



«Αθηνά»

## ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΠΛΩΝ

Δ/ση: Θ. Χατζίκου 11, Θεσσαλονίκη 56122, Τηλ/Fax: 2310-904794 / 6944165341, [www.armscontrol.info](http://www.armscontrol.info)

### ΚΑΡΚΙΝΟΓΕΝΕΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΜΑΖΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Θεόδωρος Ε. Λιόλιος<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων, Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών  
Τομέας Φυσικών Επιστημών & Εφαρμογών, Εργαστήριο Πυρηνικής-Ατομικής Φυσικής  
Βάρη Αττικής, 16673

<sup>2</sup> Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων, Θ.Χατζίκου 11, Θεσσαλονίκη 56122

28 Ιουνίου 2003

Ας υποθέσουμε ότι μια ποσότητα ενός ραδιολογικού υλικού διαρρέει εκούσια η ακούσια σε ένα κλειστό χώρο όπως ένα μέσο μαζικής μεταφοράς (τρένο, λεωφορείο κλπ) . Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις στην υγεία των επιβατών; Δεδομένου ότι το Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων έχει ήδη εκπονήσει σχετικές μελέτες για την ασφάλεια των Ελλήνων πολιτών θα ήταν χρήσιμο να αναπτύξουμε το θέμα του ακτινοπροκλητού καρκίνου όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται εξειδικεύοντας τελικά στη διαρροή ραδιενέργειας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Η βαρύτητα των ραδιολογικών επιπτώσεων εξαρτάται (α) από το είδος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το ραδιενεργό υλικό αφού υπάρχουν τέσσερα βασικά είδη ακτινοβολίας (άλφα, βήτα, γάμα και νετρόνια) (β) την προάσπιση του ραδιολογικού υλικού και των ανθρώπων (συσκευασία ραδιενεργών υλικών, ρουχισμός κλπ) , (γ) από το είδος της ακτινοβόλησης δηλαδή εσωτερική (μετά από εισπνοή, κατάποση κλπ) η εξωτερική (διαδερμικά κλπ) και φυσικά (δ) από την δομή και τη λειτουργία του μέσου όπου διέρρευσε το υλικό (εξαερισμός, μέτρα ασφαλείας, φυσικές και τεχνητές διαδικασίες απόσβεσης της ραδιενέργειας)

Οι επιπτώσεις της πυρηνικής ακτινοβολίας

Η πυρηνική ακτινοβολία που προκαλεί την καρκινογένεση διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

ΑΚΤΙΝΕΣ ΑΛΦΑ



Τα σωματίδια (ακτίνες) άλφα είναι πυρήνες Ηλίου (συσσωμάτωμα δύο πρωτονίων και δύο νετρονίων) που εκπέμπονται από άλφα ραδιενεργούς πυρήνες (πχ Ουράνιο, Πλουτώνιο κλπ) με ταχύτητες που φτάνουν τα 20.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο (σε δύο δευτερόλεπτα έχουν κάνει το γύρο της γης!)

Η εμβέλεια ενός σωματίου άλφα ποικίλει ανάλογα με το μέσο στο οποίο κινείται. Για παράδειγμα για τα σωματίδια άλφα που εκπέμπει το Ουράνιο-238 (περίπου ίδιο με το εκφυλισμένο ουράνιο) η εμβέλεια στον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι περίπου τέσσερα εκατοστά. Γενικά η εμβέλεια στον αέρα σε κανονικές συνθήκες των σωματίων άλφα από φυσικά ραδιενεργά είναι της τάξης των εκατοστών.

Η απόσταση που διανύουν τα σωματίδια άλφα μέσα στους εκτεθειμένους ζωικούς ιστούς είναι φθίνουσα συνάρτηση της πυκνότητας του ιστού (ακριβώς όπως και σε κάθε άλλη μορφή ύλης) ενώ η ενέργειά τους απορροφάται αμέσως μέσα στα πρώτα 20 μικρόμετρα (εκατομμυριοστά του μέτρου) του ιστού.

Εάν η έκθεση είναι εξωτερική όλη η άλφα ακτινοβολία απορροφάται από τα νεκρά κύτταρα της επιδερμίδας. Ακόμη και ένα φύλλο χαρτόνι είναι αρκετό για να μας προστατεύσει από την άλφα ακτινοβολία. Στην περίπτωση που η έκθεση είναι εσωτερική, για παράδειγμα μετά από εισπνοή Πλουτωνίου, τότε η ακτινοβολία θα εναποτεθεί στην άμεση περιοχή του ραδιενεργού υλικού, προκαλώντας (κυρίως άμεσες) βλάβες σε μια ακτίνα δεκάδων μικρομέτρων. Οι βλάβες που προκαλούνται στα κύτταρα που περιβάλλουν το άλφα ραδιενεργό υλικό από εσωτερική άλφα ακτινοβολία αν και είναι εντοπισμένες και περιορισμένες είναι μεγάλες αφού ουσιαστικά τα προσβεβλημένα κύτταρα θα καταστρέφουν ολοσχερώς. Τα νεκρά αυτά κύτταρα θα απομακρυνθούν με τις συνήθεις διαδικασίες «αποκομιδής απορριμμάτων» του οργανισμού όπως η φαγοκυττάρωση (κυτταρική διεργασία κατά την οποία η κυτταρική μεμβράνη σχηματίζει εγκόλπωμα γύρω από την ουσία που πρέπει να αφομοιωθεί) ή θα αντικατασταθούν με νέα κύτταρα. Τα περισσότερα είδη των ιστών μπορούν να αντέξουν άνετα την καταστροφή ενός ποσού των κυττάρων τους χωρίς ιδιαίτερη βλάβη στον οργανισμό που ανήκουν. Αν όμως η ποσότητα του άλφα ραδιενεργού είναι μεγάλη, η ακόμη αν η μικροποσότητα αυτή παραμένει στον οργανισμό ακτινοβολώντας τον συνεχώς τότε οι βλάβες μπορεί να είναι σημαντικές.

#### ΑΚΤΙΝΕΣ ΒΗΤΑ

Όπως έχει αποδειχθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες ορισμένα ραδιενεργά εκπέμπουν σωματίδια βήτα που είναι ουσιαστικά ηλεκτρόνια χιλιάδες φορές ελαφρύτερα από τα σωματίδια άλφα. Μια άλλη ουσιώδης διαφορά των βήτα από τα άλφα σωματίδια είναι η ταχύτητα των πρώτων που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός. Η μεγάλη τους αυτή ταχύτητα σε συνδυασμό με την μικρή τους μάζα τους δίνει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια στο μέσο στο οποίο κινούνται σε σχέση με τα σωματίδια άλφα .

Τα ηλεκτρόνια των βήτα διασπάσεων αν και κινούνται με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός δεν μπορούν να διεισδύσουν στους ζωντανούς ιστούς σε βάθη μεγαλύτερα από μερικά χιλιοστόμετρα. Πάντως διεισδύουν σε αποστάσεις χιλιάδες φορές μεγαλύτερες από τα άλφα σωματίδια συγκρουόμενα με πολλά ηλεκτρόνια και συνεπώς διαγράφοντας τεθλασμένες τροχιές λόγω της μικρής τους μάζας (σε αντίθεση με την ευθεία τροχιά των βαρέων άλφα). Το γεγονός αυτό τους δίνει μεγαλύτερη ικανότητα πρόκλησης βλαβών στο δέρμα από την αντίστοιχη των α-σωματίων. Οι δερματικές βλάβες από βήτα σωματίδια που ακτινοβολούν το δέρμα μοιάζουν με τα επιφανειακά εγκαύματα πρώτου βαθμού και ονομάζονται «βήτα εγκαύματα». Σημειώνουμε ότι όπως και στην περίπτωση των α-σωματίων η κατάλληλη ενδυμασία παρέχει επαρκή προστασία από τα β-σωματίδια.

Όταν η ακτινοβολία είναι εσωτερική οι επιπτώσεις στον οργανισμό είναι πολύ μεγαλύτερες από την εξωτερική ακτινοβολία (διαδερμική). Η εσωτερική ακτινοβολία μπορεί να γίνει μετά την είσοδο β-



ραδιενεργών υλικών στο σώμα είτε από εισπνοή είτε μέσω της τροφής η ακόμη και μέσω ανοιχτών πληγών και αμυχών. Αξίζει να σημειώσουμε ότι για τα υλικά αυτά, όπως και για κάθε ενσωματωμένο ραδιενεργό υλικό, η ακτινοβολία είναι συνεχής και ελαττώνεται μόνο εξ' αιτίας της ραδιενεργού διάσπασης καθώς και μέσω των βιολογικών μηχανισμών αποβολής άχρηστων ουσιών (ούρα κλπ). Συγκρινόμενα με την δράση των α-σωματίων μέσα στον οργανισμό τα β-σωμάτια διαφέρουν κατά την έννοια ότι συχνά προκαλούν επιβιώσιμες βλάβες στα κύτταρα ενώ τα πρώτα τα καταστρέφουν ολοσχερώς (λόγω μάζας και φορτίου). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι σημαντικό διότι τα κύτταρα που έχουν υποστεί βλάβες και δεν καταστρέφονται έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να μεταλλαχθούν και να οδηγήσουν σε νεοπλασίες. Αντίθετα τα απολύτως κατεστραμμένα κύτταρα αποτελούν μικρότερο κίνδυνο εκτός βέβαια εάν πρόκειται για πολύ μεγάλες ποσότητες ενός ιδιαίτερα ευαίσθητου ιστού (πχ αμφιβληστροειδής)

### ΑΚΤΙΝΕΣ ΓΑΜΜΑ

Οι ακτίνες γάμμα είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαιρετικά υψηλής ενέργειας που εκπέμπεται από τον πυρήνα τόσο κατά τις βήτα όσο και κατά τις άλφα διασπάσεις του.

Οι άλφα και βήτα αυθόρμητες πυρηνικές διασπάσεις καθώς και το φαινόμενο της σχάσης (αυθόρμητη η εξαναγκασμένη) καταλήγουν σε διεγερμένους πυρήνες οι οποίοι αποδιεγείρονται στη συνέχεια με την εκπομπή ακτίνων γάμμα. Ακόμη τα ταχεία νετρόνια μπορούν να συλληφθούν από μη σχάσιμους πυρήνες οι οποίοι στη συνέχεια θα αποδιεγερθούν εκπέμποντας γ-ακτινοβολία.

Οι ακτίνες γάμμα έχουν εξαιρετικά μεγάλη διεισδυτικότητα, και μπορούν να εναποθέσουν την ενέργειά τους πολύ βαθιά μέσα στους ιστούς. Γενικά η μεταβολή της ενέργειας των ακτίνων γάμμα στα διάφορα υλικά περιγράφεται από ένα εκθετικό νόμο ταχείας απόσβεσης που είναι συνάρτηση της αρχικής ενέργειας της δέσμης και της φύσης του υλικού.

Αν και τα α-ραδιενεργά όπως πχ το Ουράνιο-238 εκπέμπουν μια πολύ μικρή ποσότητα ακτίνων γάμμα (μέσω των πρώτων θυγατρικών τους) αυτή είναι δυνατόν λόγω της μεγάλης της ενέργειας να προκαλέσει σημαντικές βλάβες αν η δράση της είναι εκτεταμένη και παρατεταμένη (πχ αερολύματα Ουρανίου-238 εγκλωβισμένα στους πνεύμονες).

Πέραν της ιονιστικής τους δράσης ως καθαρή ενέργεια τα γ-σωμάτια μπορούν να επηρεάσουν τα κύτταρα, αυξάνοντας την θερμοκρασία τους με εύλογα αποτελέσματα όπως για παράδειγμα το συνηθισμένο έγκαυμα. Η εναπόθεση της ενέργειας τους, λόγω της διεισδυτικότητάς τους μπορεί να γίνει οπουδήποτε κατά τη διάρκεια της πορείας τους και για το λόγο αυτό οι επιπτώσεις της γ-ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητες της θέσης της πηγής σχετικά με τον οργανισμό. Δηλαδή εάν έχουμε μια εκτεταμένη ροή φωτονίων ώστε να εκτεθεί όλο το κορμί θα προκύψει ουσιαστικά μια σχεδόν ομοιογενής εναπόθεση ενέργειας σε όλους τους ιστούς (ολοσωματική ακτινοβολία). Το γεγονός αυτό είναι μια σημαντική διαφορά της γ-ακτινοβολίας με τις προηγούμενες δύο οι οποίες όπως είδαμε δίνουν ένα εξαιρετικά εντοπισμένο πεδίο ακτινοβολίας.

### NETRONIA

Το δεύτερο συστατικό του πυρήνα μετά τα πρωτόνια είναι τα νετρόνια. Υπάρχουν πυρήνες υλικών οι οποίοι εκπέμπουν αυθόρμητα νετρόνια. Το γεγονός ότι είναι αφόρτιστο σωματίδιο του προσδίδει ιδιότητες πολύ διαφορετικές από τα άλλα σωματίδια (α,β) που εκπέμπει ο πυρήνας, αφού έχει μεγάλη



εμβέλεια και μπορεί να εναποθέσει την ενέργειά του πολύ βαθιά στο μέσο στο οποίο κινείται. Ειδικότερα, ως ουδέτερα σωματία αλληλεπιδρούν μόνο με τον ίδιο τον πυρήνα και όχι άμεσα με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα η μέση ελεύθερη διαδρομή τους να είναι πολύ μεγάλη μέσα στους ιστούς. Αν θυμηθούμε ότι μέσα στο ίδιο το μέταλλο του Ουρανίου όπλων έχουν μια μέση ελεύθερη διαδρομή μερικά εκατοστά μπορούμε να φανταστούμε την εμβέλειά τους μέσα στους ιστούς των ανθρώπινων οργανισμών. Λόγω της μεγάλης τους αυτής εμβέλειας η ακτινοβόληση του οργανισμού από τα νετρόνια είναι κάπως ανάλογη με αυτή της γ-ακτινοβολίας δηλαδή οι επιπτώσεις της νετρονιακής ακτινοβολίας δεν εξαρτώνται σημαντικά από την θέση της πηγής σχετικά με τον οργανισμό. Για παράδειγμα αν ένας άνθρωπος εκτεθεί σε μια εκτεταμένη πηγή νετρονίων η ενέργεια που θα εναποτεθεί στην πλευρά εισόδου της ακτινοβολίας δεν θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που εναποτίθεται στην πλευρά εξόδου της αν και η διαφορά θα είναι αισθητή στην περίπτωση των θερμικών (βραδέων) νετρονίων.

Κατά την πορεία του μέσα στους ζωικούς ιστούς (και γενικά στην ύλη) ένα νετρόνιο μπορεί είτε να διαφύγει χωρίς αλληλεπίδραση, ή να συλληφθεί από έναν πυρήνα χωρίς να προκαλέσει σχάση ή να σκεδαστεί ελαστικά ή ανελαστικά ή τέλος να σχάσει ένα πυρήνα δημιουργώντας δύο ή περισσότερα νέα νετρόνια εκλύοντας παράλληλα ενέργεια. Στην περίπτωση της ανελαστικής σκέδασης μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου εναποτίθεται στον πυρήνα ο οποίος ανακρούεται με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η ισορροπία του με τα περιφερειακά του ηλεκτρόνια. Όπως αντιλαμβανόμαστε όσο μεγαλύτερη είναι η κινητική ενέργεια των νετρονίων και όσο μικρότερος ο ανακρουόμενος πυρήνας τόσο μεγαλύτερη η διαταραχή. Η διαταραχή μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να προκληθούν ιονισμοί με τις επιπτώσεις που αναλύσαμε στην αναφορά στα άλφα και βήτα σωματία.

Είναι τέτοια η φύση των ζωντανών οργανισμών ώστε αποτελούνται από μεγάλες ποσότητες νερού που περιέχει ένα άτομο Οξυγόνου και δύο ελαφρά άτομα Υδρογόνου. Το Υδρογόνο, του οποίου ο πυρήνας είναι απλώς ένα πρωτόνιο, έχει μάζα ίση με τη μάζα του νετρονίου και άρα γίνεται εύκολα αντιληπτή η ισχύς της ανάκρουσής του και ο επακόλουθος ιονισμός του. Προσεγγιστικά μπορούμε να πούμε ότι το 70%-85% της ενέργειας των ταχέων νετρονίων εναποτίθεται στους ιστούς μέσω τέτοιων ανελαστικών σκεδάσεων με ελαφρούς πυρήνες ενώ το υπόλοιπο θα επιμεριστεί σε βαρύτερους πυρήνες.

Μετά την απώλεια του μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας των νετρονίων αυτά καθίστανται θερμικά και αυξάνει πολύ η πιθανότητα να αρπαχθούν από ένα πυρήνα προκαλώντας την εξαναγκασμένη σχάση του. Η σχάση όμως αυτή θα δημιουργήσει θυγατρικούς πυρήνες στους ιστούς οι οποίοι θα αποδιεγερθούν εκπέμποντας επιπλέον νετρόνια, ακτίνες βήτα και γάμμα. Ακόμη η θυγατρικοί πυρήνες θα σκεδαστούν (ανεξαρτήτως ενεργειακής κατάστασης) από άλλους πυρήνες μεταφέροντας τους κινητική ενέργεια και προκαλώντας νέους έμμεσους ιονισμούς.

### **Ποσοτική ανάλυση του ακτινοπροκλητού καρκίνου**

Για να αναλύσουμε ποσοτικά τον ραδιολογικό κίνδυνο των ραδιενεργών υλικών πρέπει πρώτα να καθορίσουμε τον ίδιο τον κίνδυνο. Ο κίνδυνος συνήθως είναι είτε ο θάνατος (σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η ακαριαίως) είτε κάποια μορφή καρκίνου (πχ λευχαιμία). Ειδικά στην περίπτωση των εκθέσεων σε χαμηλές δόσεις, που είναι κοντά στο φυσιολογικό υπόβαθρο η εκτίμηση του κινδύνου είναι δύσκολη, διότι οι περισσότερες μετρήσεις που υπάρχουν προέρχονται από ατυχήματα η πυρηνικές



εκρήξεις και συνεπώς αναφέρονται σε μεγάλες δόσεις. Επίσης, η φύση της ραδιενέργειας είναι τέτοια που επιτρέπει μόνο προσεγγιστικούς υπολογισμούς των δόσεων στον ανθρώπινο οργανισμό. Αν λάβουμε υπ' όψιν και τις ιδιοσυστατικές ποικιλομορφίες των ανθρώπων τότε αντιλαμβανόμαστε την δυσκολία που συναντάμε στην ποσοτικοποίηση του κινδύνου.

Γενικά τα αποτελέσματα (βλάβες) της ακτινοβόλησης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες τα **στοχαστικά** και τα μη **στοχαστικά**

**Μη στοχαστικά αποτελέσματα** είναι τα άμεσα αποτελέσματα και στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι βλάβες που προκαλούνται από οξεία έκθεση υψηλών σχετικά δόσεων η οποία μπορεί να είναι εξωτερική εσωτερική και ολοσωματική τοπική.

**Στοχαστικά αποτελέσματα** είναι τα αψότερα αποτελέσματα της ακτινοβόλησης είτε είναι σωματικά (νεοπλασίες) είτε είναι γενετικά (ακτινοπροκλητές κληρονομήσιμες παθήσεις) τα οποία εμφανίζονται σε χαμηλότερες δόσεις και ρυθμούς δόσεων συγκριτικά με τα μη στοχαστικά αποτελέσματα. Το κυριότερο στοχαστικό αποτέλεσμα είναι φυσικά η καρκινογένεση.

Για να υπολογίζουμε τις καρκινογένεσεις που θα προκληθούν στα άτομα που βρέθηκαν στο μέσο μεταφοράς όπου διέρρευσε το ραδιενεργό υλικό χρησιμοποιούμε το γραμμικό μοντέλο μηδενικού κατωφλίου σύμφωνα με το οποίο η πιθανότητα να προκληθεί μια συγκεκριμένη βλάβη (πχ καρκίνος, καταρράκτης ματιών κλπ) είναι γραμμική συνάρτηση της δόσης και συνεπώς δέχεται ότι ακόμη και μια απειροελάχιστη δόση θα αυξήσει την πιθανότητα πρόκλησης της βλάβης κατά ένα (ενδεχομένως απειροελάχιστο) ποσοστό. Προφανώς το μοντέλο αυτό είναι το πιο συντηρητικό και μπορεί να εφαρμοστεί εξ' ίσου σε μεγάλες και μικρές δόσεις. Ακόμη η γραμμικότητα του σε συνδυασμό με την τυχαία φύση της καρκινογένεσης, μας επιτρέπει να ποσοτικοποιήσουμε τον κίνδυνο με τον πιο συντηρητικό τρόπο

Για να το κατανοήσουμε αυτό πρέπει να πρώτα να διατυπώσουμε δύο θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τον υπολογισμό της καρκινογένεσης.

**(α)** Για κάθε πληθυσμό υπάρχει ένα φυσιολογικό ποσοστό ανάπτυξης μιας βλάβης, η οποία μπορεί να προκληθεί και από τη ραδιενέργεια. Δηλαδή, Το ποσοστό καρκινογένεσης των Ευρωπαίων είναι 20% σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους που ουσιαστικά σημαίνει ότι σε κάθε 100 Ευρωπαίους που γεννιούνται κατά μέσο όρο οι 20 θα αναπτύξουν σχεδόν σίγουρα κάποια μορφή καρκίνου.

**(β)** Η πρόκληση της βλάβης (πχ καρκινογένεση) είναι μια τυχαία διαδικασία. Δηλαδή, μπορούμε να προβλέψουμε ότι το 20% των Ευρωπαίων θα αναπτύξουν μια κακοήγη νόσο αλλά δεν μπορούμε να πούμε ποιοι θα είναι αυτοί.

Η γραμμικότητα του μοντέλου καθώς και η τυχαία (στοχαστική) φύση της καρκινογένεσης μας οδηγούν στο λογικό συμπέρασμα ότι ο συνολικός αριθμός των καρκίνων που θα προκληθεί σε ένα πληθυσμό μετά από τυχαία ακτινοβόληση είναι ανεξάρτητος από τον τρόπο που τελικά θα κατανεμηθούν οι δόσεις. Έτσι μια δόση 100 μονάδων σε κάθε ένα μέλος ενός πληθυσμού 100 ατόμων θα δώσει στατιστικά τον ίδιο αριθμό καρκίνων με την ακτινοβόληση ενός πληθυσμού 1000 ατόμων με 10 μονάδες δόσης η ακόμη με



την ακτινοβολία 10.000 ατόμων με μια μονάδα δόσης. Δηλαδή αυτό που λαμβάνουμε υπ' όψη στην υπολογισμό της καρκινογένεσης είναι η ανθρωποδόση (γινόμενο δόσης επί άτομα).

Για να δώσουμε μια προσεγγιστική εικόνα των αναμενόμενων καρκίνων μετά από διαρροή ραδιενεργούς ουσίας στο εσωτερικό ενός μέσου μεταφοράς πρέπει να επισημάνουμε ότι πλην των βραχύβιων ραδιενεργών ουσιών που εκπέμπουν την εξαιρετικά διεισδυτική ακτινοβολία γάμμα τα περισσότερα υλικά που κινούνται λαθραία προκαλούν καρκίνο κυρίως δια της εισόδου τους στο ανθρώπινο κορμί (εισπνοή, κατάποση κλπ). Στην πρόβλεψη λοιπόν του ακτινοπροκλητού καρκίνου συνήθως μελετούμε το χειρότερο σενάριο, δηλαδή δεχόμαστε ότι το ραδιενεργό υλικό είναι όλο σε εισπνεύσιμη μορφή και ότι έχει καταταμηθεί ομοιόμορφα μέσα στον όγκο του μέσου μαζικής μεταφοράς. Έτσι, αν ξέρουμε (Α) την μάζα ενός συγκεκριμένου ραδιενεργού υλικού που διέρρευσε και (Β) τον όγκο του οχήματος όπου έγινε η διαρροή (η εναλλακτικά υπολογίσουμε με μετρήσεις το είδος και την πυκνότητά της ουσίας στον αέρα), (Γ) τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα στο όχημα, (Δ) τον χρόνο που θα παραμείνει ο κάθε άνθρωπος στο μέσο μεταφοράς όπου έχει διαρρεύσει το ραδιενεργό υλικό, τότε ο αριθμός των καρκίνων που θα αναπτυχθούν ανάμεσα στους ανθρώπους που βρέθηκαν στο όχημα αυτό βρίσκεται προσεγγιστικά με ένα απλό μαθηματικό τύπο.

Για να μην κουράσουμε άλλο τον αναγνώστη δεν θα δώσουμε αριθμητικούς υπολογισμούς για τις καρκινογένεσεις που προκαλούνται από τέτοια επεισόδια. Ο σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να επιμορφωθεί και να ενημερωθεί ο Έλληνας πολίτης σχετικά με τους μηχανισμούς του ακτινοπροκλητού καρκίνου καθώς και τις μεθόδους αξιολόγησής του. Για περισσότερες λεπτομέρειες και (ad hoc) ποσοτικούς υπολογισμούς το Κέντρο Ελέγχου Όπλων ως μη κερδοσκοπικό κοινωφελές επιστημονικό κέντρο παρέχει δωρεάν τηλεφωνικές πληροφορίες σε όλους τους πολίτες και τους φορείς που ανησυχούν για τα φαινόμενα διαρροής ραδιενέργειας σε δημοσίους χώρους