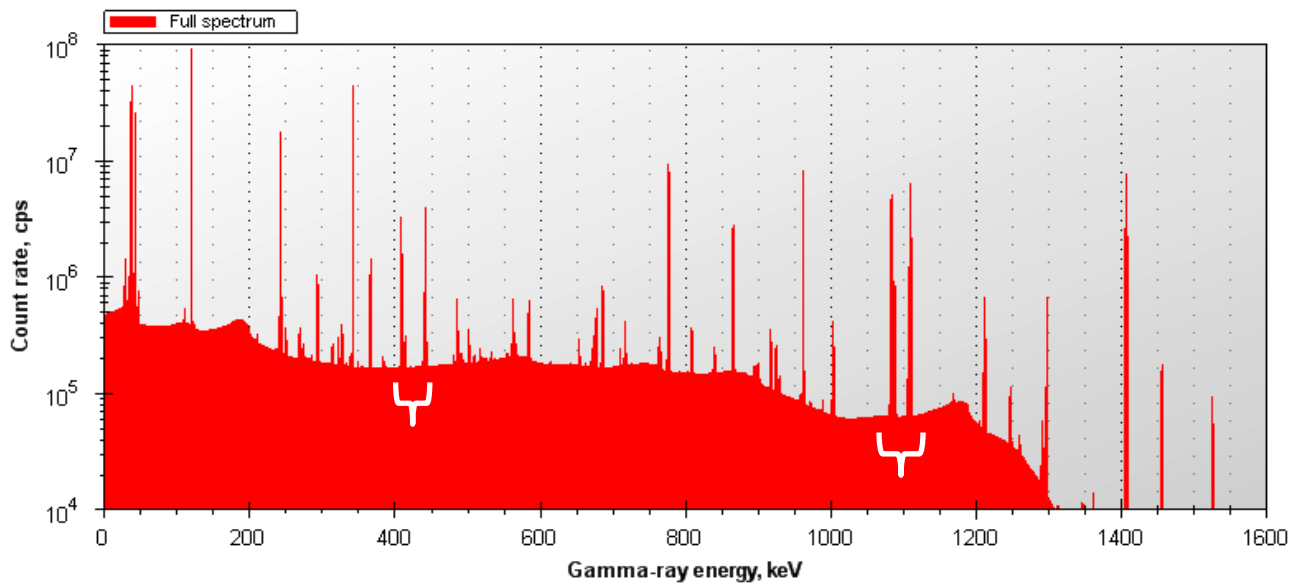


Σχήμα 5.4 Ετήσια μεταβολή των ακτινοβολιών-α και -γ

5.3 Μετρήσεις ακτινοβολίας-γ σε στερεά και υγρά δείγματα

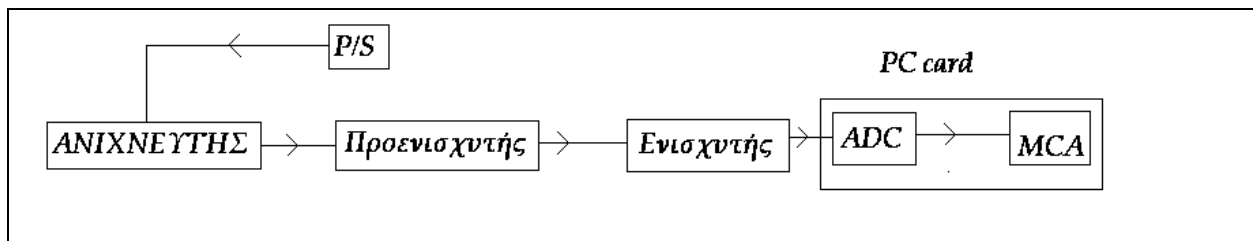
Η μέτρηση πραγματοποιείται με φασματοσκοπία της ακτινοβολίας-γ, η οποία με τις κατάλληλες βαθμονομήσεις δίνει την ενέργεια της ακτινοβολίας (ποιοτική ανάλυση) αλλά και την ραδιενέργεια (Bq) του ισότοπου που εκπέμπει αυτή την ακτινοβολία (ποσοτική ανάλυση) [Florou et al., 2007 & 2010]. Οι ανιχνευτές με ευρεία χρήση στη φασματοσκοπία της ακτινοβολίας-γ είναι αυτοί με κρύσταλλο ανόργανου σπινθηριστή ιωδιούχου νατρίου (NaI) ή ημιαγωγού γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe).

Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει ένα πολυενεργειακό φάσμα μετρημένο με ανιχνευτές HPGe (επάνω) και NaI (κάτω). Αυτό είναι το φάσμα ακτινοβολίας-γ του ισότοπου ^{152}Eu και περιλαμβάνει φωτόνια διαφορετικών ενεργειών. Η υπεροχή του HPGe ως προς τη διακριτική του ικανότητα είναι εμφανής. Άρα, το 'πλάτος μιας φωτοκορυφής στο ήμισυ του ύψους της' (Full Width at Half Maximum, FWHM) είναι περίπου 1.5 και 30 keV στην ενέργεια του ^{137}Cs (662 keV), για HPGe και NaI αντίστοιχα. Όπως είναι φανερό στο φάσμα που δίνει ο ανιχνευτής NaI, οι κορυφές έχουν πολύ μεγαλύτερο πλάτος από τις μυτερές κορυφές, που δίνει ο ανιχνευτής HPGe. Λόγω της καλύτερης διακριτικής του ικανότητας το HPGe ξεχωρίζει ως δύο διακριτές αιχμηρές φωτοκορυφές τις ενέργειες 411 και 444 keV, αντίθετα με το NaI που τις απεικονίζει ως μια ευρεία φωτοκορυφή. Ομοίως με τις φωτοκορυφές με ενέργεια 1086 και 1112 keV.



Σχήμα 5.5 Φάσμα ακτινοβολίας-γ του ισότοπου ^{152}Eu

Η οργανολογία για τη φασματοσκοπία-γ είναι κοινή για κάθε τύπο ανιχνευτή. Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει σχηματικά τα βασικά μέρη, που την απαρτίζουν.



Σχήμα 5.6 Βασικά μέρη ενός συστήματος φασματοσκοπίας ακτινοβολίας -γ

➤ **Τροφοδοτικό υψηλής τάσης (P/S high voltage Power Supply)**

Η μονάδα αυτή παρέχει την απαιτούμενη συνεχή τάση για τη λειτουργία του ανιχνευτή. Τυπικές τιμές τάσης για τους ανιχνευτές HPGe και NaI είναι -4500 και 1200 V αντίστοιχα.

➤ **Προενισχυτής (Preamplifier)**

Ο προενισχυτής είναι τοποθετημένος πολύ κοντά στον ανιχνευτή για να αποφευχθούν απώλειες σήματος και παρεμβολές. Χρησιμεύει στη μεγιστοποίηση του σήματος έναντι του θορύβου του ανιχνευτή και παρέχει μια πρώτη ενίσχυση των μικρών σημάτων του ανιχνευτή.

➤ **Ενισχυτής (Amplifier)**

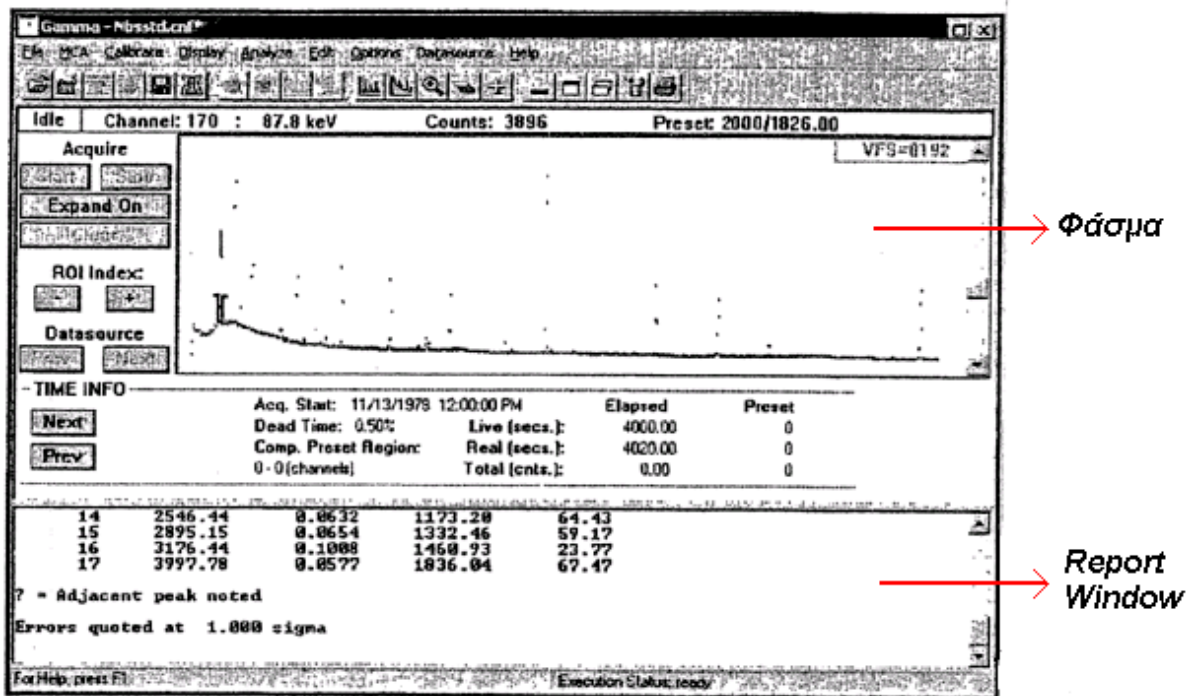
Χρησιμοποιείται για την περαιτέρω ενίσχυση και επεξεργασία του παλμού από τον προενισχυτή. Το ύψος του παλμού που προέρχεται από τον ενισχυτή σχετίζεται με την ενέργεια της ακτινοβολίας που δημιουργεί τον παλμό.

➤ **Μετατροπέας αναλογικού σήματος-προς-ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter, ADC)**

Στη φασματοσκοπία-γ, συχνά, συλλέγονται δεδομένα για όλες τις ακτινοβολίες-γ διαφορετικών ενεργειών που εκπέμπονται από κάποια πηγή. Έτσι, απαιτείται η ταξινόμηση των παλμών, που έχουν προκύψει από τον ανιχνευτή, σύμφωνα με το ύψος τους, που σχετίζεται με την ενέργεια της ακτινοβολίας-γ, και η καταγραφή του αριθμού των παλμών διαφορετικού ύψους. Αυτό πραγματοποιείται με έναν αναλογικό-προς-ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος δέχεται αναλογικά σήματα από τον ενισχυτή και τα μετατρέπει σε δεδομένα ψηφιακής μορφής για φύλαξη και απεικόνιση σε έναν **Πολυκάναλο αναλυτή (Multichannel Analyzer, MCA)**. Κάθε παλμός αποθηκεύεται στο κανάλι, που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο ύψος παλμού δηλαδή στη συγκεκριμένη ενέργεια της ακτινοβολίας-γ. Με αυτό τον τρόπο καταγράφεται ο αριθμός των παλμών ανά ύψος και η απεικόνιση του φάσματος της μορφής του Σχήματος 5.5.

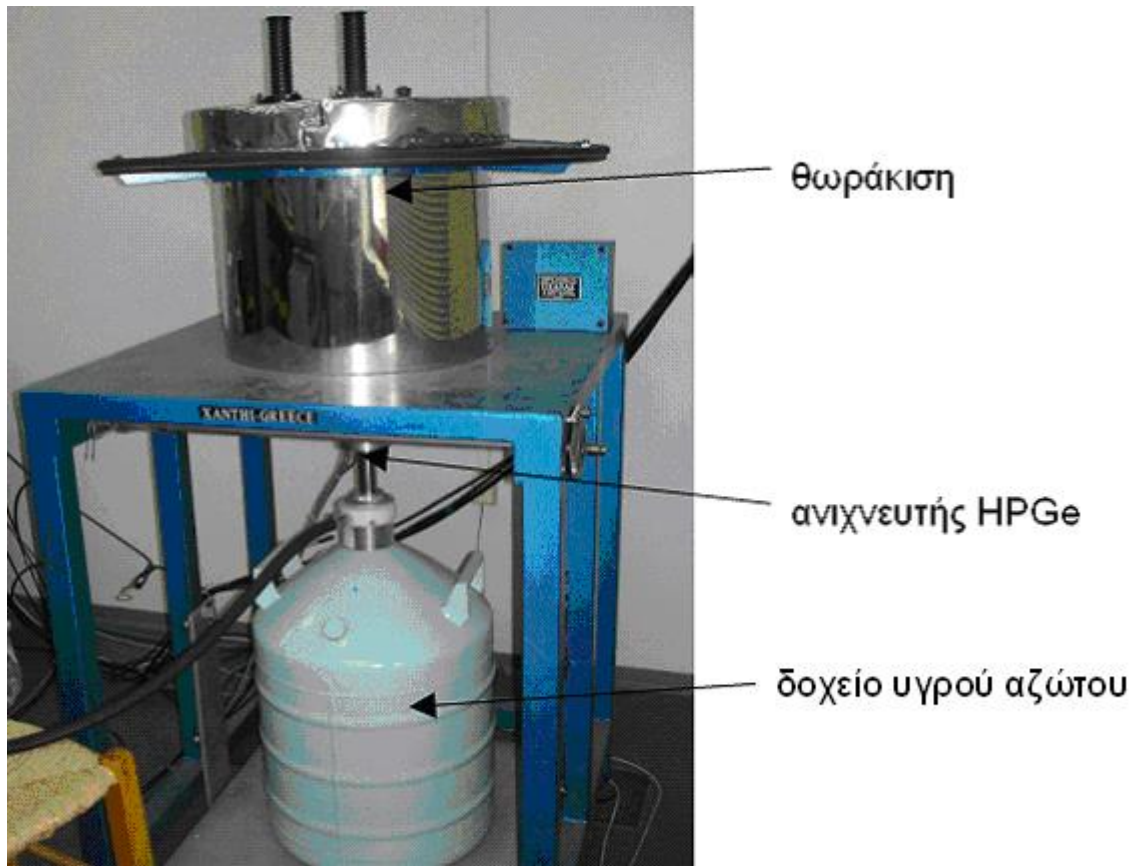
Παλιότερα, οι ADC και MCA ήταν ενσωματωμένοι σε μια μονάδα ιδιαίτερα ογκώδη. Σήμερα, είναι υπό τη μορφή μιας κάρτας ενσωματωμένης σε ένα σταθερό ή φορητό υπολογιστή. Η δεύτερη περίπτωση, σε συνδυασμό με ένα φορητό σύστημα των αναγκαίων ηλεκτρονικών, δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς ενός ανιχνευτή για μετρήσεις εκτός εργαστηρίου (in-situ). Η κάρτα ελέγχεται από διάφορα λογισμικά, όπως το λογισμικό Canberra-Genie 2000, με σκοπό την εξομοίωση στην οθόνη του υπολογιστή του MCA και του φάσματος και την περαιτέρω ανάλυσή του. Για την ανάλυση των φασμάτων, είναι αναγκαίο να έχουν δοθεί τα ακόλουθα δεδομένα: πληροφορίες για το εκάστοτε δείγμα (βάρος, είδος), βαθμονόμηση ενέργειας, βαθμονόμηση απόδοσης μέτρησης, διάρκεια μέτρησης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δείγματος είναι: ενέργειες φωτοκορυφών, αναγνώριση νουκλιδίων (μέσω των ενεργειών τους) που αντιστοιχούν σε κάθε φωτοκορυφή, εμβαδόν φωτοκορυφών και εμβαδόν υποστρώματος (background) κάτω από τις φωτοκορυφές, ποσότητα (σε Bq/kg) των νουκλιδίων, ελάχιστη ποσότητα που μπορεί να μετρηθεί. Στο Σχήμα 5.7

φαίνεται στην οθόνη του υπολογιστή το κύριο παράθυρο του λογισμικού με βασικές λειτουργίες και ένα πολυενεργειακό φάσμα.

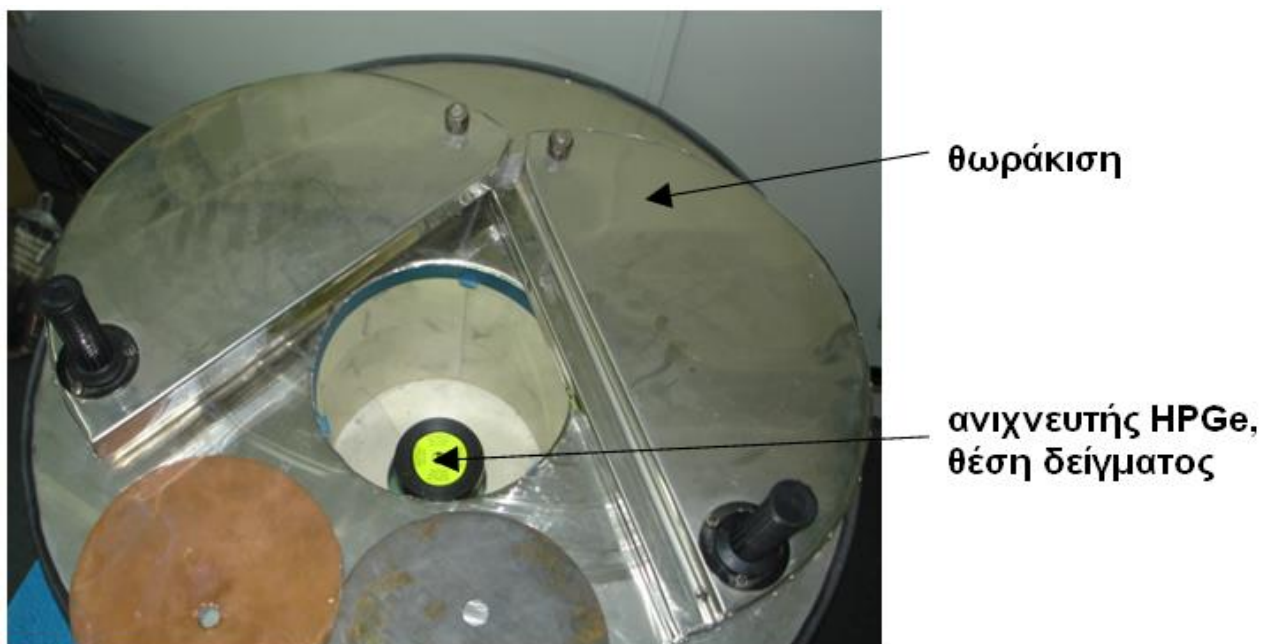


Σχήμα 5.7 Ένα τυπικό φάσμα που μετρήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Genie 2000

Στα Σχήματα 5.8, 5.9 και 5.10, 5.11 φαίνονται δυο τύποι ανιχνευτών, ένας εργαστηριακός σταθερός ανιχνευτής HPGe και ένας φορητός ανιχνευτής NaI αντίστοιχα. Ο πρώτος, ογκώδης λόγω της ύπαρξης μεγάλου δοχείου αζώτου που απαιτείται για συνεχείς μετρήσεις μεγάλης διάρκειας (>1 ημέρας), είναι εγκλωβισμένος σε θωράκιση μολύβδου για τη μείωση της πρόσπτωσης της κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά και αυτής που μπορεί να προέρχεται από το περιβάλλον στον ανιχνευτή. Τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά είναι ξεχωριστές σταθερές μονάδες, ενώ για μέτρηση και απεικόνιση του φάσματος χρησιμοποιείται κάρτα ADC/MCA σε υπολογιστή, όπως έχει προαναφερθεί. Ο δεύτερος είναι μικρών διαστάσεων φορητός ανιχνευτής με τον κρύσταλλο NaI και όλα τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά ενσωματωμένα στη συσκευή (1) του Σχήματος 5.10. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η οθόνη της συσκευής με ένα φάσμα ^{137}Cs . Η συσκευή διαθέτει λογισμικό για την ανάλυση του φάσματος και την αναγνώριση των ισοτόπων που εκπέμπουν τη μετρούμενη ακτινοβολία-γ.



Σχήμα 5.8 Ανιχνευτής HPGe με τη θωράκιση που τον περιβάλλει



Σχήμα 5.9 Ανιχνευτής HPGe και η θέση τοποθέτησης δείγματος με τη θωράκιση που τον περιβάλλει

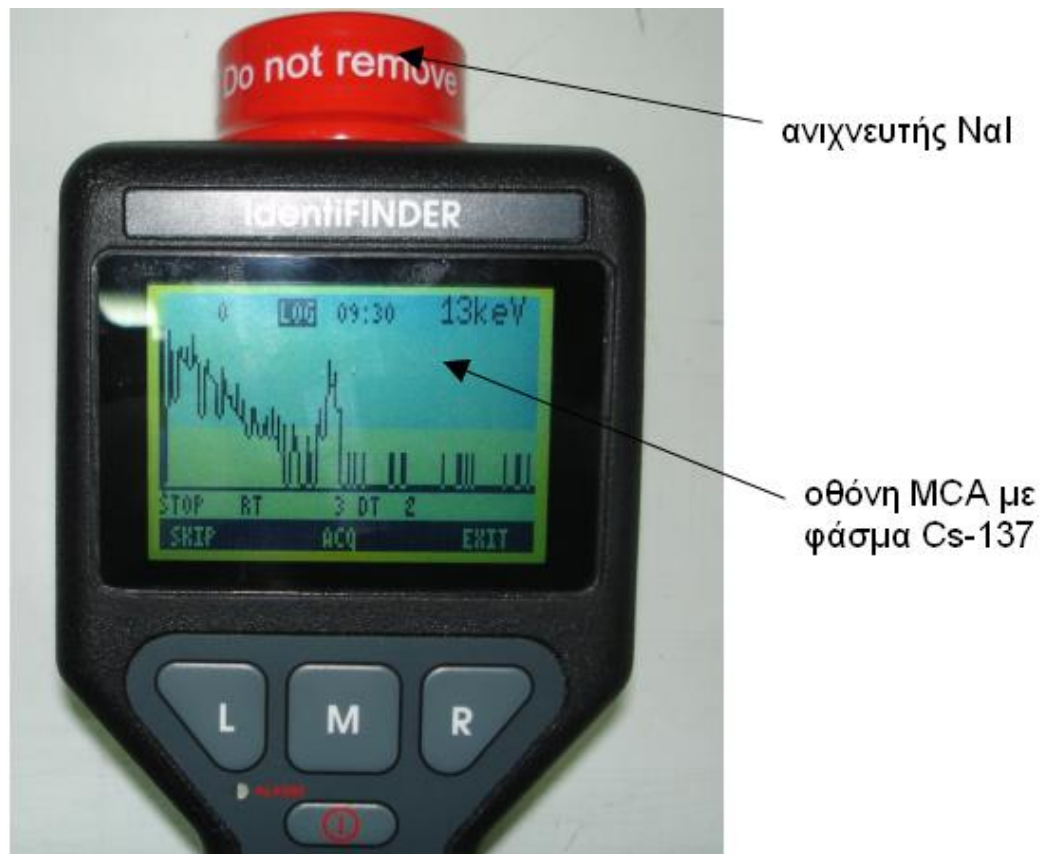


Σχήμα 5.10 1) Ανιχνευτής (συσκευή), 2) Φορτιστής, 3) HUB (συσκευή για διακλάδωση των καλωδίων της συσκευής), 4) Καλώδιο USB για σύνδεση της συσκευής με τον υπολογιστή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σεφτελής Ι.: ‘Μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στον υπαίθριο επιφανειακό αέρα’, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, (2007)
- Florou H., Trabidou G., Nicolaou G.: An assessment of the external radiological impact in areas of Greece with elevated natural radioactivity, *Journal of Environmental Radioactivity* 93, p. 74, (2007)
- Florou H., Nicolaou G., Evangeliou N.: The concentration of ^{137}Cs in the surface of the Greek marine environment. *Journal of Environmental Radioactivity* 101, p. 654, (2010)
- IAEA: Technical report series no. 295, Measurements of radionuclides in foods and the environment, Vienna, (1989)
- Karangelos D.J., Petropoulos N. P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P. and Simopoulos S.E.: Data lead in to the investigation of a relation between seismic activity and radon daughters concentration outdoors, NRE VII, International Symposium, Rhodes, Greece, (2002)

- Nagarajaa K., Prasada B.S.N., Madhavaa M.S.: Radon and its short-lived progeny: variations near the ground, Radiation Measurements 36, p. 413 – 417, (2003)
- Seftelis I., Nicolaou G., Trasanidis S., Tsagas N.: Diurnal variation of radon and its progeny. Journal of Environmental Radioactivity 97, p. 116-123, (2007)
- Sesana L., Caprioli E., Marcazzan G.M.: Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere, Journal of Environmental Radioactivity 65, p. 147–160, (2003)
- UNSCEAR: Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly , United Nations, New York, (1988)
- UNSCEAR: Exposures from natural radiation sources, Report to the General Assembly , United Nations, New York, (2000)
- Venuti G., Risika S. and Susanna A.: A new system for the control of radioactivity in Italy, IAEA Radiation protection Infrastructure Int. Sym. Munich Germany, p. 333-341, (1990)



Σχήμα 5.11 Ένα τυπικό φάσμα Cs-137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Μη-Καταστροφικές Δοκιμές (NDT–Non Destructive Testing), ή Μη-Καταστροφικοί Έλεγχοι (NDI–Non Destructive Inspections), ή Μη-Καταστροφικές Αξιολογήσεις (NDE–Non Destructive Evaluations) ονομάζονται οι έλεγχοι που επιτρέπουν τη μελέτη ενός αντικειμένου χωρίς την καταστροφή του. Ο μέθοδοι Μη-Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής.

6.1 Εφαρμογές των μεθόδων Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου

Πολλές κατασκευές, χρειάζονται περιοδικούς Μη-Καταστροφικούς Ελέγχους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές, που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων και τα συρματοσχοίνα γεφυρών.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων:

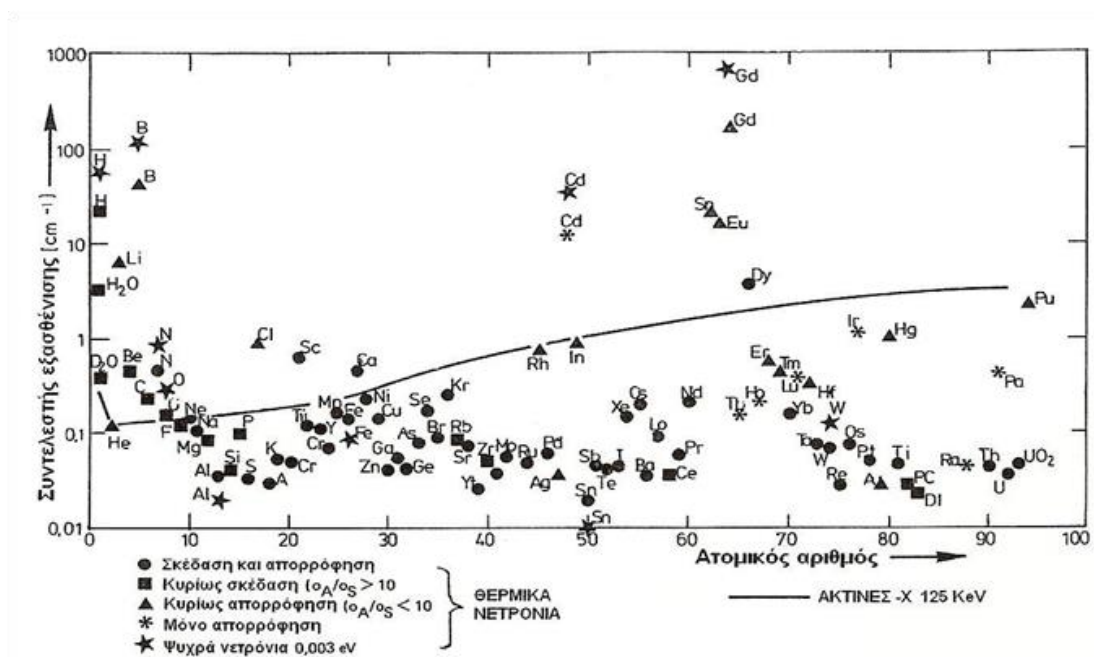
- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο),
- στην αεροδιαστημική (πλαίσια αεροπλάνων & διαστημόπλοιων, πύραυλοι, κινητήρες τζετ),
- στις κατασκευές (κτήρια, γέφυρες),
- στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες),
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις),
- στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες),
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς,
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τρένα μεγάλης ταχύτητας),
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες),
- στη μικροηλεκτρονική (μελέτη ημιαγωγών, κατασκευή και έλεγχος ημιαγωγικών διατάξεων), αλλά και σε πολλές εφαρμογές που αφορούν μηχανικούς [Sorenson and Phelps, 1980 - Mix, 1987 - Bray and McBride, 1992 – Quinn and Singl, 2001 – Hussein, 2004]. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά εφαρμογές στον τομέα του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται στον έλεγχο μονώσεων καλωδίων, ελαίων μετασχηματιστών κ.α..

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, καθεμία από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και, επίσης, μπορεί να διακρίνεται σε περισσότερες από μια τεχνικές. Η αξία

καθεμιάς μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπόψη μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ.

6.2 Ραδιογραφικές μέθοδοι

Στην περίπτωση αυτή η μελέτη του Σχήματος 6.1 καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς με βάση αυτό καθορίζεται η πηγή (νετρονίων ή φωτονίων) που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνάρτηση με το υλικό που μελετάται, την επιθυμητή ευαισθησία της εκάστοτε διάταξης και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η μέτρηση.

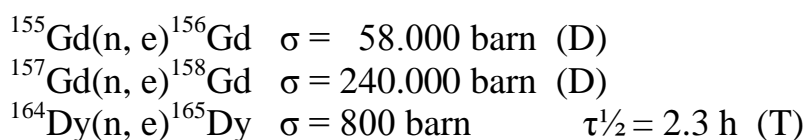


Σχήμα 6.1 Ο συντελεστής εξασθένησης των υλικών σε σχέση με τον ατομικό αριθμό τους για θερμικά νετρόνια και ακτίνες-X

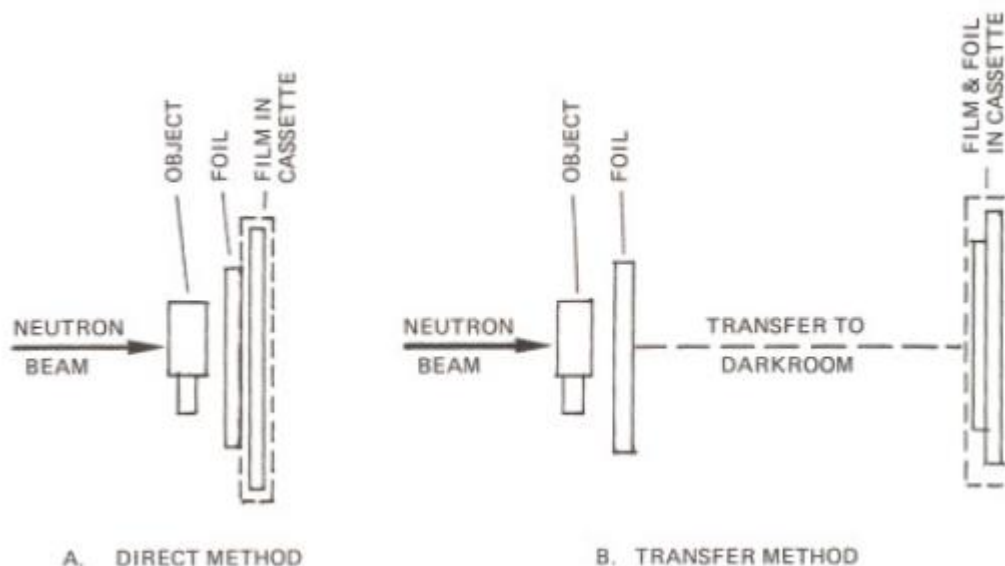
6.2.1 Απεικονιστικές αρχές ραδιογραφίας νετρονίων

Το Σχήμα 6.2 περιγράφει τις απεικονιστικές τεχνικές της ραδιογραφίας νετρονίων. Η ραδιογραφία νετρονίων κάποιου αντικειμένου (object) βασίζεται στην καταγραφή της έντασης της δέσμης ακτινοβολίας, που διαπερνά το αντικείμενο. Η καταγραφή γίνεται με φιλμ ή οθόνες φθορισμού, άρα απαιτεί ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση της ραδιογραφίας με νετρόνια, η δέσμη των νετρονίων (neutron beam) που διαπερνά το αντικείμενο, επιβάλλεται να μετατραπεί σε ηλεκτρόνια, πριν προσκρούσει στο φιλμ ή στην οθόνη φθορισμού. Επομένως, μεταξύ του αντικειμένου και της μονάδας καταγραφής παρεμβάλλεται ένα φύλλο (foil) υλικού που, όταν αντιδράσει με νετρόνια, παράγει κάποιο νουκλίδιο, το οποίο διασπάται με την εκπομπή ηλεκτρονίου.

Εάν η εκπομπή του ηλεκτρονίου είναι ακαριαία, τότε η μονάδα καταγραφής συμπεριλαμβάνεται στην διάταξη της ραδιογραφίας (direct method, D). Σε περίπτωση που το παραγόμενο νουκλίδιο είναι ραδιενεργό, τότε το φύλλο, αφού ακτινοβοληθεί αρκετά, ώστε να αναπτυχτεί ικανοποιητική ραδιενέργεια, μεταφέρεται σε άλλο χώρο και τοποθετείται σε επαφή με την μονάδα καταγραφής (transfer method, T). Η πρώτη μέθοδος έχει το μειονέκτημα σε σχέση με τη δεύτερη, ότι η καταγραφή πραγματοποιείται συνήθως σε χώρους υψηλής ραδιενέργειας υπόβαθρου με αποτέλεσμα την μείωση της ευκρίνειας του ειδώλου. Τυπικά νουκλίδια ως υλικά του φύλλου, για τις δυο μεθόδους αντίστοιχα, είναι:



Στην περίπτωση της κλασικής ραδιογραφίας με ακτίνες -X εφαρμόζεται η μέθοδος A (Σχήμα 6.2) διότι είναι δυνατή η καταγραφή των ακτίνων-X, που διαπερνούν το αντικείμενο απ' ευθείας από την καταγραφική μονάδα. Η διαφορά μεταξύ των νετρονίων και των ακτίνων -X, όσον αφορά τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασής τους με υλικά, δίνει διαφορετικές και συχνά συμπληρωματικές πληροφορίες στις αντίστοιχες ραδιογραφίες.

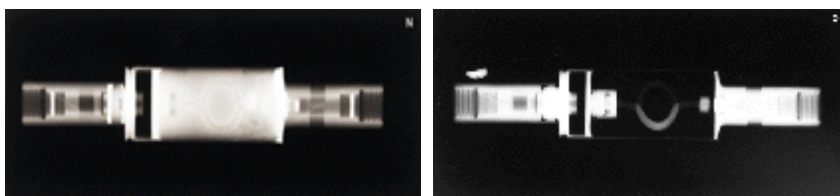


Σχήμα 6.2 Απεικονιστικές τεχνικές της ραδιογραφίας νετρονίων

Ενώ η απορρόφηση των ακτίνων -X εξαρτάται άμεσα από τον ατομικό αριθμό, τα νετρόνια απορροφούνται αποτελεσματικά από μερικά συγκεκριμένα μόνο στοιχεία. Παραδείγματος χάρη τα οργανικά υλικά ή το νερό είναι σαφώς ορατά στις ραδιογραφίες νετρονίων λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε υδρογόνο, ενώ πολλά δομικά υλικά όπως το αλουμίνιο ή ο χάλυβας είναι σχεδόν

διαφανή. Το Σχήμα 6.1 δείχνει τη συμπεριφορά διαφόρων υλικών, όταν αυτά τοποθετηθούν στην πορεία μιας δέσμης νετρονίων ή ακτίνων $-X$.

Η διαφορά των ακτίνων $-X$ από τη ραδιογραφία νετρονίων μπορεί να φανεί και από τη σύγκριση των Σχημάτων 6.3α και 6.3β, που δείχνουν τη ραδιογραφία μιας ασφάλειας που χρησιμοποιείται στο διαστημικό πρόγραμμα Ariane με τις δύο αυτές τεχνικές αντίστοιχα [von der Hardt and Rottger, 1981].

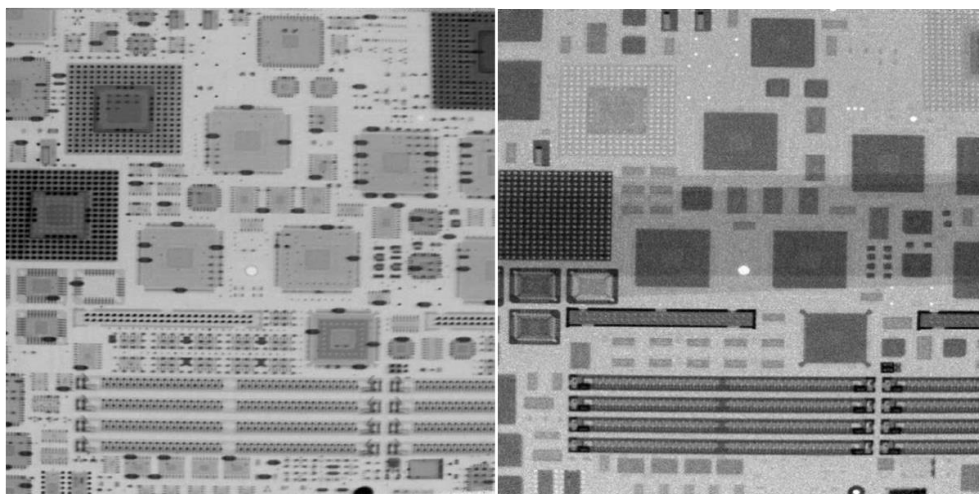


(α)

(β)

Σχήμα 6.3 Ραδιογραφία μιας ασφάλειας του προγράμματος Ariane με χρήση (α) ακτίνων $-X$ (β) ραδιογραφίας νετρονίων

Στα Σχήματα 6.4α και 6.4β φαίνεται η γραφική απεικόνιση μιας μητρικής κάρτας υπολογιστή με χρήση ακτίνων- X και νετρονίων αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα δυο σχήματα, παρατηρούμε ότι στο Σχήμα 6.4α μεγαλύτερη αντίθεση δίνεται από τα μεταλλικά pins, ενώ στο Σχήμα 6.4β μεγαλύτερη αντίθεση δίνεται από τα πλαστικά μέρη, ενώ τα μεταλλικά μέρη είναι σχεδόν διαφανή.



Σχήμα 6.4 γραφική απεικόνιση μητρικής κάρτας υπολογιστή με χρήση (α) ακτίνων- X και (β) νετρονίων

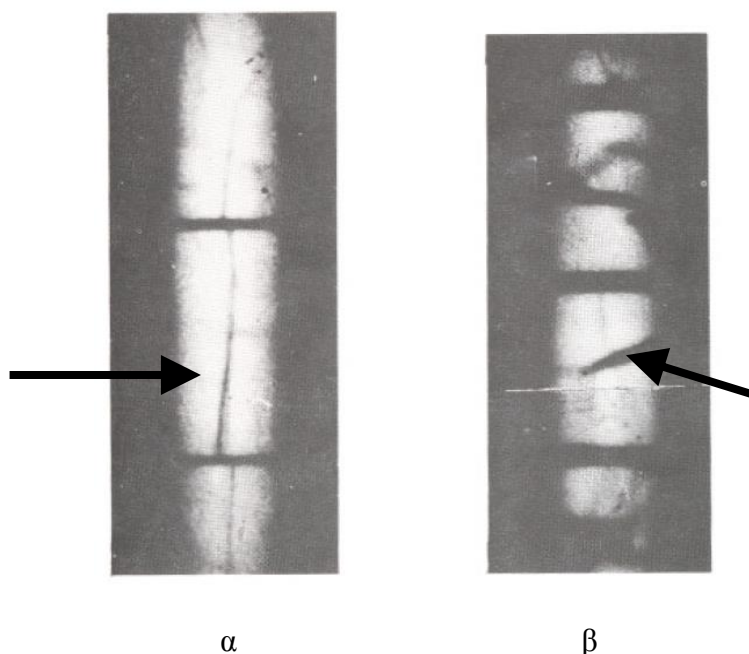
6.2.2 Εφαρμογές στην πυρηνική τεχνολογία

Πιθανότατα, η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της ραδιογραφίας νετρονίων είναι η εξέταση πειραματικών ράβδων καυσίμου. Η ραδιογραφία νετρονίων χρησιμοποιείται τακτικά για τον έλεγχο ποιότητας των πυρηνικών καυσίμων από τις αρχές του 1970. Με τη ραδιογραφία νετρονίων είναι δυνατόν να

παρατηρηθούν ιδιαίτερα δεδομένα, όπως ρωγμές, διόγκωση, παραμόρφωση [Φαντίδης, 2010α; Fantidis et al., 2010b & c; von der Hardt and Rottger, 1981]. Οι αλλαγές διαστάσεων του καυσίμου μπορούν να μετρηθούν και έπειτα να μετατραπούν σε αλλαγές όγκου με πολύ προσεκτικές τεχνικές.

Μια ραδιογραφία νετρονίων θα διακρίνει τα ισότοπα μεταξύ των στοιχείων μιας και αυτά έχουν πολύ συχνά διαφορετικές ενεργές διατομές. Για παράδειγμα το ^{235}U έχει θερμική ενεργό διατομή 100.5 barns, ενώ η ενεργός διατομή του ^{238}U είναι 2.7 barn. Τέτοιες διαφορές είναι ανιχνεύσιμες και επιτρέπουν τον έλεγχο πειραματικών στοιχείων καυσίμου για τη μετέπειτα χρήση τους.

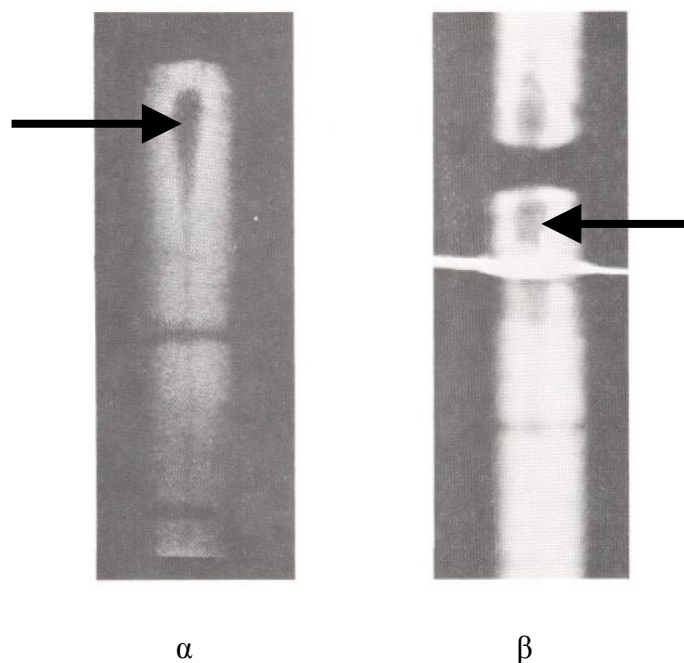
Η ραδιογραφία νετρονίων χρησιμοποιείται για τη μελέτη: (1) εξαντλημένου καυσίμου ως προς την παρουσία ρωγμών (Σχήμα 6.5 και 6.6) και κενού (void) (Σχήμα 6.7) σε δισκία καυσίμου στη ράβδο του εξαντλημένου καυσίμου, (2) του περιβλήματος της ράβδου του εξαντλημένου καυσίμου ως προς την παρουσία υδριδίων (hydrides) (Σχήμα 6.8) καθώς και παραμόρφωσης και πλήρους ρωγμής (Σχήμα 6.9), και (3) παραμόρφωσης του ελατηρίου συγκράτησης των δισκίων καυσίμου στη ράβδο του εξαντλημένου καυσίμου (Σχήμα 6.10).



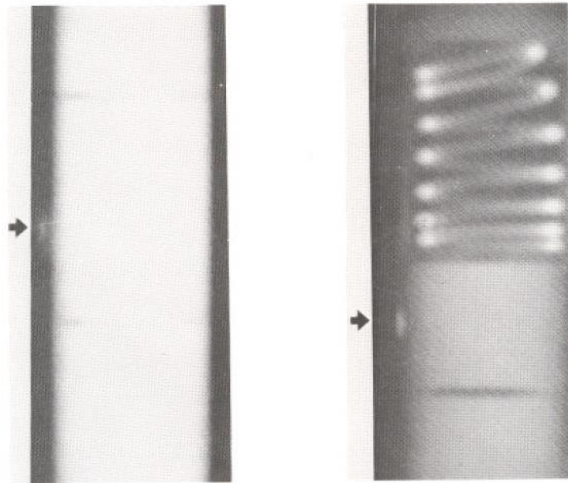
Σχήμα 6.5 Ρωγμές σε εξαντλημένο καύσιμο ((α) διαμήκεις και (β) εγκάρσιες)



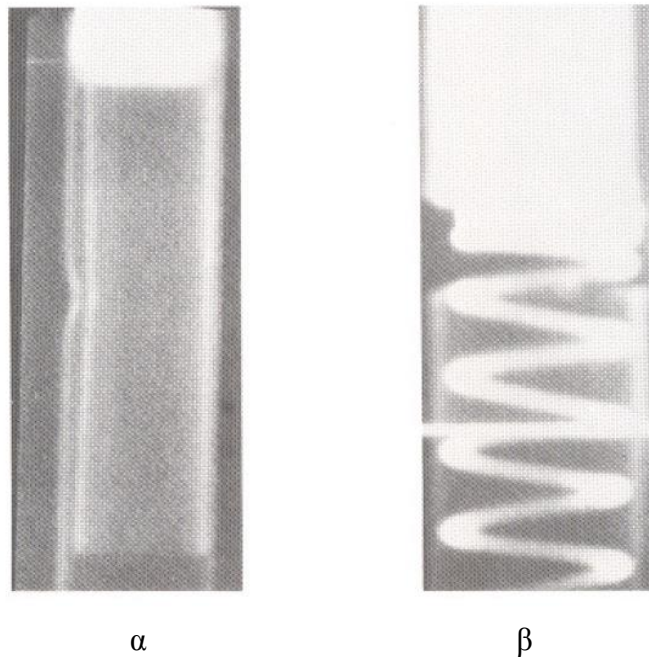
Σχήμα 6.6 Ρωγμές σε δισκία καυσίμου μέσα στη ράβδο του εξαντλημένου καυσίμου (clad-περίβλημα, fuel-καύσιμο)



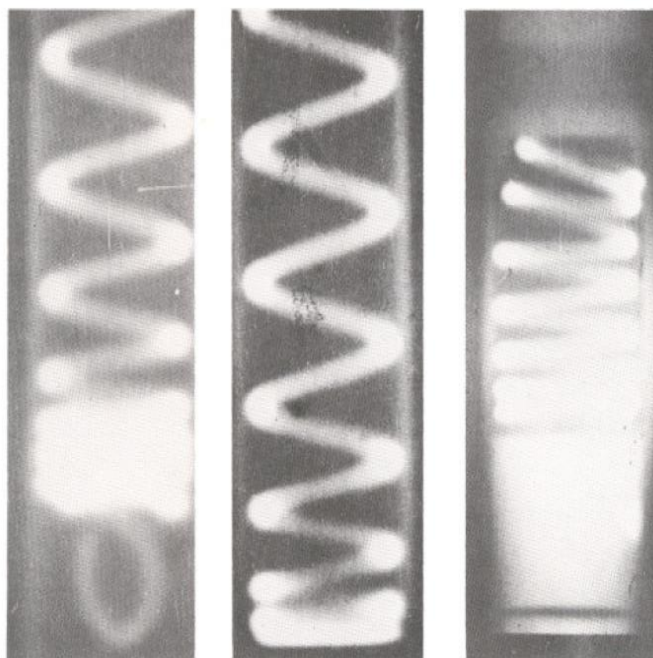
Σχήμα 6.7 Κενό (void) σε εξαντλημένο καύσιμο ((α) σε ένα δισκίο και (β) σε διαδοχικά δισκία)



Σχήμα 6.8 Υβρίδια (hydrides) στο περίβλημα ράβδου εξαντλημένου καυσίμου



Σχήμα 6.9
Παραμόρφωση (α) και πλήρης ρωγή (β) στο περίβλημα ράβδου εξαντλημένου καυσίμου



Σχήμα 6.10 Παραμόρφωση του ελατηρίου συγκράτησης των δισκίων καυσίμου σε ράβδο εξαντλημένου καυσίμου

6.3 Ραδιοσκοπία νετρονίων: δυναμική απεικόνιση

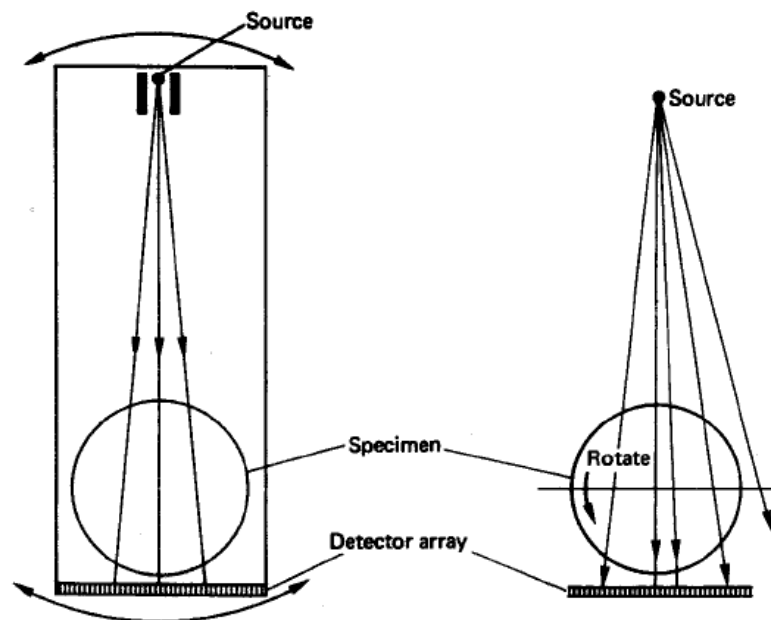
Η ραδιοσκοπία νετρονίων περιλαμβάνει τη συνεχή απεικόνιση της απορρόφησης μιας δέσμης νετρονίων χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή "πραγματικού χρόνου". Ενώ η ραδιογραφία νετρονίων εμφανίζεται πάνω σε ένα απλό φωτογραφικό φιλμ, η ραδιοσκοπία χρησιμοποιεί έναν σπινθηριστή (scintillator) και μια βιντεοκάμερα. Οι πληροφορίες, που προκύπτουν, βοηθούν στην κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς σύνθετων συστημάτων.

Η ανάπτυξη αυτής της τεχνικής είναι συνεχώς αυξανόμενη χάρη στη μεγάλη βελτίωση του τηλεοπτικού εξοπλισμού, των φωτογραφικών μηχανών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι περισσότερες από τις γνωστές μέχρι σήμερα εφαρμογές συνίστανται στην απεικόνιση των ρευστών, που ρέουν μέσω μεταλλικών κατασκευών. Ουσιαστικά, αυτό που γίνεται είναι η ανίχνευση των ατόμων υδρογόνου, που ενυπάρχουν σε τέτοια ρευστά, από τα νετρόνια. Οι κύριοι τομείς όπου η δυναμική απεικόνιση νετρονίων έχει χρησιμοποιηθεί είναι:

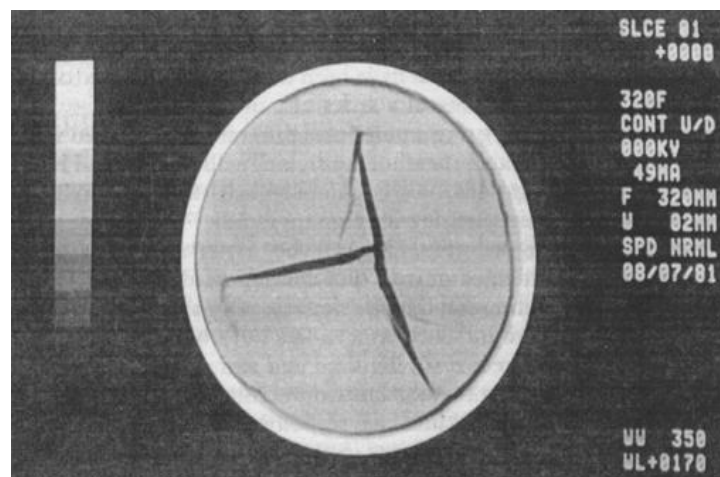
- εξέταση συμπεριφοράς καυσίμων (συστήματα ψεκασμού, τροφοδοσίας κ.α.),
- λίπανση με χρήση ελαίων (μηχανές, κιβώτια ταχυτήτων κ.α.),
- μεταφορά και μετακίνηση των ρευστών σε πορώδη υλικά,
- διαφασική ροή (εναλλάκτες θερμότητας, συμπυκνωτές, σωληνώσεις γεννητριών ατμού).

6.4 Ψηφιακή ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography)

Η τομογραφία είναι ένα σύνολο από ραδιογραφίες που αποτυπώνονται ψηφιακά και υφίστανται επεξεργασία με Η/Υ (Σχήματα 6.13 & 6.14). Αντί του γραφικού φιλμ, κάθε ραδιογραφία αποτυπώνεται σαν ψηφιακή πληροφορία μετατρέποντας τη φωτεινότητα κάθε κόκκου του φιλμ σε bytes. Μια 3-διάστατη τομογραφία γίνεται με τη σύνθεση δεκάδων ψηφιακών ραδιογραφιών. Κάθε ραδιογραφία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο είτε περιστρέφοντας το αντικείμενο είτε περιστρέφοντας τη συσκευή ραδιογραφίας. Η σύνθεση γίνεται από το πρόγραμμα του Η/Υ, που ελέγχει τη συσκευή και γνωρίζει ακριβώς τις θέσεις και τις γωνίες λήψης των εικόνων.



Σχήμα 6.13 Τομογραφία με περιστροφή (α) της πηγής και (β) του αντικειμένου



Σχήμα 6.14 Δείγμα τομογραφίας μεταλλικού υλικού με σοβαρή ρωγμή στο εσωτερικό

6.5 Άλλες μέθοδοι Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου [Bennett et al., 2005]

Οπτικές Μέθοδοι

- Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection)
- Οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο
- Οπτικός έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (Video Inspection)
- Οπτικές μέθοδοι με Laser
- Ολογραφία (Holography)

Δυναμικός Έλεγχος Επιφάνειας (Dynamic Surface-Inspection)

Μέθοδοι Υπερήχων (Ultrasonic inspection)

- Τεχνικές Ανάκλασης
- Τεχνικές Περίθλασης (Time of Flight Diffraction ultrasonics – TOFD)
- Συστοιχίες Φάσης Υπερήχων (Phased Array ultrasonics)
- Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System - IRIS)

Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Flaw testing)

Μέθοδοι Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission, AE) – (φάσμα υπερήχων)

Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)

Ηλεκτρικές μέθοδοι

- Ρεύματα Eddy (Eddy-Current & Remote field testing - RFT)
- Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)

Μαγνητικές μέθοδοι

- Έλεγχος Μαγνητικό Μελάνι/Σκόνη (Magnetic Ink/Powder)
- Έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles)
- Μαγνητογραφία (Magnetography)
- Απώλεια Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)
- Έλεγχος θορύβου Barkhausen

Μηχανικοί Έλεγχοι

- Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic-Impact) – (ηχητικό φάσμα)
- Θερμογραφικός Έλεγχος (Thermographic inspection) (υπέρυθροι έλεγχοι)
- Μέθοδοι Μηχανικής Αντίστασης (Mechanical Impedance)
- Έλεγχοι Ταλαντώσεων (Vibration Monitoring)

Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection & testing)

Μικροκυματικές μέθοδοι (Microwave)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Φαντίδης Ι., ‘Βέλτιστος σχεδιασμός κινητής διάταξης μη καταστρεπτικού ελέγχου τρισδιάστατων αντικειμένων με χρήση πυρηνικών ακτινοβολιών’, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών

Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, (2010α).

- Bennett L.G.I., Chalovich T.R., Lewis W.J.: Comparison of Neutron Radiography With Other Non-Destructive Techniques for the Inspection of CF188 Flight Control Surfaces, IEEE Trans. on Nucl. Sci. 52, p. 334 (2005)
- Bray D.E., McBride D.: Nondestructive Testing Techniques, New York, John Wiley & sons, (1992)
- Domanus J.C.: Collimators for Thermal Neutron Radiography-An Overview, D. Reidel Publishing Company, (1987)
- Fantidis J., Nicolaou G., Tsagas N. F.: A transportable neutron radiography system. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 284, p. 479, (2010b)
- Fantidis J., Nicolaou G., Tsagas N. F.: Optimization study of a transportable neutron radiography unit based on a compact neutron generator Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 618, p. 331, (2010c)
- Hussein E.M.A.: Handbook on Radiation Probing, Gauging, Imaging and Analysis Volume II Applications and Design, Kluwer Academic Publishers, (2004)
- Mix, P.E., Introduction to Nondestructive Testing, New York, John Wiley and sons, (1987)
- Quinn R.A., Sigl C.C.: Radiography in Modern Industry, Eastman Kodak Company, Rochester, New York, (2001)
- Sorenson J.S. Phelps M.E.: Physics in Nuclear Medicine, Grune & Stratton Inc., (1980)
- von der Hardt, P., Rottger, H.: Commission of the European Communities Neutron Radiography Handbook: Nuclear Science and Thechnology, D. Reidel Publishing Company, (1981)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MONTE CARLO N-PARTICLE (MCNP)

7.1 Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στην Πυρηνική Τεχνολογία

Η μέθοδος Monte Carlo βρήκε ιδιαίτερη εφαρμογή στην Πυρηνική Τεχνολογία και, συγκεκριμένα, σε εφαρμογές με βάση τη διάχυση ακτινοβολιών στην ύλη. Οι κυριότεροι λόγοι είναι ότι πολλές διαδικασίες στο χώρο αυτό εμφανίζουν ουσιαστική στοχαστική συμπεριφορά και μια πιθανή μέθοδος υπολογισμού συνίσταται στην αριθμητική εξομοίωση των διαδικασιών αυτών. Επιπλέον, σε ορισμένα μαθηματικά προβλήματα, για παράδειγμα στον υπολογισμό ολοκληρωμάτων και στην επίλυση γραμμικών ολοκληρωτικών εξισώσεων σε πολλές διαστάσεις, οι μέθοδοι Monte Carlo μπορεί να είναι υπολογιστικά επαρκείς. Ένας άλλος λόγος είναι ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν 'πειράματα' σε διάφορες κατασκευές, που έχουν ή πρόκειται να εγκατασταθούν χωρίς να υπάρχει κόστος σε χρήματα, χρόνο και ασφάλεια της πραγματικής συσκευής. Το ουσιώδες μειονέκτημα των μεθόδων Monte Carlo έγκειται στο ότι όλες οι απαντήσεις που δίνονται είναι στατιστικές. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά τους από την ακριβή απάντηση στο τιθέμενο πρόβλημα είναι μια τυχαία μεταβλητή.

Τα προβλήματα μεταφοράς νετρονίων και φωτονίων είναι γενικά πολύ δύσκολα στην αντιμετώπισή τους. Συνεπώς, σε πραγματικούς αναλυτικούς υπολογισμούς γίνονται πολλές προσεγγίσεις ή εξιδανικεύσεις. Για παράδειγμα πραγματικές γεωμετρίες συχνά εξιδανικεύονται ως σφαίρες, κύλινδροι και πλάκες. Οι περισσότερες γνώσεις για τα προβλήματα ενός αντιδραστήρα έχουν αποκτηθεί πειραματικά. Η απόκτηση γνώσεων για τα προβλήματα αυτά, είναι δυνατή με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo, χωρίς να υπάρχει δέσμευση από το πείραμα. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε προβλήματα που δεν απαιτείται ακριβής απάντηση στο πρόβλημα, αλλά η τάξη μεγέθους της απάντησης. Υπάρχει πληθώρα περιπτώσεων, όπου τα αποτελέσματα της μεθόδου Monte Carlo επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά.

7.2 Φύση της μεθόδου Monte Carlo

Η βασική μορφή της μεθόδου Monte Carlo είναι η διεξαγωγή ενός "πειράματος" σε έναν υπολογιστή, με την εξομοίωση της πραγματικής φυσικής σωματιδιακής συμπεριφοράς. Ο όρος Monte Carlo οφείλεται στη χρήση τυχαίων αριθμών για τον καθορισμό του αποτελέσματος μιας ακολουθίας πιθανοτικών γεγονότων. Η κεντρική λειτουργία της μεθόδου Monte Carlo είναι η δημιουργία μιας σειράς ιστοριών σωματιδίων, που εκπέμπονται από την πηγή. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τεχνικές τυχαίας δειγματοληψίας, οι οποίες ακολουθούν όμως κάποιους κανόνες όπως π.χ. ιστροπική εκπομπή (εκπομπή 4 π), ομοιόμορφη ή όχι κατανομή ραδιενέργειας, για την εξομοίωση πιθανοτικών νόμων που περιγράφουν

τη συμπεριφορά του σωματιδίου. Ανιχνεύεται, λοιπόν, βήμα προς βήμα η "τυχαία διαδρομή" του σωματιδίου στο μέσο.

Η ιστορία του σωματιδίου ακολουθείται έως ότου να μην μπορεί πλέον να συνεισφέρει στο αποτέλεσμα για το οποίο υπάρχει ενδιαφέρον (π.χ. πολύ μικρή συνεισφορά λόγω πολύ μικρής ενέργειας, που απέμεινε στο φωτόνιο μετά από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ή διαφυγή από το σύστημα). Στην περίπτωση αυτή η ιστορία του σωματιδίου τελειώνει και μία νέα ιστορία σωματιδίου ξεκινά. Όταν αρκετός αριθμός ιστοριών σωματιδίων έχει εξεταστεί το τελικό αποτέλεσμα εκτιμάται ανάλογα με την περίπτωση δίνοντας τη ζητούμενη απάντηση.

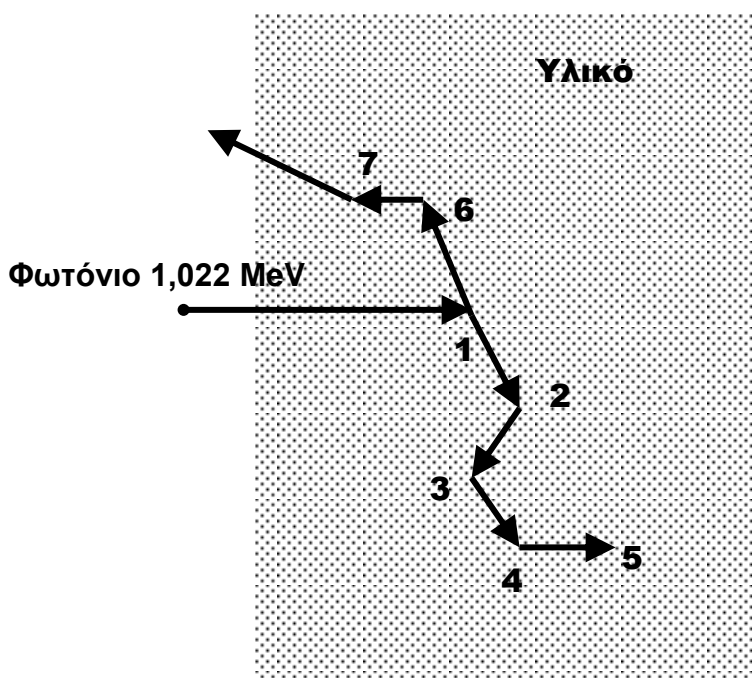
Αφού η μέθοδος Monte Carlo είναι βασισμένη σε στατιστικά στοιχεία, η απάντηση που δίνει δεν είναι μοναδική, αλλά μια εκτίμηση, που βρίσκεται μέσα σε κάποια όρια, γύρω από την πραγματική απάντηση. Το μέγεθος του στατιστικού λάθους συσχετίζεται με το αποτέλεσμα. Για τη μείωση του λάθους αυτού σε ανεκτά επίπεδα, συνήθως, απαιτείται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ιστοριών σωματιδίων να παρακολουθηθούν από τη γέννηση έως το θάνατό τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Ωστόσο, ακόμα και εκατομμύρια ιστορίες σωματιδίων, αν παρακολουθηθούν, ο αριθμός αυτός είναι πολύ μικρότερος από τον πραγματικό αριθμό σωματιδίων που εκπέμπονται από μια τυπική πηγή ραδιενέργειας σε ένα πραγματικό πείραμα. Η μέθοδος Monte Carlo επιτρέπει τη θεώρηση δύσκολων τριδιάστατων γεωμετριών και πολύπλοκων φυσικών διαδικασιών, που η επίλυση τους με άλλο τρόπο είναι σχεδόν αδύνατη.

7.3 Παράδειγμα λειτουργίας της μεθόδου Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιγράψει θεωρητικά μία στατιστική διαδικασία (όπως η αλληλεπίδραση πυρηνικών σωματιδίων με υλικά) και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για πολύπλοκα προβλήματα, τα οποία δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν από κώδικες υπολογιστών, που χρησιμοποιούν ντετερμινιστικές μεθόδους. Τα ανεξάρτητα πιθανοτικά γεγονότα, που περιέχει μια διαδικασία, εξομοιώνονται διαδοχικά. Γενικά, η εξομοίωση πραγματοποιείται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, διότι ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών για την περιγραφή ενός φαινομένου είναι κατά κανόνα πολύ μεγάλος.

Η στατιστική δειγματοληπτική διαδικασία είναι βασισμένη σε μια συλλογή τυχαίων αριθμών - κάτι ανάλογο με το ρίξιμο ενός ζαριού σε ένα καζίνο - απ' όπου και το όνομα Monte Carlo. Η τεχνική της μεθόδου Monte Carlo είναι πολύ ρεαλιστική στη μεταφορά σωματιδίων. Αποτελείται στην πραγματικότητα από την παρακολούθηση καθενός από τα τόσα σωματίδια, από τη στιγμή που φεύγει το σωματίδιο από την πηγή και σ' όλη τη διάρκεια της ζωής του βήμα προς βήμα (π.χ. απορρόφηση, διαφυγή κ.λ.π.). Οι διαδρομές των σωματιδίων προέρχονται από μία τυχαία δειγματοληψία, η οποία βέβαια χρησιμοποιεί κάποια από τα δεδομένα μεταφοράς, ώστε να μπορέσει να προσδιορίσει την έκβαση κάθε βήματος της ζωής του σωματιδίου.

Το Σχήμα 7.1 παρουσιάζει μια τυχαία ιστορία ενός φωτονίου, το οποίο εισέρχεται σε ένα υλικό. Οι αριθμοί από 1 έως 7 δείχνουν τα σημεία αλληλεπίδρασης του φωτονίου με το υλικό. Στο σημείο 1 προκύπτουν δύο φωτόνια με ίση ενέργεια 0.511 MeV σε αντίθετη κατεύθυνση λόγω της δίδυμης γένεσης. Στα σημεία 2, 3, 4, 6, 7 υπάρχει σκέδαση (φαινόμενο Compton) των φωτονίων με σταδιακή μείωση της ενέργειάς τους. Στο σημείο 5 το ένα φωτόνιο εναποθέτει πλήρως την ενέργειά του στο υλικό (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Στο σημείο 7 το φωτόνιο σκεδάζεται αφήνοντας το υλικό. Τους τρόπους αλληλεπίδρασης διέπουν οι συντελεστές εξασθένισης.



Σχήμα 7.1 Η ιστορία ενός φωτονίου

7.4 Ο κώδικας MCNP

Ο κώδικας MCNP είναι ένας, γενικής σπουδαιότητας, συνεχούς ενέργειας, γενικευμένης γεωμετρίας, χρονοεξαρτώμενος κώδικας Monte Carlo [Pelowitz, 2005]. Ο MCNP μελετά τη μεταφορά μέσα στην ύλη: μόνο νετρονίων, μόνο φωτονίων, νετρονίων / φωτονίων, όπου όμως τα φωτόνια παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις νετρονίων, φωτονίων / ηλεκτρονίων, ηλεκτρονίων / φωτονίων και νετρονίων / φωτονίων / ηλεκτρονίων. Η ενέργεια των νετρονίων είναι της τάξης μεγέθους των 10^{-11} MeV έως 20 MeV. Η ενέργεια των φωτονίων είναι της τάξης των 1 keV έως 100 GeV, το ίδιο και η ενέργεια των ηλεκτρονίων. Ο χρήστης δημιουργεί ένα αρχείο εισόδου (input file), το οποίο στη συνέχεια διαβάζεται από τον κώδικα MCNP. Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες σχετικές με το πρόβλημα, όπως:

- περιγραφή γεωμετρίας,
- περιγραφή υλικών και ενεργών διατομών,

- θέση, γεωμετρία και χαρακτηριστικά της πηγής νετρονίων φωτονίων ή ηλεκτρονίων,
- τύπος απαντήσεων ή επιθυμητά αποτελέσματα,
- τεχνικές μείωσης των αποκλίσεων, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας.

7.4.1 Η δομή ενός αρχείου εισόδου

Ένα αρχείο εισόδου, το οποίο διαβάζεται από τον κώδικα MCNP, έχει την ακόλουθη μορφή:

Γενικός τίτλος (προαιρετικά)

Κενή διαχωριστική γραμμή (προαιρετικά)

Κάρτες κυψελών

•

•

Κενή διαχωριστική γραμμή

Κάρτες επιφανειών

•

•

Κενή διαχωριστική γραμμή

Κάρτες δεδομένων

•

•

Κενή γραμμή τερματισμού αρχείου εισόδου (προαιρετικά)

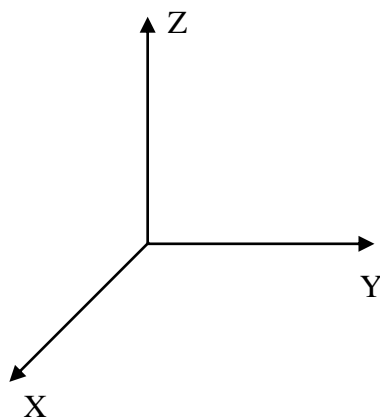
Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιεί ο κώδικας και βάσει του οποίου πρέπει να γίνονται όλες οι αναγωγές φαίνονται στον Πίνακα 7.1

Πίνακας 7.1 Μονάδες που χρησιμοποιεί ο κώδικας MCNP

Μέγεθος	Μονάδα στο MCNP
Μήκος	cm
Ενέργεια	MeV
Χρόνος	Παλμοί (10^{-8} sec)
Επιφάνεια	cm ²
Όγκος	cm ³
Θερμότητα	MeV (kT)
Ατομική πυκνότητα	atoms/barn-cm
Μαζική πυκνότητα	g/cm ³
Ενεργός διατομή	barn ($1b=10^{-24}$ cm ²)

7.4.2 Προσδιορισμός της γεωμετρίας

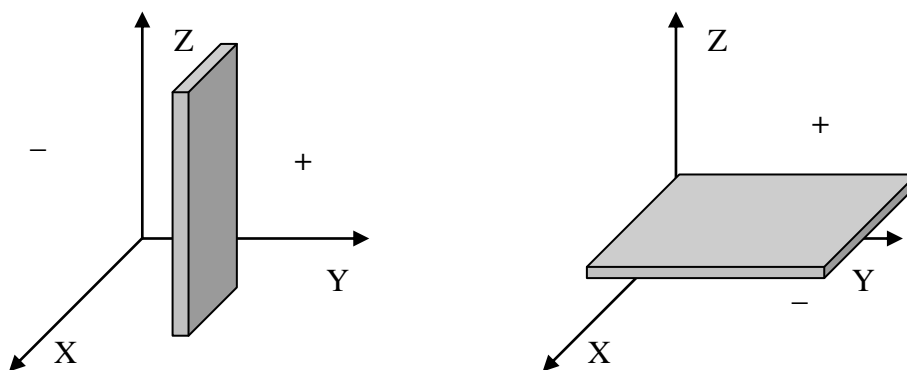
Η γεωμετρία του MCNP επεξεργάζεται ένα συνδυασμό υλικών (τον οποίο επιλέγει ο χρήστης) σε τριδιάστατες γεωμετρικές κυψέλες, οι οποίες περικλείονται από επιφάνειες καθώς και ελλειπτικές καμπύλες. Οι κυψέλες προκύπτουν από τις τομές, τις ενώσεις και από τα συμπληρώματα περιοχών, τα οποία περικλείονται από επιφάνειες. Οι επιφάνειες προσδιορίζονται από κάποιους συντελεστές αναλυτικών εξισώσεων ή σε ορισμένες περιπτώσεις από κάποια γνωστά σημεία πάνω σε αυτές. Ο κώδικας επεξεργάζεται γεωμετρικές κυψέλες με βάση το δεξιόστροφο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2 Το δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων

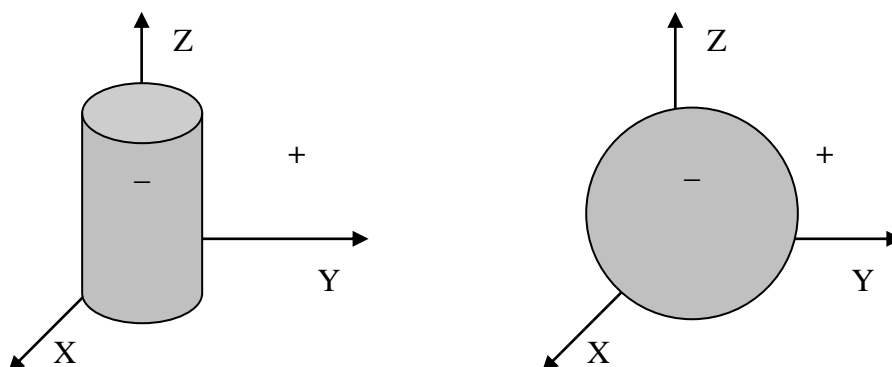
7.4.3 Κυψέλες

Στον ορισμό των κυψελών, βασική αρχή είναι η έννοια της σχετικής θέσης όλων των σημείων σε μια κυψέλη σε σχέση με την περικλειόμενη επιφάνεια. Κάθε επιφάνεια χωρίζει όλο το χώρο σε δύο περιοχές, μία με θετική σημασία σε σχέση με την επιφάνεια και μία άλλη με αρνητική σημασία. Ας υποθεθεί ότι $S=f(x, y, z)=0$ είναι η εξίσωση επιφάνειας σε ένα πρόβλημα. Για κάθε σύνολο σημείων (x, y, z) , εάν ισχύει $S=0$, τότε τα σημεία βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια. Ωστόσο, για σημεία που δε βρίσκονται στην επιφάνεια, εάν το S είναι αρνητικό, θα θεωρείται ότι τα σημεία έχουν αρνητική σημασία σε σχέση με την επιφάνεια, και αντιστρόφως, όταν το S είναι θετικό, θα θεωρείται ότι τα σημεία έχουν θετική σημασία. Για παράδειγμα ένα σημείο στο $X=3$ έχει θετική σημασία σε σχέση με το επίπεδο $X-2=0$. Δηλαδή η εξίσωση $X-D=3-2=1$ είναι θετική για $X=3$ (όπου D σταθερά). Το Σχήμα 7.3 εξηγεί τη σχετική θέση όλων των σημείων του χώρου σε σχέση με μία ανοιχτή επιφάνεια.



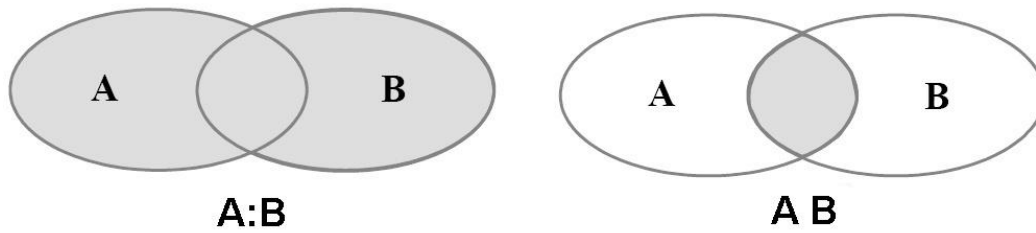
Σχήμα 7.3 Η σχετική θέση των σημείων του χώρου σε σχέση με μια ανοιχτή επιφάνεια και η θετική ή αρνητική σημασία που αποκτούν αυτά

Για κλειστές επιφάνειες, όπως σφαίρες και κυλίνδρους, τα σημεία που βρίσκονται εντός της επιφάνειας έχουν αρνητική σημασία, ενώ αυτά που βρίσκονται εκτός αυτής έχουν θετική σημασία (Σχήμα 7.4).



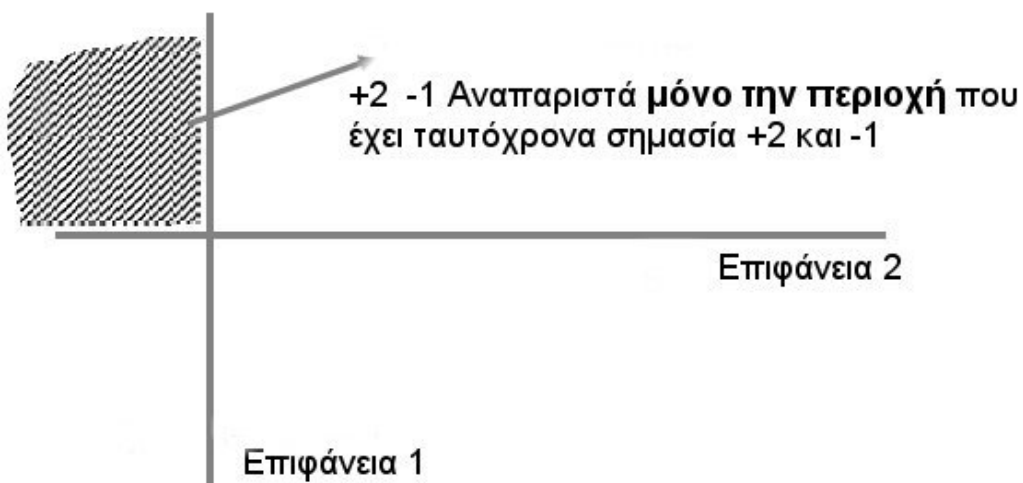
Σχήμα 7.4 Η σχετική θέση των σημείων του χώρου σε σχέση με μια κλειστή επιφάνεια και η θετική ή αρνητική σημασία τους

Η γεωμετρική περιγραφή ορίζει την κυψέλη σαν την τομή, την ένωση, ή το συμπλήρωμα περιοχών. Ακολουθώντας, δίνεται μια σύντομη εξήγηση των όρων αυτών. Έστω ότι A και B είναι δύο περιοχές του χώρου. Η περιοχή που περιέχει σημεία, τα οποία ανήκουν ταυτόχρονα και στην A και στην B, ονομάζεται τομή των A και B και συμβολίζεται $A \cap B$ (Σχήμα 7.5), ενώ η περιοχή που περιέχει σημεία που ανήκουν μόνο στην A ή μόνο στην B ή στην A και στην B μαζί, ονομάζεται ένωση των A και B και συμβολίζεται $A \cup B$ (Σχήμα 7.5). Το αποτέλεσμα της τομής δύο περιοχών είναι πάντα μια περιοχή, η οποία δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη της μίας από τις δύο. Αντιστρόφως, το αποτέλεσμα της ένωσης δίνει μια περιοχή τουλάχιστον ίση με μία από τις δύο περιοχές.



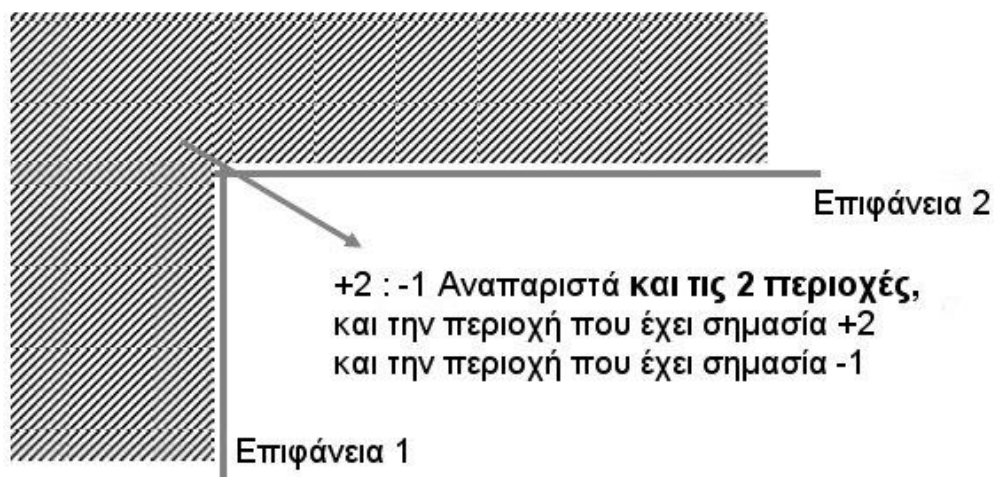
Σχήμα 7.5 Η ένωση και η τομή δύο περιοχών A και B

Το Σχήμα 7.6 κάνει περισσότερο κατανοητή τη λειτουργία του τελεστή της τομής δύο επιφανειών.



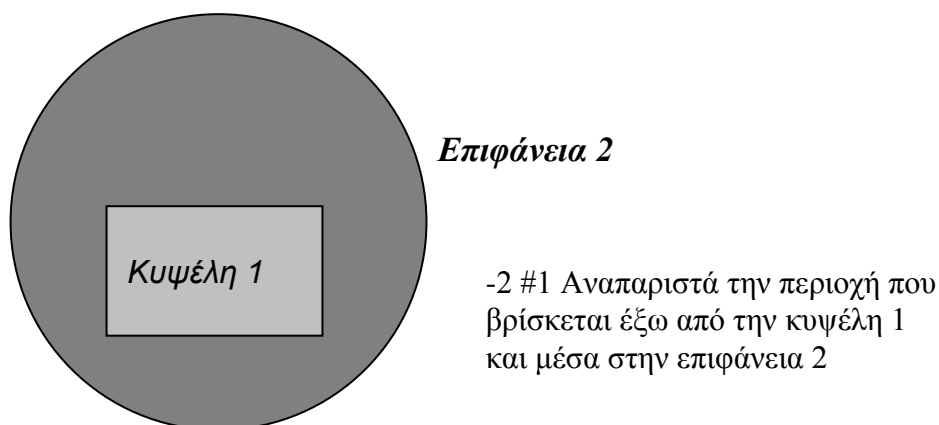
Σχήμα 7.6 Η λειτουργία του τελεστή της τομής

Για τις δύο αυτές επιφάνειες, στο Σχήμα 7.7 περιγράφεται η λειτουργία της ένωσης.



Σχήμα 7.7 Η λειτουργία του τελεστή της ένωσης

Τέλος, ο τελεστής του συμπληρώματος παριστάνει μια περιοχή, η οποία βρίσκεται έξω από μία κυψέλη. Το σύμβολο του τελεστή είναι #. Το Σχήμα 7.8 εξηγεί τη λειτουργία του τελεστή του συμπληρώματος.



Σχήμα 7.8 Η λειτουργία του τελεστή του συμπληρώματος επιφάνειας

7.4.4 Κάρτες κυψελών

Μια κάρτα κυψελών συντάσσεται με την εξής μορφή:

a m d geometry parameters

Το στοιχείο (a) μιας τέτοιας κάρτας είναι ο αριθμός της κυψέλης. Το στοιχείο (m) είναι ο αριθμός του υλικού που υπάρχει στην κυψέλη. Ο αριθμός αυτός ορίζεται αυθαίρετα από το χρήστη. Το υλικό, που αναφέρθηκε περιγράφεται επακριβώς σε μία κάρτα υλικού (Mm), η οποία έχει τον ίδιο αριθμό με τον παραπάνω και βρίσκεται στην κάρτα δεδομένων.

Το επόμενο στοιχείο της κάρτας (d) είναι η πυκνότητα του υλικού. Εάν ο αριθμός που δηλώνει την πυκνότητα είναι θετικός, τότε η πυκνότητα είναι ατομική εκφρασμένη σε 10^{24} atoms/cm³. Εάν ο αριθμός είναι αρνητικός, σημαίνει ότι αντιπροσωπεύει τη μαζική πυκνότητα με μονάδες g/cm³. Στο τέλος ακολουθεί μια σειρά συντελεστών και αριθμημένων επιφανειών, που περικλείουν την κυψέλη. Στην περίπτωση μίας κενής κυψέλης, ο αριθμός του υλικού και η πυκνότητά του μπορούν να αντικατασταθούν από ένα απλό μηδενικό.

7.4.5 Επιφάνειες

Υπάρχουν δύο τρόποι για τον ορισμό των παραμέτρων των επιφανειών στο MCNP: (1) τοποθετώντας τους κατάλληλους συντελεστές που ικανοποιούν την εξίσωση της επιφάνειας και (2) προσδιορίζοντας γνωστά γεωμετρικά σημεία σε μία επιφάνεια, τα οποία εναλλάσσονται συμμετρικά γύρω από έναν άξονα.

1) Συντελεστές των εξισώσεων επιφάνειας: Ο πρώτος τρόπος για να ορισθεί μία επιφάνεια είναι να χρησιμοποιηθεί ένα από τα μνημονικά

σύμβολα του Πίνακα 7.2 και να υπολογιστούν οι κατάλληλοι συντελεστές, που ικανοποιούν την εξίσωση επιφάνειας.

2) Σημεία που ορίζουν μια επιφάνεια: Ο δεύτερος τρόπος για τον ορισμό μιας επιφάνειας είναι να υπάρχουν κάποια γνωστά σημεία πάνω σε αυτή. Αυτή η μέθοδος είναι βολική, όταν πρέπει να σχεδιαστεί ένα μηχανολογικό σχέδιο στο οποίο είναι γνωστές οι συντεταγμένες των σημείων τομής των επιφανειών ή σημεία πάνω στις επιφάνειες. Όταν τρεις ή περισσότερες επιφάνειες τέμνονται σε ένα σημείο, αυτή η μέθοδος παράγει ένα παρακείμενο σημείο στην τομή, εάν το κοινό σημείο χρησιμοποιείται στον καθορισμό της επιφάνειας. Είναι συχνά δύσκολο, πολύπλοκες επιφάνειες να συναντώνται σε ένα σημείο, εάν οι επιφάνειες έχουν ορισθεί με βάση τους συντελεστές εξίσωσης. Η πιθανότητα αποτυχίας μιας τέτοιας συνάντησης μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη απώλεια κάποιων σωματιδίων.

Οι επιφάνειες που περιγράφονται από σημεία, μπορούν να είναι είτε ασύμμετρα επίπεδα είτε επιφάνειες κυκλικά συμμετρικές γύρω από τους άξονες X, Y, Z. Επιπλέον, πρέπει να είναι μοναδικές, πραγματικές και συνεχείς. Για παράδειγμα, σημεία που ορίζονται και στις δύο επιφάνειες ενός υπερβολοειδούς δεν επιτρέπονται, διότι η επιφάνεια που προκύπτει δεν είναι συνεχής. Είναι απαραίτητο λοιπόν να υπάρχει αναφορά σε σημεία που θα είναι όλα στη μία μόνο επιφάνεια του υπερβολοειδούς.

7.4.6 Κάρτες επιφανειών

Μια κάρτα επιφανειών συντάσσεται με την εξής μορφή:

a b surface parameters

Το στοιχείο εισόδου της κάρτας (a) είναι ο αριθμός της επιφάνειας. Το επόμενο στοιχείο της κάρτας (b) είναι η συντόμευση με κάποια γράμματα που δηλώνει τον τύπο της επιφάνειας. Οι συντομεύσεις αυτές φαίνονται στον Πίνακα 7.2. Κατόπιν ακολουθούν αριθμητικοί συντελεστές της εξίσωσης της επιφάνειας.

7.4.7 Κάρτες δεδομένων

Η κάρτα δεδομένων είναι η τρίτη κατά σειρά κάρτα στο πρόγραμμα και τοποθετείται αμέσως μετά τη δεύτερη κενή διαχωριστική γραμμή. Το όνομα της κάρτας τοποθετείται μέσα στις πέντε πρώτες στήλες. Τα υπόλοιπα δεδομένα, που ακολουθούν, χωρίζονται μεταξύ τους από ένα ή περισσότερα κενά. Η κάρτα αυτή περιέχει ένα μεγάλο πλήθος από πληροφορίες και περιλαμβάνει έξι επιμέρους κάρτες για τον καθορισμό των δεδομένων:

1. Η κάρτα MODE.
2. Η κάρτα παραμέτρων κυψελών – σπουδαιότητας.
3. Η κάρτα καθορισμού υλικών.
4. Η κάρτα προσδιορισμού της πηγής.
5. Οι κάρτες ορισμού των αποτελεσμάτων (tally cards).
6. Οι κάρτες ελέγχου λειτουργίας.

Πίνακας 7.2 Οι κάρτες επιφανειών στο MCNP

ΚΑΡΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ MCNP				
Σύμβολο	Τύπος	Περιγραφή	Εξίσωση	Κάρτες εισόδου
P	Επίπεδο ↓	Γενική	$Ax + By + Cz - D = 0$	A,B,C,D
PX		Κάθετη στον άξονα X	$x - D = 0$	D
PY		Κάθετη στον άξονα Y	$y - D = 0$	D
PZ		Κάθετη στον άξονα Z	$z - D = 0$	D
SO	Σφαίρα ↓	Με κέντρο στην αρχή των αξόνων	$(x - \bar{X})^2 + (y - \bar{Y})^2 + (z - \bar{Z})^2 - R^2 = 0$	R
S		Γενική	$(x - \bar{X})^2 + (y - \bar{Y})^2 + (z - \bar{Z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, R$
SX		Με κέντρο στον άξονα X	$(x - \bar{X})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	\bar{X}, R
SY		Με κέντρο στον άξονα Y	$x^2 + (y - \bar{Y})^2 + z^2 - R^2 = 0$	\bar{Y}, R
SZ		Με κέντρο στον άξονα Z	$x^2 + y^2 + (z - \bar{Z})^2 - R^2 = 0$	\bar{Z}, R
C/X		Κύλινδρος ↓	Παράλληλος στον άξονα X	$(y - \bar{Y})^2 + (z - \bar{Z})^2 - R^2 = 0$
C/Y	Παράλληλος στον άξονα Y		$(x - \bar{X})^2 + (z - \bar{Z})^2 - R^2 = 0$	\bar{X}, \bar{Z}
C/Z	Παράλληλος στον άξονα Z		$(x - \bar{X})^2 + (y - \bar{Y})^2 - R^2 = 0$	\bar{X}, \bar{Y}
CX	Πάνω στον άξονα X		$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY	Πάνω στον άξονα Y		$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ	Πάνω στον άξονα Z		$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R
SQ	Έλλειψη Υπερβολή Παραβολή		Άξονες μη παράλληλοι στους X Y Z	$A(x - \bar{X})^2 + B(y - \bar{Y})^2 + C(z - \bar{Z})^2 + 2D(x - \bar{X}) + 2E(y - \bar{Y}) + 2F(z - \bar{Z}) + G = 0$
GQ	Κύλινδρος Κώνος Έλλειψη Υπερβολή Παραβολή	Άξονες μη παράλληλοι στους X Y Z	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Jz + K = 0$	A,B,C,D, E,F,G,H,J, K
XYZP	Επιφάνειες καθορισμένες από σημεία			

Αρκετές από τις κάρτες δεδομένων χρειάζονται ένα δείκτη, που θα δηλώνει το είδος των σωματιδίων που μελετούνται, αν πρόκειται, δηλαδή, για φωτόνια, νετρόνια ή ηλεκτρόνια. Ο δείκτης αυτός θα αποτελείται από το σύμβολο : και το γράμμα P ή N ή E για φωτόνια, νετρόνια ή ηλεκτρόνια αντίστοιχα, και τοποθετείται αμέσως μετά από το όνομα της κάρτας. Καμία

κάρτα δεδομένων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω από μία φορά με το ίδιο όνομα. Δηλαδή επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν οι κάρτες M1 και M2, αλλά όχι να χρησιμοποιηθεί δύο φορές η κάρτα M1. Σαν γενικό σχόλιο αξίζει να αναφερθεί ότι το MCNP έχει πλήθος καρτών, που άλλες είναι υποχρεωτικές σε ένα πρόγραμμα και άλλες όχι.

7.4.8 Η κάρτα *MODE*

Το MCNP μπορεί να “τρέχει” σε πολλές μορφές ανάλογα με το είδος των σωματιδίων, που θα δηλωθεί.

- **N**: μεταφορά νετρονίων μόνο
- **P**: μεταφορά φωτονίων μόνο
- **E**: μεταφορά ηλεκτρονίων μόνο
- **N P**: μεταφορά νετρονίων και φωτονίων, που προήλθαν από νετρόνια
- **P E**: μεταφορά φωτονίων και ηλεκτρονίων
- **N P E**: μεταφορά νετρονίων, φωτονίων και ηλεκτρονίων

Η κάρτα αυτή αποτελείται από τη λέξη **MODE** ακολουθούμενη από ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω γράμματα, δηλαδή: N, P, E, N P, P E, ή N P E. Εάν παραλειφθεί η κάρτα **MODE**, τότε αυτή η απουσία ισοδυναμεί πρακτικά με την κάρτα **MODE N**. Η κάρτα **MODE N P** δεν δηλώνει νετρόνια - φωτόνια αλλά μόνο φωτόνια που προήλθαν από νετρόνια. Να σημειωθεί ότι μελέτη για φωτόνια, που παρήχθησαν, δεν υπάρχει για όλα τα υλικά. Εάν για κάποιο πρόβλημα που έχει η κάρτα **MODE N P** συμβαίνει αυτό, τότε το MCNP ενημερώνει το χρήστη τυπώνοντας προειδοποιητικά μηνύματα.

7.4.9 Κάρτα παραμέτρων κυψελών – σπουδαιότητας

Η κάρτα **IMP** προσδιορίζει τη σχετική σημαντικότητα κάθε κυψέλης από την άποψη της μεταφοράς σωματιδίων μέσα σε αυτή και εξυπηρετεί δύο σκοπούς: α) να τερματίζεται η μελέτη της ιστορίας κάθε σωματιδίου, εάν η σπουδαιότητα της κυψέλης είναι μηδέν και β) στον καταμερισμό της γεωμετρίας του προβλήματος και στο να βοηθηθούν τα σωματίδια να μετακινηθούν εύκολα σε περιοχές της γεωμετρίας με μεγαλύτερη σπουδαιότητα. Εάν πρόκειται να μελετηθούν νετρόνια χρησιμοποιείται η κάρτα **IMP:N**, για τα φωτόνια η κάρτα **IMP:P** και για τα ηλεκτρόνια η κάρτα **IMP:E**. Φυσικά, οι κάρτες αυτές μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους και έτσι να προκύψουν οι κάρτες **IMP:N, P** ή **IMP:P, E** και η **IMP:N, P, E**.

7.4.10 Κάρτες καθορισμού υλικών

Ο καθορισμός των υλικών, που χρησιμοποιούνται σε μία εφαρμογή, γίνεται με την κάρτα υλικού την **Mm**:

Mm ZAI1 fraction1 ZAI2 fraction2

Το **m** πρέπει να είναι ο ίδιος αριθμός υλικού, όπως ορίστηκε προηγουμένως στην κάρτα κυψέλης. Τα δύο επόμενα στοιχεία εισόδου της κάρτας είναι: α) ο χαρακτηριστικός αριθμός (**ZAI**) του συστατικού ή στοιχείου και β) το

ατομικό κλάσμα (ή το κλάσμα του βάρους αν ο αριθμός είναι αρνητικός). Αυτά τα δύο στοιχεία της κάρτας επαναλαμβάνονται για όσα υλικά χρειάζονται.

Ο αριθμός ZAID έχει την μορφή: ZZZAAA.nnX, όπου:

- ZZZ** είναι ο ατομικός αριθμός του στοιχείου,
- AAA** είναι ο μαζικός αριθμός,
- nn** είναι ο δείκτης εκτίμησης της διατομής. Εάν είναι κενός ή μηδέν υπάρχει μια δεδομένη τιμή που θα χρησιμοποιηθεί,
- X** είναι η έκδοση της βάσης δεδομένων: c είναι συνεχής ενέργεια, d διακριτή αντίδραση, T είναι θερμική, Y είναι δοσιμετρία, P είναι φωτόνια, E είναι ηλεκτρόνια. Για στοιχεία που απαντώνται στη φύση AAA=000. Έτσι ο αριθμός ZAID=92235 αντιπροσωπεύει το ισότοπο του ουρανίου U-235 και ο αριθμός ZAID=92000 αντιπροσωπεύει το στοιχείο ουράνιο.

7.4.11 Κάρτα προσδιορισμού της πηγής

Η κάρτα SDEF είναι μία από τις τέσσερις διαθέσιμες μεθόδους προσδιορισμού των εκκινούμενων σωματιδίων. Οι άλλες τρεις είναι οι: α) SSr κάρτα πηγής επιφάνειας, β) KCODE κάρτα πηγής κρισιμότητας και γ) κάρτα πηγής οριζόμενη από το χρήστη (θεωρείται ως δεδομένη κάρτα, όταν λείπουν οι άλλες).

Σε κάθε πρόβλημα επιτρέπεται μόνο μία κάρτα προσδιορισμού της πηγής. Η κάρτα SDEF διαχειρίζεται έναν πολύ μεγάλο αριθμό παραμέτρων και είναι μια από τις πλέον πολύπλοκες κάρτες του κώδικα MCNP. Η σύνταξη της κάρτας είναι:

SDEF παράμετρος1 παράμετρος2 ...

Οι βασικές παράμετροι, που ορίζει η κάρτα SDEF, φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

Οι τιμές στην κάρτα SDEF μπορούν να προσδιοριστούν με 3 τρόπους:

1. Ρητά, για παράδειγμα ERG=2
2. Με έναν αριθμό κατανομής, για παράδειγμα ERG=d5
3. Σαν συνάρτηση άλλων μεταβλητών, για παράδειγμα ERG=Fpos

Οι περιπτώσεις 2 και 3 για τον καθορισμό τους απαιτούν τη χρήση τριών άλλων καρτών, της SI (source information), της SP (source probabilities) και της SB (source bias).

Η κάρτα πληροφοριών για την πηγή SI έχει τη μορφή:

SIn επιλογή I₁...I_k

όπου: n=αριθμός κατανομής (n=1, 999),

επιλογή=πώς ερμηνεύονται τα I_i. Οι επιτρεπτές τιμές είναι:

- H** για κατανομή ιστογράμματος (στην περίπτωση που δε δοθεί από το χρήστη κάποια τιμή ο κώδικας

- θεωρεί την τιμή αυτή σαν δεδομένη),
- L** για διακριτές τιμές,
 - A** για σημεία όπου η κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας είναι καθορισμένη,
 - S** για έναν αριθμό κατανομών.

Πίνακας 7.3 Οι βασικές παράμετροι της πηγής

Παράμετρος	Σημασία	Δεδομένη τιμή
CEL	αριθμός αρχικής κυψέλης	-
SUR	αριθμός επιφάνειας εκκίνησης	-
ERG	αρχική ενέργεια	14 MeV
TME	χρόνος	0
POS	θέση της πηγής (συντεταγμένες X Y Z)	0 0 0
PAR	Είδος σωματιδίων της πηγής	=1 (νετρόνια) MODE=N, NP, NPE =2 (φωτόνια) MODE=P, PE =3 (ηλεκτρόνια) MODE=E

7.4.12 Κάρτες ορισμού των αποτελεσμάτων (*tally cards*)

Οι κάρτες αυτές χρησιμοποιούνται με σκοπό να προσδιορίσουν τα στοιχεία που επιθυμεί να μάθει ο χρήστης μετά από έναν υπολογισμό του MCNP, όπως για παράδειγμα το ρεύμα σε μία επιφάνεια, τη ροή σε ένα σημείο κ.ά. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να ζητηθούν με μία ή περισσότερες κάρτες. Το MCNP παρέχει κάρτες για νετρόνια, για φωτόνια και για ηλεκτρόνια, όλες σε σχέση με το είδος των σωματιδίων της πηγής (Πίνακας 7.4).

7.4.13 Κάρτες ελέγχου λειτουργίας (*cut-off cards*)

Οι κάρτες ελέγχου λειτουργίας (*cut-off cards*) χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν παραμέτρους που θα διακόψουν την λειτουργία του προγράμματος του κώδικα MCNP με βάση την αιτία, που θα ορίσει ο χρήστης. Υπάρχουν τέσσερις τέτοιου είδους κάρτες: CUT, ELPT, NPS, CTME. Η πιο συνηθισμένη κάρτα αυτού του τύπου είναι η NPS. Η μορφή της κάρτας αυτής είναι:

NPS αριθμός ιστοριών

Μόλις μελετηθούν οι ιστορίες που ορίστηκαν, το MCNP θα διακόψει τη λειτουργία του, εκτός εάν έχει διακοπεί για κάποιον άλλο λόγο π.χ. κάποιο σημαντικό σφάλμα. Για παράδειγμα αν δηλωθεί NPS 1000000, ο κώδικας θα εξετάσει 1000000 ιστορίες σωματιδίων και εκεί θα σταματήσει τη λειτουργία του.

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ιστοριών που δίνονται στο πρόγραμμα να μελετήσει, τόσο αυξάνει και ο χρόνος υπολογισμού (computing time).

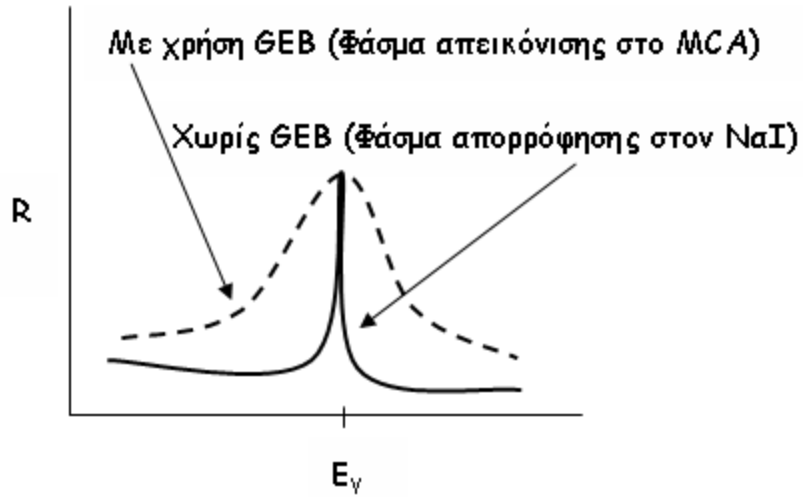
Πίνακας 7.4 Οι κάρτες ορισμού των αποτελεσμάτων

Τύπος	Περιγραφή	Μονάδες F _n	Μονάδες *F _n
F1:N F1:P	Ρεύμα σε επιφάνεια	Σωματίδια	MeV
F2:N F2:P	Μέσος όρος ροής σε επιφάνεια	Σωματίδια/cm ²	MeV/cm ²
F4:N F4:P	Μέσος όρος ροής σε μία κυψέλη	Σωματίδια/cm ²	MeV/cm ²
F5a:N F5a:P	Ροή σε σημειακό ή δισκοειδή ανιχνευτή	Σωματίδια/cm ²	MeV/cm ²
F6:N F6:N,P	Μέσος όρος εναπόθεσης	MeV/g	jerks/g
F6:P	ενέργειας σε μία κυψέλη		
F7:N	Μέσος όρος εναπόθεσης	MeV/g	jerks/g
F8:P F8:E	ενέργειας σχάσης σε μία Κατανομή ενέργειας παλμών		
F8:P,E	σε έναν ανιχνευτή	Παλμοί	MeV
+F8:E	Εναπόθεση ενέργειας	Φορτίο	-

Η κάρτα CTME δηλώνει το χρόνο λειτουργίας του προγράμματος σε λεπτά. Άρα CTME 10 σημαίνει ότι ο κώδικας θα διακόψει τη λειτουργία του ύστερα από 10 λεπτά ανεξαρτήτου του αριθμού των ιστοριών. Αν συνυπάρχουν σε ένα πρόβλημα και οι 2 αυτές κάρτες, τότε δεν υπάρχει προτεραιότητα ανάμεσα τους και η λειτουργία του διακόπτεται μόλις ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού για μία από αυτές. Η κάρτα ELPT καθορίζει ξεχωριστή ελάχιστη ενέργεια για κάθε κυψέλη του προβλήματος, ενώ η κάρτα CUT τερματίζει την μεταφορά σωματιδίου, αν ο χρόνος ξεπεράσει έναν ορισμένο χρόνο T.

7.4.14 Η εντολή GEB

Με τη χρήση της εντολής **GEB a b c** του κώδικα λαμβάνεται υπόψη η διακριτική ικανότητα (energy resolution, R) του ανιχνευτικού συστήματος φασματοσκοπίας, όπως αυτό στο Σχήμα 7.9, που προσομοιώνεται. Το διακριτό φάσμα φωτονίων απορρόφησης στον ανιχνευτή μετατρέπεται σε ένα πραγματικό φάσμα πεπλατυσμένων κορυφών, απόρροια του θορύβου του συστήματος. Η διακριτή ικανότητα του συστήματος προσδιορίζεται πειραματικά και χρησιμοποιείται για τις παραμέτρους της εντολής GEB.



Σχήμα 7.9 Τυπικό φάσμα ακτινοβολίας προ και μετά τη χρήση της εντολής GEB

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Pelowitz D. B.: MCNPXTM User's Manual Version 2.5.0, (2005)