



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Ανάπτυξη Μεθόδου Τεχνητής Νοημοσύνης για την Ενίσχυση της  
Ασφάλειας Πυρηνικών Εγκαταστάσεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΥ**

**Επιβλέπων : Ιωάννης Καΐσας, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.**

Θεσσαλονίκη, 2023



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καΐσα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας διπλωματικής, για την επίβλεψη της και τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησής της.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κοπέλα μου για την στήριξη και την υπομονή της και τέλος σημαντικότερο όλων, είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου, την μητέρα μου και τον αδερφό μου, για την καθολική στήριξη και βοήθεια τους, με κάθε μέσο, σε οτιδήποτε κάνω.

# Ανάπτυξη μεθόδου Τεχνητής Νοημοσύνης για την Ενίσχυση της Ασφάλειας Πυρηνικών Εγκαταστάσεων

## Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια, η κλοπή, με σκοπό την παράνομη διακίνηση, ραδιενεργού υλικού αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της παγκόσμιας πυρηνικής κοινότητας. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας, στην προσπάθεια του να περιορίσει το φαινόμενο, επιστρατεύει την τεχνολογία της τεχνητής νοημοσύνης και, πιο συγκεκριμένα τις ικανότητες της υπολογιστικής όρασης, για την παρακολούθηση και την επιτήρηση των πυρηνικών εγκαταστάσεων.[1] Η καίρια ανίχνευση και καταστολή κακόβουλων ενεργειών, δύναται να επιτευχθεί με κλειστά κυκλώματα παρακολούθησης, τα οποία απαρτίζονται από νευρωνικά δίκτυα επεξεργασίας εικόνων και ανίχνευσης αντικειμένων μέσα σε αυτές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια μιας ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του Α.Π.Θ. στον τομέα της ανίχνευσης παράνομης διακίνησης ή χρήσης ραδιενεργών πηγών. Σκοπός αυτής της ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας είναι να συνδυαστούν ο οπτικός εντοπισμός με κάμερες παρακολούθησης και ο εντοπισμός μέσω ανιχνευτών ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τα σενάρια, στα οποία μπορεί να φανεί χρήσιμος αυτός ο συνδυαστικός εντοπισμός είναι περιπτώσεις όπου μία ραδιενεργός πηγή ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί κακόβουλα σε μεγάλα δημόσια γεγονότα ή μεταφέρεται παράνομα από σημεία όπου υπάρχουν οπτικές κάμερες ή/και ανιχνευτές ιονίζουσας ακτινοβολίας. Επιμέρους σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση κατάλληλων αλγορίθμων, η χρήση τους και η αξιολόγησή τους σε απλά παραδείγματα σχημάτων θωρακίσεων ραδιενεργών πηγών. Συγκεκριμένα, σε αυτή την αρχή της έρευνας επιλέχθηκε το σχήμα μίας κοινής κυλινδρικής θωράκισης ραδιενεργής πηγής.

Αρχικά, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της πυρηνικής τεχνολογίας, το οποίο αποτελείται από την επεξήγηση της πυρηνικής ασφάλειας (Nuclear Safety & Nuclear Security) και την μελέτη των ραδιενεργών πηγών. Αποσαφηνίζονται όχι μόνο τα είδη των ραδιενεργών πηγών και η διαδικασία

μεταφοράς του, αλλά και τα είδη των ανιχνευτών τους. Στην συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση των βασικών εννοιών της υπολογιστικής όρασης, ξεκινώντας από την απλή απεικόνιση εικόνων στον υπολογιστή, περνώντας στον τρόπο λειτουργίας των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης και ολοκληρώνοντας στην αναφορά στα σύγχρονα μοντέλα. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου της εργασίας, σχολιάζονται τα αποτελέσματα και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Για την εκτέλεση των πειραμάτων και την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία κερδίζει συνεχώς έδαφος σε εφαρμογές μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης.

**Λέξεις Κλειδιά :** <<Πυρηνική ασφάλεια, ραδιενεργές πηγές, ανιχνευτές ακτινοβολίας, θωράκιση, μεταφορά, υπολογιστική όραση, τεχνητή νοημοσύνη, κατάτμηση εικόνων>>

# **Development of an Artificial Intelligence Method for Enhancing the Security of Nuclear Facilities**

## **Abstract**

In recent years, the theft of radioactive material for the purpose of illicit trafficking has been one of the major problems of the global nuclear community. The International Atomic Energy Agency in an effort to eliminate the phenomenon, deploys AI technology and, more specifically, computer vision capabilities to monitor and supervise nuclear facilities.[1] Critical, on time, detection and suppression of malicious activities can be achieved by closed-circuit monitoring, which consists of neural networks processing images and detecting objects within them.

This thesis is part of a broader research effort by the Laboratory of Nuclear Technology of AUTH in the field of detecting illicit trafficking or malicious use of radioactive sources. The broader aim of this research is to combine optical detection with surveillance cameras and detection with ionizing radiation detectors. Scenarios in which this combined detection may be useful are cases where a radioactive source may be used maliciously at major public events or transported illegally through areas where optical cameras and/or ionizing radiation detectors are installed. The specific aim of the thesis is to find suitable algorithms, use them and evaluate them in ordinary examples of shapes of shielding of radioactive sources. In particular, the shape of a common cylindrical shielding of a radioactive source was chosen as a starting point for this work.

First, there is an extensive reference to the necessary theoretical background of nuclear technology, which consists of the explanation of Nuclear Safety and Nuclear Security and the study of radioactive sources. Not only the types of radioactive source and the method of their transport are clarified, but also the types of radiation detectors. The following is an analysis of the basic concepts of computer vision, starting with simple computer imaging, going on to how AI models work and ending with reference to modern models. Finally, the process of creating the working model is presented, the results are commented on, and proposals for further research are made. The Python

programming language, which is gaining ground in machine learning and AI applications, is used to execute the experiments and train the neural network.

**Keywords** : <<Nuclear Security, radioactive sources, radiation detector, shielding, transportation, computer vision, artificial intelligence, image segmentation>>

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 : Πυρηνική Ασφάλεια .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 Εισαγωγή.....	- 1 -
1.1.1 Nuclear Safety .....	- 2 -
1.1.2 Nuclear Security.....	- 4 -
1.2 Ανίχνευση Ραδιενεργών Πηγών.....	- 10 -
1.2.1 Ανιχνευτές Ιοντισμού .....	- 11 -
1.2.2 Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης.....	- 13 -
1.2.3 Ανιχνευτές Νετρονίων .....	- 14 -
1.2.4 Συσκευές .....	- 15 -
<b>Κεφάλαιο 2 : Ραδιενεργές Πηγές και Μεταφορά.....</b>	<b>- 18 -</b>
2.1 Εισαγωγή.....	- 18 -
2.2 Χαρακτηριστικά των SRSs.....	- 19 -
2.2.1 Κατηγοριοποίηση των SRSs .....	- 21 -
2.2.2 Ραδιονουκλίδια των SRSs .....	- 22 -
2.2.3 Δομή και Σχεδιασμός SRSs .....	- 28 -
2.3 Μεταφορά Ραδιενεργών Πηγών .....	- 29 -
2.3.1 Δοχεία Μεταφοράς .....	- 30 -
2.3.2 Τρόποι Μεταφοράς.....	- 32 -
<b>Κεφάλαιο 3 : Υπολογιστική Όραση .....</b>	<b>- 34 -</b>
3.1 Εισαγωγή.....	- 34 -
3.1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	- 35 -
3.1.2 Απεικόνιση Εικόνων στον Υπολογιστή .....	- 35 -
3.2 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας.....	- 37 -
3.3 Υπολογιστική Όραση .....	- 38 -
3.3.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα .....	- 40 -
3.4 Βαθιά και Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα .....	- 41 -
3.4.1 Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα.....	- 41 -
3.4.2 Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα.....	- 42 -
3.5 Σύγχρονα Μοντέλα.....	- 45 -
3.5.1 R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN .....	- 46 -
3.5.2 YOLO.....	- 48 -



3.5.3 U-Net .....	- 49 -
<b>Κεφάλαιο 4 : Πειραματικό Μέρος.....</b>	<b>- 52 -</b>
4.1 Εισαγωγή.....	- 52 -
4.2 Πείραμα .....	- 53 -
4.2.1 1 <sup>ο</sup> Στάδιο (δημιουργία Dataset) .....	- 53 -
4.2.2 2 <sup>ο</sup> Στάδιο (annotation) .....	- 55 -
4.2.3 3 <sup>ο</sup> Στάδιο (επεξεργασία με την Python) .....	- 57 -
4.2.4 4 <sup>ο</sup> Στάδιο (μοντέλο – νευρωνικό δίκτυο) .....	- 58 -
4.3 Αποτελέσματα.....	- 60 -
<b>Κεφάλαιο 5 : Επίλογος .....</b>	<b>- 67 -</b>
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	- 67 -
5.2 Περαιτέρω Επεκτάσεις για Έρευνα .....	- 68 -
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>- 70 -</b>

## Κεφάλαιο 1 : Πυρηνική Ασφάλεια

### *1.1 Εισαγωγή*

Τα νουκλεόνια, δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια, συναντώνται σε δύο καταστάσεις, η πρώτη, σπανιότερη, είναι να βρίσκονται ελεύθερα το ένα από το άλλο και η δεύτερη, συνηθέστερη, να δημιουργούν τον πυρήνα. Ο πυρήνας είναι πιθανότερο να βρίσκεται στην βασική ενεργειακή του κατάσταση κατά την οποία είναι ευσταθής, διότι η φύση προτιμά την κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας ενός συστήματος. Υπάρχουν και ενεργειακά διεγερμένες καταστάσεις του πυρήνα κατά τις οποίες η περίσσεια ενέργειας εκπέμπεται με μορφή ακτινοβολίας. Κύρια είδη ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τους διεγερμένους πυρήνες είναι οι ακτινοβολίες  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και νετρόνια. Τα υλικά που περιέχουν τέτοιους διεγερμένους πυρήνες και εκπέμπουν τις παραπάνω ακτινοβολίες ονομάζονται ραδιενεργά. Πυρηνικά ή σχάσιμα υλικά ονομάζονται οι βαριοί πυρήνες, οι οποίοι έχουν πληθώρα νετρονίων και διασπώνται αυθόρμητα σε δύο ελαφρύτερους πυρήνες (περίπου στο μισό του βάρους του αρχικού σχάσιμου) και σε μερικά νετρόνια. Τα πυρηνικά υλικά χρησιμοποιούνται στις πυρηνικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας και χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ουράνιο-235 ( $^{235}\text{U}$ ). Αξίζει να διευκρινιστεί ότι τα πυρηνικά υλικά είναι και ραδιενεργά, όμως υπάρχουν ραδιενεργά υλικά, τα οποία δεν μπορούν να αξιοποιηθούν ως πυρηνικά.[2]

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας, ΔΟΑΕ, (International Atomic Energy Agency, IAEA) αναφέρεται στην προστασία από την πυρηνική ενέργεια με δύο όρους, το “Nuclear Safety” και το “Nuclear Security”. Ωστόσο, στις περισσότερες γλώσσες του κόσμου, οι αγγλικοί όροι “safety” και “security” ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο και συνεπώς η διαφορά μεταξύ της πυρηνικής ασφάλειας (Nuclear Safety) και της πυρηνικής προστασίας (Nuclear Security) είναι δυσδιάκριτη. Το 1972, η IAEA εισήγαγε τον όρο «Φυσική Προστασία» (Physical Protection) για να αναφερθεί σε θέματα προστασίας του πυρηνικού υλικού. Συγκεκριμένα, το physical protection χρησιμοποιήθηκε για την προστασία από τους κινδύνους, τους οποίους εγκυμονεί η κατοχή πυρηνικών υλικών από τρομοκράτες και γενικά ανθρώπους με κακόβουλες προθέσεις. Ο όρος αξιοποιήθηκε εκτενώς μέχρι τα γεγονότα της 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου και

τις τρομοκρατικές ενέργειες, οι οποίες έλαβαν χώρα στις Η.Π.Α. Έκτοτε, το θέμα της πυρηνικής ασφάλειας πήρε μεγάλες διαστάσεις και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση για την ενίσχυσή της από την πολιτική ηγεσία. Ταυτόχρονα, η ΙΑΕΑ ανέπτυξε προγράμματα για την βελτίωση της πυρηνικής προστασίας, περιλαμβάνοντας ενέργειες όχι μόνο για το security των πυρηνικών υλικών, αλλά και των ραδιενεργών υλικών, τα οποία είχαν χαθεί ή κλαπεί και θεωρούνταν εκτός ελέγχου. Εφεξής, στο κείμενο οι έννοιες “Nuclear Safety” και “Nuclear Security” θα αναφέρονται ασφάλεια (safety) και ασφάλεια (security), αντίστοιχα. [3]

### *1.1.2 Nuclear Safety*

Το Nuclear Safety, ορίζεται από την ΙΑΕΑ ως, «η επίτευξη ορθών συνθηκών λειτουργίας, η πρόληψη και η ελαχιστοποίηση των συνεπειών των ατυχημάτων, με αποτέλεσμα την προστασία των εργαζομένων, του κοινού και του περιβάλλοντος από αδικαιολόγητους κινδύνους ακτινοβολίας» και απευθύνεται σε φυσικούς κινδύνους πρόκλησης προβλημάτων, όπως ο σεισμός, η πλημμύρα, η πυρκαγιά και η αστοχία του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα κίνδυνος (hazard) είναι κάποιο γεγονός ή ισχύουσα κατάσταση, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη, ενώ ρίσκο (risk) είναι η πιθανότητα να προσβληθεί κανείς από τον κίνδυνο. Για την επίτευξη των στόχων του Nuclear Safety, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή των αρχών της αιτιολόγησης, της βελτιστοποίησης και της τήρησης των ορίων δόσης. Η αρχή της αιτιολόγησης ορίζει ότι οι εφαρμογές ιονίζουσων ακτινοβολιών πρέπει να δικαιολογούν πλήρως την χρήση τους και τα πλεονεκτήματά τους πρέπει να ξεπερνούν τα μειονεκτήματα των βλαβών, των οποίων θα προκαλέσουν. Η αρχή της βελτιστοποίησης είναι η επιδίωξη της χαμηλότερης πρόκλησης κινδύνων και ρίσκων (As Low As Reasonably Achievable, ALARA), εφόσον μία εφαρμογή κρίνεται αιτιολογημένη. Τέλος, η αρχή των ορίων δόσεων καθορίζει τα ανώτατα όρια δόσεων, τα οποία μπορεί να δεχτεί κανείς από ιονίζουσα ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, το όριο δόσης ραδιενέργειας για τους επαγγελματίες ιονίζουσων ακτινοβολιών είναι 20mSv/yr, ενώ για το κοινό είναι 1mSv/yr. [4], [5]

Η ΙΑΕΑ έχει θεσπίσει επιμέρους αρχές και είναι οι εξής :

- Η παροχή της ασφάλειας (safety) και η ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων και των πυρηνικών δραστηριοτήτων αποτελούν προτεραιότητα τόσο των μηχανικών όσο και των ιθύνοντων των πυρηνικών οργανισμών.
- Η θέσπιση νομικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια (safety) και η ίδρυση ανεξάρτητων εθνικών ρυθμιστικών αρχών.
- Η αποτελεσματική οργάνωση και καθοδήγηση των υπεύθυνων οργανισμών (stakeholders).
- Η εφαρμογή πυρηνικών δραστηριοτήτων πρέπει να παρέχει συνολικό όφελος στην κοινωνία.
- Η εφαρμογή μέτρων για την μέγιστη δυνατή παροχή ασφάλειας (safety) (βελτιστοποίηση – ALARA, as low as reasonably achievable).
- Η διατήρηση των επιπέδων της ακτινοβολίας και η εξασφάλιση ότι κανείς δεν εκτίθεται σε κίνδυνο.
- Η ολοκληρωμένη προστασία, ανθρώπων και περιβάλλοντος, έναντι της ιονίζουσας ακτινοβολίας.
- Η στόχευση δράσεων στην πρόληψη των ατυχημάτων.
- Η προώθηση και διατήρηση της ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης και άμεσης λήψης αποφάσεων, σε περίπτωση ατυχήματος.
- Η ορθή κρίση και αξιολόγηση των ενεργειών για έλεγχο και μείωση των επιπτώσεων των υπαρχόντων προβλημάτων. [6]

Μέριμνα του Nuclear Safety είναι όχι μόνο η προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και των ανθρώπων και της δημόσιας υγείας. Υπό την αιγίδα της ΙΑΕΑ, πραγματοποιούνται συνεχείς συζητήσεις και επιδιώκονται περαιτέρω διακρατικές συνεργασίες για την εξασφάλιση και την ενίσχυση της ασφάλειας (safety) έναντι του πυρηνικού κινδύνου. Όσον αφορά το θέμα της πυρηνικής ασφάλειας (safety), έχει αποδειχτεί επανειλημμένα, ότι υπάρχουν παράμετροι, οι οποίες είναι αδύνατο να προβλεφθούν a-priori (προτού αποκαλυφθούν οι επιπτώσεις τους). Για παράδειγμα, στο ατύχημα του Τσερνόμπιλ η επιστημονική ιεραρχία της Σοβιετικής Ένωσης γνώριζε από καιρό το λάθος του αρχικού σχεδιασμού του αντιδραστήρα RBMK, αλλά επέλεξε να μην πράξει

τίποτα για την αντιμετώπιση του. Οι αντιδραστήρες RBMK (reaktor bolshoy moshchnosti kanalniy) είχαν ισχυρά θετική ανάδραση κενού σε χαμηλές τιμές ισχύος οπότε ήταν ευάλωτοι να τεθούν εκτός λειτουργίας σε περίπτωση λανθασμένων χειρισμών. Μετά το ατύχημα εφαρμόστηκε, με τεχνική και οικονομική συνδρομή της Δύσης, μία σειρά από τεχνικές επεμβάσεις στους ήδη υπάρχοντες αντιδραστήρες και μειώθηκε η θετική ανάδραση κενού, συμβάλλοντας στην αύξηση της ασφάλειας. Ωστόσο, η έλλειψη παιδείας και γνώσεων των μηχανικών βάρδιας, των οποίων οι χειρισμοί συνέβαλαν καθοριστικά στην έκβαση του γεγονότος είναι αρκετά απίθανο να είχαν εντοπιστεί πριν το ατύχημα., Συνεπώς κρίνεται ζωτικής σημασίας η ολική συνδρομή των δομών προστασίας, των εργαζομένων και των αυτόματων συστημάτων ελέγχου για την επίτευξη του μέγιστου δυνατού βαθμού ασφάλειας. [2], [6], [7]



*Εικόνα 1 : Κίνδυνος Ιονίζουσας Ακτινοβολίας*

### *1.1.2 Nuclear Security*

Το Nuclear Security, ορίζεται από την ΙΑΕΑ ως, «η πρόληψη, η ανίχνευση και η αντιμετώπιση, της κλοπής, της δολιοφθοράς, της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης, της παράνομης μεταφοράς ή άλλων κακόβουλων πράξεων, οι οποίες αφορούν πυρηνικά υλικά, άλλες ραδιενεργές ουσίες ή συναφείς εγκαταστάσεις» και απευθύνεται στις σκόπιμες εγκληματικές και τρομοκρατικές ενέργειες, οι οποίες αποσκοπούν στην έκθεση και στον κίνδυνο (risk). Πέρα από την προστασία της σωματικής ακεραιότητας του προσωπικού, περιλαμβάνει και την αξιοπιστία, μέσω του προσδιορισμού της

εχεμύθειας και του ελέγχου της ασφάλειας των πληροφοριών και των απειλών εκ των έσω. Το Nuclear Security προσπαθεί να εξαλείψει τις απειλές από την δημιουργία πυρηνικών όπλων, το σαμποτάρισμα κατά την μεταφορά ραδιενεργών υλικών και την δολιοφθορά πυρηνικών εργοστασίων. Οι κυβερνοεπιθέσεις (cyberattack) αποτελούν συχνό φαινόμενο και ελλοχεύουν κινδύνους διατάραξης της ασφάλειας (security), απειλώντας έμπρακτα την ορθή λειτουργία των συστημάτων προστασίας και προσπαθώντας παράνομα να αποκτήσουν πρόσβαση σε ευαίσθητες πληροφορίες. Επίσης, η πυρηνική ασφάλεια (security) στοχεύει στην αναχαίτιση της παράνομης κατοχής πυρηνικού και ραδιενεργού υλικού για κατασκευή εχθρικών αυτοσχέδιων μηχανισμών (improvised nuclear device, IND) και συσκευών διασποράς (radiological dispersal device, RDD) και έκθεσης στην ραδιενέργεια (radiological exposure device, RED). Συγκεκριμένα, έχουν σημειωθεί γεγονότα κακόβουλης τοποθέτησης RDDs και REDs σε κρυφά μέρη δημόσιων χώρων πόλεων, όπως οι πλατείες και τα γήπεδα. Στις περιπτώσεις αυτές η ακτινοβόληση έχει είτε άμεσες είτε έμμεσες συνέπειες και εφαρμόζεται πάνω στους παρόντες και στους περαστικούς, χωρίς να το γνωρίζουν. Άμεσο θεωρείται ένα γεγονός άρρηκτα συνδεδεμένο με την ύπαρξη κάποιας αιτίας, η οποία το προκάλεσε, ενώ έμμεσο χαρακτηρίζεται ένα γεγονός, του οποίου η πρόκληση βασίζεται στην τυχειότητα. Για παράδειγμα, άμεση συνέπεια της ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι το κάψιμο, το οποίο απαιτεί πολύ μεγάλες ακτινοβολίες της τάξης του 0,1 Gray ή 0,1 Sv, ενώ έμμεσες συνέπειες είναι οι πιθανές αλλοιώσεις και αλλαγές στο DNA από τις ελεύθερες ρίζες (-OH) . [3], [8], [9]

Η εκτενής χρήση ραδιενεργών πηγών σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας, όπως είναι η ιατρική, η γεωργία, η έρευνα και η βιομηχανία, καθιστά της εύρεση τους εύκολη και πολλές φορές φθηνή. Από τις αρχές της δεκαετίας του '90 η ΙΑΕΑ, άρχισε να λαμβάνει αναφορές σχετικά με το διαθέσιμο προς παράνομη πώληση πυρηνικό υλικό. Τα δεδομένα κρίθηκαν ανησυχητικά, καθώς η ικανότητα αγοράς και κατοχής ραδιενεργού υλικού, απλά με την προσφορά χρημάτων, αποτελούσε θέμα διεθνούς ανησυχίας. Για αυτό το λόγο η ΙΑΕΑ δημιούργησε το 1995 ένα πρόγραμμα περιορισμού και αντιμετώπισης της κακόβουλης εμπορίας, ονομάστηκε Βάση Δεδομένων Συμβάντων και Διακίνησης (incident and trafficking database, ITDB) και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για την παρακολούθηση και καταγραφή της ύποπτης και παράνομης διακίνησης πυρηνικού υλικού. Η ITDB συλλέγει επίσημες πληροφορίες από τα 131 κράτη - μέλη της ΙΑΕΑ. Το περιεχόμενο της ITDB παρέχεται αποκλειστικά

στα μέλη της ΙΑΕΑ και απαγορεύεται η κοινοποίηση και διάδοση πληροφοριών στο κοινό και σε άλλους διεθνείς οργανισμούς. Στα 28 χρόνια λειτουργίας του προγράμματος καταγράφονται ετησίως περίπου 100 συμβάντα, ενώ συνολικά ο αριθμός τους έχει πλέον ξεπεράσει τα 3000 γεγονότα. Τα 451 από αυτά, αφορούν μη εξουσιοδοτημένη κατοχή υλικού, η οποία συνδέεται με εγκληματικές ενέργειες, τα 762 περιλαμβάνουν κλοπή ή ύποπτη απώλεια ραδιενεργών πηγών και τέλος υπάρχουν 16 αναφορές για παράνομη αγορά και κατοχή εμπλουτισμένου ουρανίου και πλουτωνίου. Εικάζεται, ότι πριν την ίδρυση της ITDB, το φαινόμενο συνέβαινε με τον ίδιο ρυθμό, παρόλο που δεν υπάρχουν ακριβείς καταγραφές.[3]

Για την ολοκληρωτική αντιμετώπιση των παράνομων ενεργειών, είναι σημαντική η δημιουργία υποδομών και η εφαρμογή κανόνων σε κάθε χώρα του κόσμου, καθώς πλέον όλες οι χώρες κατέχουν είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες ποσότητες πυρηνικού υλικού. Ο κύριος σκοπός των κανόνων οφείλει να είναι η ασφάλεια (security) της κοινωνίας, των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από επιβλαβείς συνέπειες πυρηνικών συμβάντων ή ατυχημάτων. Επίσης, το καθεστώς πυρηνικής ασφάλειας (security) πρέπει να εναρμονίζεται πλήρως με το γενικότερο πλαίσιο ασφάλειας της εκάστοτε χώρας για βέλτιστη λειτουργία. Η ΙΑΕΑ προτείνει την εφαρμογή των 12 βασικών αρχών του Nuclear Security, οι οποίες είναι οι εξής :[10]

Η ευθύνη του κράτους.

1. Ο στόχος του κράτους είναι η εγκαθίδρυση, η εφαρμογή, η συντήρηση και η διατήρηση του καθεστώτος πυρηνικής ασφάλειας (security), υπό την αιγίδα νομικού πλαισίου.[10]

Η αναγνώριση και ο ορισμός των ευθυνών του Nuclear Security.

2. Ο σαφής προσδιορισμός των αρμοδιοτήτων όλων των εξουσιοδοτημένων προσώπων και φορέων, όπως είναι τα ρυθμιστικά όργανα και οι αρμόδιες αρχές του ελέγχου των συνόρων και της επιβολής του νόμου. Τα κράτη – μέλη να συνεργάζονται και να συντονίζονται με σκοπό την εξασφάλιση της απρόσκοπτης εφαρμογής της πυρηνικής ασφάλειας (security). [10]

Το ρυθμιστικό και νομοθετικό πλαίσιο.

3. Ο ορισμός αρμόδιων αρχών και ρυθμιστικών οργάνων, με επαρκή νομική δικαιοδοσία, για την ολοκλήρωση του έργου της πυρηνικής προστασίας (security). Η ανάθεση των ευθυνών στις αρμόδιες αρχές και η στήριξη τους με ανθρώπινο δυναμικό και οικονομικούς και τεχνικούς πόρους. Η εφαρμογή μέτρων για την εξασφάλιση του συντονισμού και της συνεργασίας των φορέων και των εξουσιοδοτημένων προσώπων. Η διασφάλιση της λειτουργικής και οικονομικής ανεξαρτησίας των ρυθμιστικών φορέων. Η θέσπιση κανονισμών και πρωτοκόλλων για την εκτίμηση, την αξιολόγηση, τον έλεγχο, την καταγραφή και την προστασία, μέσω αδειών και εξουσιοδοτήσεων, του πυρηνικού υλικού. Η προστασία εμπιστευτικών πληροφοριών. Η επιβεβαίωση εχεμύθειας των οργανισμών και του εξουσιοδοτημένου προσωπικού, όσον αφορά απόρρητα δεδομένα. Ο ορισμός της πρωταρχικής ευθύνης στην κυβέρνηση ή σε αρμόδιο φορέα, σε περίπτωση αδυναμίας ανάληψης ευθυνών από εξουσιοδοτημένο πρόσωπο. Η εγκαθίδρυση νομικού πλαισίου για την διακίνηση πυρηνικού υλικού και για τον έλεγχο των συνόρων. Η άμεση αντιμετώπιση παράνομης διακίνησης ραδιενεργού υλικού. Η τήρηση των κανόνων και των περιορισμών και η επιβολή ποινών, σε περίπτωση έκνομων ενεργειών. [10]

Η διακρατική μεταφορά πυρηνικού και ραδιενεργού υλικού.

4. Η διασφάλιση της πλήρους προστασίας του πυρηνικού υλικού κατά την διαδικασία μεταφοράς, αποθήκευσης και εγκατάστασής του. [10]

Η επιβολή ποινών.

5. Η δημιουργία νομικού πλαισίου για την εφαρμογή ποινών στις περιπτώσεις επικίνδυνων ενεργειών και παραπτώματων. Ο προσδιορισμός των αξιόποινων πράξεων και η επιβολή περιορισμών, βασιζόμενων στην προκαθορισμένη πιθανή εκτίμηση των συνεπειών. Η εξασφάλιση διώξεων για τους παραβάτες. [10]



Η διακρατική συμφωνία και συνεργασία.

6. Η γνωστοποίηση των σημείων επαφής για παροχή βοήθειας και συνεργασίας μεταξύ κρατών. Η έγκαιρη παροχή πληροφοριών, για εγκληματικές και ύποπτες ενέργειες, στα εμπλεκόμενα και επηρεαζόμενα κράτη. Η άμεση ανταπόκριση σε αιτήματα χωρών, για παροχή προστασίας και βοήθειας για ανάκτηση πυρηνικού υλικού. Η επιμόρφωση των αρμόδιων φορέων των κρατών και η ασφαλής ανταλλαγή απόρρητων πληροφοριών σχετικά με εμπειρίες και γεγονότα. [10]

Η αναγνώριση και η αξιολόγηση των πυρηνικών κινδύνων και ρίσκων.

7. Η αναγνώριση και η ταυτοποίηση γεγονότων, τα οποία απειλούν την πυρηνική ασφάλεια (security), είτε βρίσκονται εντός είτε εκτός συνόρων μίας χώρας. Η αδιάλειπτη αξιολόγηση της εγκυρότητας και της εμπιστευτικότητας των πηγών αναφοράς των απειλών και η αξιοποίησή τους στο πλαίσιο της πυρηνικής προστασίας (security). [10]

Η αναγνώριση και η αξιολόγηση της επικινδυνότητας των απειλών και οι πιθανές συνέπειες τους.

8. Η διασφάλιση της έγκυρης αξιολόγησης των πυρηνικών απειλών, οι οποίες βρίσκονται στην νομική δικαιοδοσία του κάθε κράτους. Η εκτίμηση των συνεπειών και η κατάταξη τους ανάλογα με την επικινδυνότητά τους.[10]

Η χρήση κλιμακούμενης προσέγγισης βασισμένη στον βαθμό επικινδυνότητας.

9. Η κατανομή πόρων στα συστήματα της πυρηνικής ασφάλειας (security), με βάση την κλιμακούμενη προσέγγιση, όσο αφορά τον βαθμό κινδύνου. Η αξιολόγηση των πυρηνικών απειλών και η εκτίμηση της τρωτότητας συγκεκριμένων στόχων από προσβολή εγκληματικών πυρηνικών ενεργειών.[10]

Ο προσδιορισμός των γεγονότων και των εγκαταστάσεων, τα οποία χρήζουν πυρηνικής ασφάλειας (security).

10. Ο καθορισμός των περισσότερο πιθανών εγκαταστάσεων και γεγονότων για προσβολή από παράνομες πυρηνικές πράξεις, όπως για παράδειγμα οι πυρηνικές εγκαταστάσεις, δραστηριότητες σχετικές με την πυρηνική ενέργεια, στρατηγικά σημεία και πολυπληθή γεγονότα, όπως πρωταθλήματα ποδοσφαίρου και συναυλίες. Επίσης, η έρευνα για απώλεια ραδιενεργών πηγών και για τον εντοπισμό παράνομα τοποθετημένου πυρηνικού υλικού.[10]

Η οργάνωση, η προετοιμασία και η άμεση ανταπόκριση σε πυρηνικό συμβάν.

11. Η εξασφάλιση άμεσης και αποτελεσματικής κινητοποίησης και συνεργασίας για την αντιμετώπιση του κινδύνου. Η διασφάλιση της συνδρομής όλων των ιθύνοντων, όπως είναι οι αρμόδιες διοικητικές αρχές, η αστυνομία, το νομικό πλαίσιο, οι διεθνείς και κρατικοί πυρηνικοί οργανισμοί και η δίωξη των παραβατών. Η συστηματική εκτίμηση, εκπαίδευση, προσομοίωση και εκτέλεση των δράσεων αντιμετώπισης επικίνδυνων γεγονότων, με σκοπό την πλήρη ετοιμότητα και την επιδίωξη εκμηδενισμού των επιβλαβών αποτελεσμάτων.[10]

Η διατήρηση και η επέκταση της πυρηνικής ασφάλειας (security).

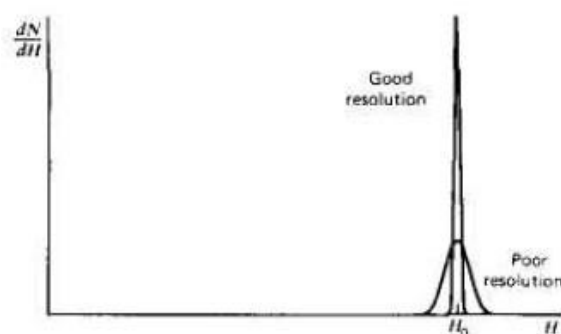
12. Η διασφάλιση της βιωσιμότητας του καθεστώτος πυρηνικής προστασίας (security), μέσω της ανάπτυξης, της εφαρμογής και της αξιολόγησης των συστημάτων διαχείρισης της ασφάλειας (security). Η επιβολή υψηλού επιπέδου ασφαλείας (security), γνωστοποιώντας τους θανατηφόρους κινδύνους και καλλιεργώντας εύρωστη πυρηνική συνείδηση στον κοινό πληθυσμό. Η συνεχής ενημέρωση και εκπαίδευση των αρμόδιων φορέων. Η αδιάκοπη συντήρηση των συστημάτων ασφαλείας, η παροχή άμεσων σχεδίων αντίδρασης και η εξέλιξη των δικλίδων ασφαλείας, περιλαμβάνοντας και την προστασία μέσω υπολογιστών. Ο έλεγχος της ικανότητας των συστημάτων και του προσωπικού και η επιδίωξη ελαχιστοποίησης των πιθανοτήτων εκ των έσω δολιοφθοράς.[10]

## 1.2 Ανίχνευση Ραδιενεργών Πηγών

Τα τέσσερα βασικά είδη εκπομπής των ραδιενεργών πυρήνων είναι τα νετρόνια και οι ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα. Οι ακτινοβολίες σωματιδίων άλφα και βήτα έχουν μικρή ικανότητα διείσδυσης στα υλικά, διότι προσδίδουν άμεσα και τοπικά την κινητική τους ενέργεια στην ύλη. Για παράδειγμα σωματίδια άλφα ανακόπτονται από κοινό χαρτί και τα σωματίδια βήτα αδυνατούν να διαπεράσουν τα φύλλα αλουμινίου. Ωστόσο, η ακτινοβολία γάμμα συνήθως χρειάζεται θωράκιση μόλυβδου για να περιοριστεί σε ικανοποιητικό βαθμό, ενώ η εκπομπή νετρονίων διακρίνεται ιδιαίτερα για την ικανότητα της να εισχωρεί και να διαπερνά την ύλη και τα προβλεπόμενα υλικά για την ανακοπή της εκπομπής τους είναι το τσιμέντο και η παραφίνη. Η μάζα του νετρονίου ισούται με την μάζα του πρωτονίου των υδρογονούχων ατόμων και επειδή κατά την διέλευση των νετρονίων μέσα από την θωράκιση, συμβαίνουν ελαστικές κρούσεις, τα νετρόνια χάνουν την κινητική τους ενέργεια και την προσδίδουν στα πρωτόνια της θωράκισης. Γι' αυτό το λόγο τα υδρογονούχα υλικά, όπως το τσιμέντο και η παραφίνη, είναι καλές θωρακίσεις. Μολονότι, η ακτινοβολία γάμμα και η εκπομπή νετρονίων έχουν την απαραίτητη ενέργεια για να διεισδύσουν στα υλικά θωράκισης και να μεταφερθούν από δεκάδες έως και εκατοντάδες μέτρα στον αέρα, είναι σημαντική η ανίχνευση όλων των ειδών τηςιονίζουσας ακτινοβολίας, λόγω των βλαβών που μπορούν να προκαλέσουν στην ανθρώπινη υγεία. [11]

Οι συσκευές ανίχνευσης λειτουργούν είτε με την μέτρηση ρεύματος είτε με διακριτούς παλμούς. Οι ανιχνευτές ρεύματος αξιοποιούνται στις περιπτώσεις δοσιμετρίας για συνολική καταμέτρηση ενέργειας και συλλέγουν το ρεύμα, το οποίο παράγεται από το κύκλωμα του σε μία συγκεκριμένη περίοδο. Οι συσκευές διακριτού παλμού ή απαριθμητές χρησιμοποιούνται όταν είναι επιθυμητή η γνώση του αριθμού ή/και του ύψους των παλμών. Ο αριθμός των παλμών ορίζει τον ρυθμό αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή και το ύψος εκάστοτε παλμού αναλογεί στην ενέργεια του εκάστοτε σωματιδίου ακτινοβολίας. Επίσης, οι ανιχνευτές αξιολογούνται με βάση τρία χαρακτηριστικά τους, την απόδοση ανίχνευσης, τον νεκρό χρόνο και την ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Η απόδοση ανίχνευσης είναι η πιθανότητα ένα σωματίδιο ακτινοβολίας να αλληλοεπιδράσει με το υλικό ανίχνευσης. Εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό, τις διαστάσεις και την γεωμετρία του ανιχνευτή, αλλά και από την

ενέργεια και το είδος της ακτινοβολίας. Ο νεκρός χρόνος είναι ο ελάχιστος χρόνος, ο οποίος απαιτείται να υπάρξει μεταξύ δύο χρονικά κοντινών καταγραφών παλμών στον ανιχνευτή προκειμένου να είναι διακριτοί οι δύο παλμοί και να μην καταγραφούν ως ένας. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και την ηλεκτρονική διάταξη καταγραφής. Σε πολλές εφαρμογές, οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση του ενεργειακού φάσματος ενός δείγματος προς εξέταση. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα είναι η δυνατότητα των ανιχνευτών να βρίσκουν σωστά την ενέργεια του κάθε καταγραφόμενου παλμού ακτινοβολίας και να διακρίνουν δύο γειτονικές κορυφές μεταξύ τους. Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι αποκρίσεις δύο ανιχνευτών, οι οποίοι καταγράφουν τον ίδιο αριθμό παλμών. Ο ανιχνευτής, ο οποίος έχει καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα, δημιουργεί υψηλότερη κορυφή και στενότερο εύρος εντοπισμού των ενεργειών των παλμών, καθώς μπορεί και ανιχνεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον αριθμό των παλμών και την ενέργεια, την οποία έχουν. Από την άλλη πλευρά, ο ανιχνευτής με χαμηλότερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα δημιουργεί μια πιο πεπλατυσμένη, χαμηλότερη κορυφή και φαίνεται ότι «δυσκολεύεται» να διακρίνει επακριβώς την ενέργεια των καταγραφόμενων παλμών του. [2]



Εικόνα 2 : Παράδειγμα Υψηλής και Χαμηλής Ενεργειακής Διακριτικής Ικανότητας

### 1.2.1 Ανιχνευτές Ιοντισμού

Οι ανιχνευτές ιοντισμού διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τους θαλάμους ιοντισμού, τους αναλογικούς απαριθμητές και τους απαριθμητές Geiger-Muller. Ο θάλαμος ιοντισμού αποτελείται από αέρα, ευγενές αέριο ή υγρό αργό. Τα σωματίδια

ακτινοβολίας διέρχονται μέσα από τον θάλαμο, αντιδρούν με το αέριο και παράγουν ζεύγη θετικών ιόντων και ηλεκτρονίων σε όλο το μήκος της όδυσής τους. Το άθροισμα των ζευγών των ιόντων και των ηλεκτρονίων συλλέγονται από την διάταξη και παράγονται παλμοί ρεύματος και τάσης, οι οποίοι συνιστούν το σήμα του ανιχνευτή. Οι αναλογικοί απαριθμητές αξιοποιούνται κυρίως για απαρίθμηση σωματιδίων και φασματομετρία. Η τάση εξόδου τους, η οποία είναι το σήμα ένδειξης, δεν χρειάζεται ενίσχυση, καθώς ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας του χρησιμοποιούμενου αερίου είναι της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιάδων. Οι καταγραφόμενοι παλμοί τους είναι ανάλογοι με την ενέργεια της ακτινοβολίας και είναι κατάλληλοι για μετρήσεις σωματιδίων βήτα και γάμμα, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους. Επίσης, έχουν μικρό νεκρό χρόνο της τάξης των μs. Μειονέκτημά τους αποτελεί η ανάγκη χρήσης σταθεροποιητή τάσης για να εξομαλύνονται οι μεγάλες μεταβολές στα ύψη των παλμών. Οι απαριθμητές Geiger-Muller, έχοντας μεγάλο πολλαπλασιαστικό παράγοντα αερίου της τάξης των μερικών εκατομμυρίων, χρησιμοποιούνται ευρέως για απαρίθμηση σωματιδίων γάμμα και Χ. Επιπρόσθετα, δεν χρειάζονται σταθεροποιητή τάσης, οπότε είναι πιο οικονομικοί από τους αναλογικούς. Παρόλα αυτά, δεν δύνανται να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές φασματομετρίας, λόγω του μεγάλου ύψους των παλμών, ανεξαρτήτου της ενέργειας και του είδους της ακτινοβολίας και έχουν μεγάλο νεκρό χρόνο.[2]



*Εικόνα 3 : Απαριθμητής Geiger-Muller*

### 1.2.2 Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης αποτελούνται από τους ανόργανους σπινθηριστές, τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας και τις διόδους - ημιαγωγούς ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών βασίζονται στην παραγωγή και μέτρηση φωτονίων ορατού φωτός. Οι κυρίως χρησιμοποιούμενοι ανόργανοι σπινθηριστές είναι οι κρύσταλλοι καισίου – ιωδίου (CsI), οι λιθίου – ιωδίου (LiI) και οι κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου (NaI). Ο επικρατέστερος είναι ο κρύσταλλος ιωδιούχου νατρίου, λόγω της μεγάλης εσωτερικής του απόδοσης για ακτινοβολία γάμμα, της καλής αποτελεσματικότητας φωτεινού παλμού και της γραμμικότητας του ύψους του φωτεινού παλμού με την ενέργεια του φωτονίου, το οποίο τον παράγει. Το μειονέκτημα τους έγκειται στην κακή ενεργειακή διακριτική ικανότητά τους για γ-φασματομετρία. Τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας εφαρμόζονται ευρέως σε μετρήσεις συνολικής απόδοσης ενέργειας από την ακτινοβολία σε υλικό, όπως για παράδειγμα σε εναπόθεση ενέργειας ακτινοβολίας σε βιολογικό ιστό, δηλαδή την μέτρηση δόσης. Είναι ανόργανοι κρύσταλλοι με κατάλληλες προσμίξεις ( $\text{CaSO}_4$  με Mn), για δημιουργία υψηλών κέντρων παγίδευσης ηλεκτρονίων στις απαγορευμένες ζώνες ενέργειας. Η έκθεση του κρυστάλλου στην ιονίζουσα ακτινοβολία ανυψώνει και διατηρεί τα ηλεκτρόνια σθένους σε ζώνες που δημιουργούνται από προσμίξεις στο υλικό. Με το πέρασμα του χρόνου ακτινοβόλησης τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια συσσωρεύονται και αυξάνεται η μετρούμενη ενέργεια. Οι διόδοι – ημιαγωγοί ανιχνευτές κατασκευάζονται συνήθως είτε από πυρίτιο είτε από γερμάνιο. Οι ανιχνευτές από υπερκαθαρό γερμάνιο (high purity germanium, HPGe) αποκαλούνται ενδογενείς ή υψηλής καθαρότητας ανιχνευτές γερμανίου και είναι οι μοναδικοί σε χρήση μέχρι και σήμερα. Αξιοποιούνται στην φασματομετρία υψηλής διακριτικής ικανότητας, δηλαδή το πλήρες εύρος στο μισό του ύψους των κορυφών (FWHM) των φασμάτων τους είναι πολύ μικρό. Η λειτουργία τους σε θερμοκρασία δωματίου είναι αδύνατη και για την ομαλή λειτουργικότητα τους καθίστανται αναγκαίες η χρήση υγρού αζώτου (77°K) σε μεμονωμένο δοχείο και η διάταξη ψύξης του κρυστάλλου. Οι ανιχνευτές γερμανίου – λιθίου (Ge(Li)) έχουν όμοια χαρακτηριστικά με τους HPGe, και ο κρύσταλλός τους πρέπει να ψύχεται μόνιμως, καθώς πιθανή θέρμανσή του σε θερμοκρασία δωματίου σημαίνει ολική καταστροφή. Τέλος, για φασματομετρία άλφα σωματιδίων χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές επιφανειακού φράγματος (surface barrier detectors).[2]



Εικόνα 4 : Φορητός Ανιχνευτής HPGe. Διακρίνεται Αριστερά το Δοχείο Υγρού Αζώτου.

### 1.2.3 Ανιχνευτές Νετρονίων

Τα νετρόνια δεν είναι άμεσοι ιοντιστές της ύλης και συνεπώς η ανίχνευση τους προϋποθέτει την χρήση ορισμένων υλικών «στόχων», τα οποία κατά την αλληλεπίδραση τους με νετρόνια παράγουν σωματίδια ακτινοβολίας ανιχνεύσιμα από τους συμβατικούς ανιχνευτές. Η ισχυρή εξάρτηση των μικροσκοπικών και μακροσκοπικών διατομών των αντιδράσεων, από την ενέργεια των νετρονίων, επιβάλλει την αξιοποίηση διαφορετικών τρόπων ανίχνευσης βραδέων, δηλαδή θερμικών νετρονίων από αυτούς των ταχέων. Οι ευρέως εφαρμοζόμενοι ανιχνευτές θερμικών νετρονίων είναι αναλογικοί θάλαμοι ιοντισμού σε σωλήνα με αέριο  $\text{BF}_3$  (τριφθοριούχο βόριο) και έχουν ως «στόχους» B-10 (βόριο), He-3 (ήλιο), και σχάσιμα υλικά U-235 (ουράνιο) και Pu-239 (πλουτόνιο).[2] Επίσης, χρησιμοποιούνται απεριθμητές σχάσης, οι οποίοι είναι αναλογικοί θάλαμοι ιοντισμού, των οποίων η εσωτερική επιφάνεια καλύπτεται με πολύ λεπτό στρώμα σχάσιμων υλικών.[2] Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές και οι ανιχνευτές σπινθηρισμών δεν προτιμώνται στην ανίχνευση θερμικών νετρονίων, διότι οι μεν καταστρέφονται εύκολα από την ακτινοβολία των νετρονίων και οι δε είναι πολύ ευαίσθητοι στην γάμμα ακτινοβολία. Οι μικροσκοπικές διατομές των αντιδράσεων των ταχέων νετρονίων είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με αυτές των βραδέων, οπότε οι ανιχνευτές βραδέων νετρονίων δεν βρίσκουν εφαρμογή στην ανίχνευση ταχέων νετρονίων. Η αρχή λειτουργίας της δοσιμετρίας νετρονίων, η οποία βοήθησε στην επίτευξη της ανίχνευσης των ταχέων νετρονίων, είναι η επένδυση του εξωτερικού των ανιχνευτών βραδέων νετρονίων με κατάλληλο πάχος επιβραδυντή,

ο οποίος συνήθως είναι υλικό πλούσιο σε πρωτόνια (π.χ. παραφίνη). Τα ταχέα νετρόνια διέρχονται από τον επιβραδυντή και αφού χάσουν ενέργεια γίνονται θερμικά και μπορούν πλέον να ανιχνευθούν ακόμα και από τους συμβατικούς ανιχνευτές. [2]

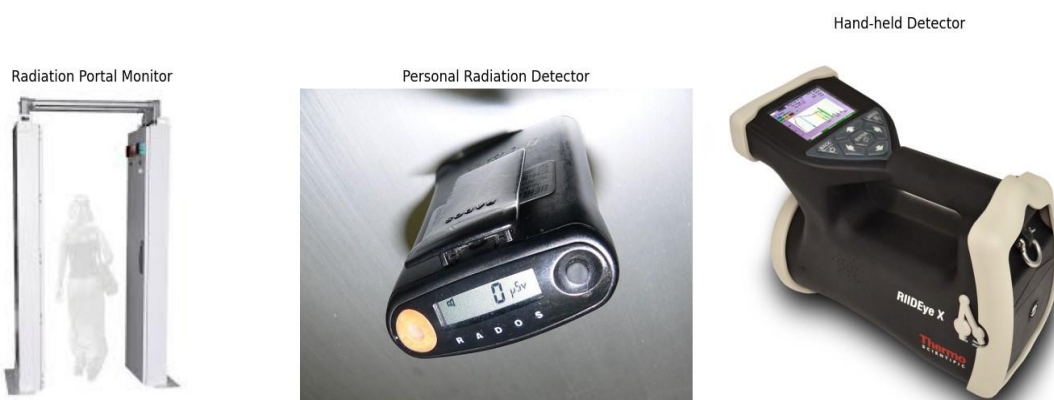
#### 1.2.4 Συσκευές

Οι συσκευές εντοπισμού ραδιενέργειας περιέχουν υλικό, το οποίο αντιδρά με το είδος της ακτινοβολίας και εξάγει συμπεράσματα ανάλογα με την αλληλεπίδραση. Η έξοδος τους μπορεί να είναι οπτικό, ακουστικό σήμα ή ακόμα και δόνηση και χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η ανίχνευση ακτινοβολίας και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις αναζήτησης και ελέγχου των επιπέδων ιονίζουσας ακτινοβολίας σε ένα χώρο. Η δεύτερη κατηγορία είναι η ταυτοποίηση και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τον προσδιορισμό του τύπου του ραδιενεργού υλικού, κυρίως μέσω ενεργειακής φασματοσκοπίας. Η τρίτη κατηγορία ασχολείται με την αξιολόγηση των συναγερμών και των προειδοποιήσεων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν τρία είδη συναγερμών, οι επιβεβαιωμένοι για τα τεκμηριωμένα επικίνδυνα περιστατικά, οι λανθασμένοι για τις περιπτώσεις λάθους ανίχνευσης ραδιενεργού υλικού και οι αθώοι, οι οποίοι απευθύνονται στα περιστατικά εντοπισμού ραδιενέργειας, η οποία δεν είναι επιβλαβής ή ύποπτη. Για παράδειγμα η μετάβαση ενός ανιχνευτή από ένα κλειστό περιβάλλον σε έναν κεντρικό σημείο πόλης, το οποίο αποτελείται από τσιμέντο και διακρίνεται για την αυξημένη ακτινοβολία περιβάλλοντος, είναι πιθανό να ενεργοποιήσει το όργανο, χωρίς όμως να συντρέχει λόγος ανησυχίας. [11]

Οι πύλες ελέγχου ακτινοβολίας (radiation portal monitor, RPM) χρησιμοποιούνται σε πύλες εισόδου ασφαλών περιοχών, όπως είναι τα αεροδρόμια, για τον έλεγχο ανθρώπων και των οχημάτων, τα οποία μεταφέρουν εμπορεύματα στα τελωνεία. Είναι ικανές να ανιχνεύουν γ-ακτινοβολία και ροές νετρονίων και κύριος στόχος τους είναι ο εντοπισμός παράνομης διακίνησης ραδιενεργών πηγών και η αποτροπή της ρύπανσης και των πιθανών κινδύνων. Οι προσωπικοί ανιχνευτές ακτινοβολίας (personal radiation detector, PRD) αξιοποιούνται από αξιωματικούς ασφαλείας για την ενημέρωσή τους σε περίπτωση αύξησης των επιπέδων της ραδιενέργειας και συνήθως είναι μικρές



ηλεκτρονικές συσκευές για την εύρεση της παράτυπης μεταφοράς πυρηνικού υλικού. Οι ανιχνευτές χειρός (hand-held detectors) απαρτίζονται από τρεις κατηγορίες. Η πρώτη είναι οι ανιχνευτές γ-ακτινοβολίας (gamma search devices, GSD) η δεύτερη είναι οι ανιχνευτές νετρονίων (neutron search devices, NSD) και η τρίτη είναι συσκευές ταυτοποίησης ραδιονουκλιδίων (radionuclide identification devices, RID). Η κάθε κατηγορία είναι σχεδιασμένη να εντοπίζει έναν συγκεκριμένο τύπο ακτινοβολίας και χρησιμοποιούνται εκτενώς για την ασφάλεια είτε σε κλειστό είτε σε ανοιχτό χώρο. [11], [12]



*Εικόνα 5 : RPM, PRD, Hand-held Detector*

Οι φορητοί ανιχνευτές ραδιενέργειας (portable radiation scanners, PRS) είναι σακίδια πλάτης και δύναται να χρησιμοποιηθούν για έρευνα και χαρτογράφηση χώρων, οι οποίοι πρόκειται να φιλοξενήσουν πολυπληθή γεγονότα. Τα κινητά συστήματα ακτινοβολίας (radiation mobile system, RMS) βρίσκουν εφαρμογή σε έρευνα επικίνδυνων επιπέδων ακτινοβολίας πριν την διεξαγωγή κάποιας εκδήλωσης σε μεγάλες εξωτερικές περιοχές, όπως είναι δρόμοι και πλατείες. Οι μετρητές υγειοφυσικής (health physics kit) μετράνε τα επίπεδα των δόσεων ραδιενέργειας και την έκταση της ραδιορύπανσης. [11]



*Εικόνα 6 : PRS, RMS, Health Physics Kit*

## **Κεφάλαιο 2 : Ραδιενεργές Πηγές και Μεταφορά**

### *2.1 Εισαγωγή*

Οι σφραγισμένες ραδιενεργές πηγές (sealed radioactive sources, SRSs) χρησιμοποιούνται εκτενώς σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας, όπως είναι η βιομηχανία, η ιατρική, η γεωργία, η έρευνα, η εκπαίδευση, οι πολεμικές εφαρμογές και η βιολογία. Σύμφωνα με καταγεγραμμένα στοιχεία της ΙΑΕΑ, υπολογίζεται ότι οι SRSs είναι δεκάδες εκατομμύρια σε όλο τον πλανήτη.[13] Οι περισσότερες SRSs έχουν μικρό μέγεθος, ωστόσο περιλαμβάνουν μεγάλες συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων εκπέμποντας αντίστοιχες ποσότητες ιονίζουσας ακτινοβολίας. Για την ασφαλή αποθήκευση, μεταφορά και χρήση τους είναι αναγκαία η κατάλληλη θωράκιση, η οποία πρέπει να τους παρέχεται από το περίβλημά τους. Για παράδειγμα, οι ακτινοθεραπευτικές και οι βιομηχανικές SRSs έχουν ενεργότητα από αρκετά GBq (gigabecquerel) έως μερικά PBq (petabecquerel) και μπορούν να αποδειχθούν άμεσα επιβλαβείς για την υγεία, αφού τα αποτελέσματά τους είναι άμεσα. Οι ραδιενεργές πηγές, οι οποίες δεν είναι πλέον σε χρήση, ονομάζονται αχρησιμοποίητες (disused), ενώ αυτές, οι οποίες δεν είναι πλέον ικανές για περαιτέρω εφαρμογή, ονομάζονται εξαντλημένες (spent). Οι χρήστες των πηγών πρέπει να δηλώνουν το είδος αυτών πριν τη μετάβασή τους στον επόμενο χρήστη, καθώς μπορεί να είναι ακόμα επικίνδυνα ραδιενεργές, παρόλο που έχουν καταγραφεί ως εξαντλημένες. Μολονότι, η πυρηνική κοινότητα εφαρμόζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας για την διαχείριση της πλειονότητας των SRSs, έχουν καταγραφεί περιστατικά, στα οποία η έλλειψη ελέγχου και προσοχής οδήγησαν στην ρύπανση περιοχών ή ακόμα και σε θανάτους. Για παράδειγμα, στις 13 Σεπτεμβρίου 1987, συνέβη ένα περιστατικό ραδιορύπανσης στην Γκοϊάνα της Βραζιλίας. Η κλοπή μιας ραδιενεργής πηγής ακτινοθεραπείας από την αυλή νοσοκομείου, οδήγησε σε 4 θανάτους. Περίπου 120.000 άνθρωποι εξετάστηκαν και οι 249 από αυτούς είχαν μολυνθεί, ενώ οι επακόλουθες ενέργειες απορρύπανσης ήταν η αφαίρεση μέρους του επιφανειακού εδάφους από την γύρω περιοχή, η κατεδάφιση μερικών σπιτιών. Συνεπώς, για την αποτροπή του κινδύνου ρύπανσης και την ελαχιστοποίηση της διαρροής ακτινοβολίας από ραδιενεργές πηγές, κρίνονται

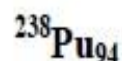
αναγκαίες, η ανάπτυξη υποδομών, νομικού πλαισίου και εθνικών προτύπων ασφαλείας από την εκάστοτε χώρα μέλος της ΙΑΕΑ. [14][15]

## 2.2 Χαρακτηριστικά των SRSs

Ως ραδιενεργή πηγή μπορεί να θεωρηθεί οποιασδήποτε μορφής αντικείμενο είναι ικανό να εκπέμπει ιονίζουσα ακτινοβολία. Σύμφωνα με τον ορισμό της ΙΑΕΑ, σφραγισμένη πηγή είναι «τα ραδιενεργά υλικά, τα οποία είναι ερμητικά κλειστά σε δοχείο, ή δεμένα στενά, και σε συμπαγή μορφή». Το υλικό κατασκευής του δοχείου ή της κάψουλας της SRS είναι ανθεκτικό σε καταπονήσεις τόσο κατά την κανονική λειτουργία, όσο και εξαιτίας πιθανών δυσμενών συνθηκών. Επίσης, απαραίτητος είναι ο μηδενισμός των διαρροών ραδιενεργού υλικού, ο οποίος πολλές φορές επιτυγχάνεται με διπλή ενθυλάκωση και προστασία της πηγής. Οι SRSs δύναται να περιέχουν πληθώρα ραδιονουκλιδίων, καθώς και ποικιλία ποσοτήτων και σχημάτων ραδιενεργών υλικών και διακρίνονται από μεγάλο εύρος κατασκευαστικών, ακτινολογικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. [14]

Το περιεχόμενο ραδιενεργό υλικό μπορεί να έχει στερεή, υγρή ή αέρια μορφή. Συνηθέστερα, σε στερεά μορφή εντοπίζεται σαν μέταλλο, κεραμικό, συμπιεσμένη σκόνη ή διαλυτά άλατα. Οι περιπτώσεις διαρροής της σκόνης και των αλάτων (π.χ. πηγές Cs-137), ελλοχεύουν μεγαλύτερο κίνδυνο στην υγεία και στο περιβάλλον από τις υπόλοιπες στερεές μορφές. Σε αέρια μορφή συναντάται κυρίως το κρυπτό  $^{85}\text{Kr}$  και το τρίτιο  $^3\text{H}$ , ενώ τα τελευταία χρόνια, λόγω της δυσκολίας διαχείρισης του, σπάνια χρησιμοποιείται υγρό ραδιενεργό υλικό. Τα ραδιονουκλίδια ενδέχεται να εκπέμπουν ταυτόχρονα διαφορετικά είδη ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων άλφα και βήτα συνοδεύεται συνήθως από γ-ακτινοβολία και για τους καθαρούς εκπομπούς σωματιδίων βήτα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η ακτινοβολία πέδησης Bremsstrahlung. Επιπρόσθετα, τα ραδιονουκλίδια, τα οποία μετά την διάσπασή τους παράγουν ραδιενεργά προϊόντα πρέπει να συνυπολογιστούν στις προδιαγραφές των κατασκευών των δοχείων των SRSs. [14]

# Plutonium - 238








Half life: 87.7 years  
 Specific activity:  $6.34\text{E}+11 \text{ Bq.g}^{-1}$

Risk group: 1  
 Risk colour: Red



Main emissions (keV)				Exemption levels			
Gamma or X		Beta (E <sub>max</sub> )		Electrons		Alpha	
E	%	E	%	E	%	E	%
E1	16	12				5456	29
E2	44	<1				5499	71
E3	100	<1					
% omitted	0						0

Transport (TBq)	
IAEA ST1 A <sub>1</sub> value	1E+1
IAEA ST1 A <sub>2</sub> value	1E-3

EXTERNAL EXPOSURE (mSv.h <sup>-1</sup> ) for an activity of 1 MBq or 1 MBq.m <sup>-2</sup> (as appropriate)				
Point source (30 cm)	Infinite plane source	10 ml glass vial	Contact with 50 ml glass beaker	Contact with 5 ml plastic syringe
				
Betas, electrons (skin dose)	Betas, electrons (skin)			
-	10 cm 0.0E+00			
	1 m 0.0E+00			
	Photons (skin)			
	10 cm 2.8E-04			
	1 m 1.1E-04			
Gammas, X rays (deep tissue dose)	Photons (deep dose)	100 cm		
2.04E-5	10 cm 4.3E-05	2.15E-8	2.16E-5	1.05E-4
	1 m 1.7E-05			

The values above do not include Bremsstrahlung radiation.

CONTAMINATION			SHIELDING (mm)	
Contamination skin dose (mSv.h <sup>-1</sup> )	Detection	Derived limits (Bq.cm <sup>-2</sup> )	Betas and electrons (Total absorption)	
Uniform deposit (1kBq.cm <sup>-2</sup> ) 3.70E-3	Recommended probes*	Removable contamination	Glass	-
0.05 ml droplet (1 kBq) 0.0E+00	Alpha ++	Fixed contamination	Plastic	-
	Beta	4E-2	Gamma and X rays (half and tenth value thickness)	
	Gamma	4E+0		% 1/10
	X rays +		Lead	<1
			Steel	<1 2

\* If no probes are indicated the recommended technique is to use a wipe test in association with a probe or liquid scintillation technique

INTERNAL EXPOSURE FOR WORKERS					
COMMITTED EFFECTIVE DOSE PER UNIT INTAKE (Sv.Bq <sup>-1</sup> )					
Ingestion	f <sub>1</sub>	Inhalation	1 μm	5 μm	
All unspec. compounds	0.0005	2.3E-07	F		
Nitrates	0.0001	4.9E-08	M	4.3E-05	3.0E-05
Insoluble oxides	0.00001	8.8E-09	S	1.5E-05	1.1E-05
Highest dose organ	Bone surfaces	20 mSv A <sub>LI</sub> Ingestion	8.7E+04 (Bq)	20 mSv A <sub>LI</sub> Inhalation	4.7E+02 (Bq)

MAXIMUM RECOMMENDED ACTIVITIES IN LOW LEVEL OR INTERMEDIATE LEVEL LABORATORIES (Bq)							
PHYSICOCHEMICAL STATE	Subject to external exposure requirements which may be more restrictive						
	Volatility factor (k)	Supervised area			Controlled area		
		Bench	Fume hood	Bench	Fume hood	Glove box	
All compounds except below	0.001	Forbidden	2E+04	Forbidden	5E+04	5E+06	
PuO <sub>2</sub>	0.001	Forbidden	4E+04	Forbidden	1E+05	1.3E+07	

Εικόνα 7 : Πληροφορίες Ισοτόπου <sup>238</sup>Pu

### 2.2.1 Κατηγοριοποίηση των SRSs

Οι SRSs ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες:

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από θερμοηλεκτρικές γεννήτριες από ραδιοϊσότοπα (radioisotope thermoelectric generators, RTG), ακτινοβολητές (irradiators), συσκευές ακτινοθεραπείας (teletherapy sources), σταθερές πηγές πολλαπλών ακτινών για τηλεθεραπεία (fixed, multi-beam teletherapy gamma knife sources). Οι RTGs χρησιμοποιούν την ακτινοβολία των ραδιενεργών πηγών τους και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, μέσω ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Τα κύρια ραδιονουκλίδια τους είναι το  $^{90}\text{Sr}$  και το  $^{238}\text{Pu}$  και οι διαστάσεις τους δεν είναι μεγαλύτερες από 200mm. Η κύρια εφαρμογή τους είναι η ηλεκτροδότηση φάρων στον Αρκτικό κύκλο. Οι ακτινοβολητές έχουν ποικίλα μεγέθη και αξιοποιούνται στην αποστείρωση ιατρικών εξαρτημάτων, στην διατήρηση τροφών και στην βελτίωση των ιδιοτήτων των πολυμερών. Οι συσκευές τηλεθεραπείας χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές. Εκπέμπουν ιονίζουσα ακτινοβολία σε ασθενείς και η κύρια ασθένεια, την οποία προσπαθούν να αντιμετωπίσουν είναι ο καρκίνος. Έχουν μικρές διαστάσεις και φυλάσσονται σε ασφαλή μέρη στις ιατρικές εγκαταστάσεις χρήσης τους. Επίσης, απαιτούν ειδικό, διαφορετικό σχεδιασμό από τις υπόλοιπες ραδιενεργές πηγές, καθώς αντικαθίστανται συχνά.

Η δεύτερη κατηγορία απαρτίζεται από βιομηχανικές πηγές γ-ραδιογραφίας (industrial gamma radiography sources) και υψηλής/μεσαίας δόσης πηγές βραχυθεραπείας (high/medium dose rate brachytherapy sources). Οι βιομηχανικές πηγές γ-ραδιογραφίας χρησιμοποιούνται στην χημική, πετροχημική και κατασκευαστική βιομηχανία για έλεγχο ποιότητας και αξιολόγηση ασφαλείας των προϊόντων. Αποτελούνται από  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{75}\text{Se}$  και είναι συνήθως διπλά ενθυλακωμένες για επιπρόσθετη ασφάλεια από διαρροή ακτινοβολίας. Οι υψηλής/μεσαίας δόσης πηγές βραχυθεραπείας βρίσκουν εφαρμογή στην ιατρική για αντιμετώπιση όγκων στο στήθος, τον προστάτη, το αιδοίο και το δέρμα. Παλαιότερα συνήθως αποτελούνταν από το ραδιονουκλίδιο  $^{226}\text{Ra}$  και ενθυλακωνόνταν σε λευκόχρυσο.

Στην *τρίτη κατηγορία* κατατάσσονται οι μετρητές υγρασίας πηγαδιών (well logging gauges) και οι σταθερές βιομηχανικές πηγές υψηλής ενεργότητας (fixed industrial gauges that incorporate high activity sources). Οι μετρητές υγρασίας πηγαδιών περιέχουν πηγές νετρονίων  $^{241}\text{Am}$ -Be και μετράνε την υγρασία και τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών στρωμάτων υπαρχόντων και υπό κατασκευή πηγαδιών. Οι σταθερές βιομηχανικές πηγές υψηλής ενεργότητας καταγράφουν την περιεκτικότητα σε συγκεκριμένα χημικά στοιχεία, το πάχος, την πυκνότητα και την υγρασία υλικών. Έχουν μικρές διαστάσεις και χρησιμοποιούν  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{252}\text{Cf}$ .

Η *τέταρτη κατηγορία* είναι οι συσκευές βραχυθεραπείας χαμηλής δόσης (low dose rate brachytherapy sources), οι οποίες έχουν την ίδια εφαρμογή με τις υψηλής/μεσαίας δόσης πηγές βραχυθεραπείας, με την μοναδική διαφορά ότι χρησιμοποιούν ιώδιο-125 ( $^{125}\text{I}$ ) και χρυσό-198 ( $^{198}\text{Au}$ ), οι βιομηχανικές πηγές χαμηλής ενεργότητας (industrial gauges that do not incorporate high activity sources) και τα παλιά οστεοπυκνόμετρα (bone densitometers), αποτελούνται από κάδμιο-109 ( $^{109}\text{Cd}$ ), γαδολίνιο-153 ( $^{153}\text{Gd}$ ) και αμερίκιο-241 ( $^{241}\text{Am}$ ). Οι βιομηχανικές πηγές χαμηλής ενεργότητας μετράνε πάχος χαρτιού, πλαστικού, λεπτών μετάλλων και συναντώνται στην βιομηχανία των τσιγάρων για την μέτρηση της ορθής πυκνότητας του καπνού.

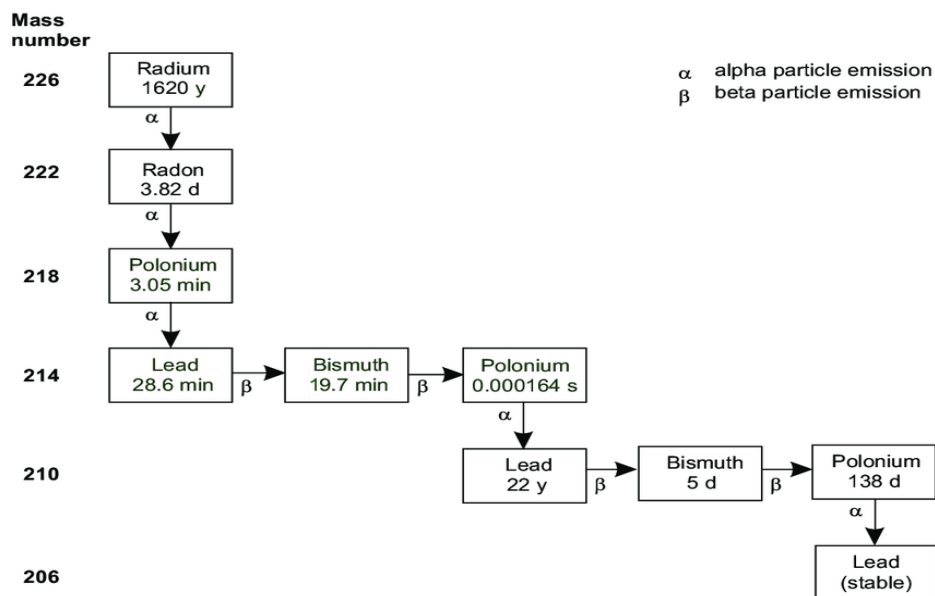
Η *πέμπτη κατηγορία* περιλαμβάνει τις συσκευές απορρόφησης ηλεκτρονίων (electron capture devices), τις πηγές ελέγχου για τους τομογράφους εκπομπής ποζιτρονίων (positron emission tomography check sources, PET) και τις πηγές για συσκευές φθορισμού ακτίνων X (X ray fluorescence device), και χαρακτηρίζεται από χαμηλή επικινδυνότητα έναντι των υπόλοιπων κατηγοριών. [14]

### 2.2.2 Ραδιονουκλίδια των SRSs

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ραδιονουκλίδια σε SRSs είναι το ράδιο, το κοβάλτιο, το καίσιο, το στρόντιο, το ιρίδιο, το αμερίκιο, το καλιφόρνιο, το σελήνιο, το ιώδιο και το πλουτόνιο. Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους :

- Ράδιο-226 ( $^{226}\text{Ra}$ )

Το  $^{226}\text{Ra}$  ανήκει στην ραδιενεργή σειρά διάσπασης του Ουρανίου-238 ( $^{238}\text{U}$ ) και είναι ισχυρή πηγή σωματιδίων άλφα. Διασπάται με ακτινοβολία άλφα και παράγει το ευγενές ραδιενεργό αέριο Ραδόνιο-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ). Το περίβλημα κατασκευάζεται συνήθως από λευκόχρυσο και έχει μικρό μέγεθος. Οι ιατρικές ραδιενεργές πηγές αξιοποιούσαν παλαιότερα το  $^{226}\text{Ra}$  υπό την μορφή διαλυτών αλάτων, ωστόσο η παραγωγή αερίου  $^{222}\text{Rn}$  οδηγούσε σε προβλήματα διαρροών ραδιενέργειας, λόγω της αύξησης της πίεσης στο εσωτερικό των δοχείων. Ο ανθρώπινος οργανισμός αποθηκεύει το  $^{226}\text{Ra}$  στα οστά και πλέον δεν προτιμάται σαν ραδιενεργό υλικό. [14]

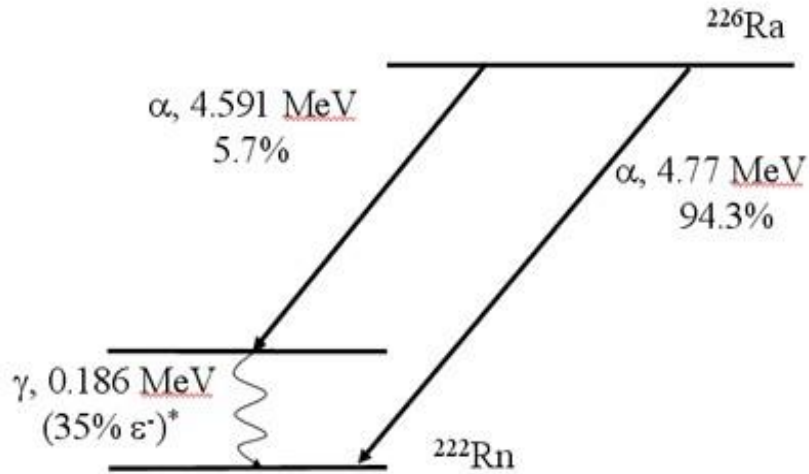


Εικόνα 8 : Διάγραμμα Ραδιενεργής Διάσπασης Ράδιου-226



Εικόνα 9 : Ραδιενεργές πηγές  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{60}\text{Co}$





Εικόνα 10 : Επικρατέστερες Είδη Ακτινοβολίας μετά από Διάσπαση του Ραδίου-226 σε Ραδόνιο-222

- Κοβάλτιο-60 ( $^{60}\text{Co}$ )

Το κοβάλτιο έχει μόνο ένα σταθερό ισότοπο, το  $^{59}\text{Co}$ . Όταν χρησιμοποιείται σε πυρηνικό αντιδραστήρα το  $^{59}\text{Co}$  απορροφά ένα θερμικό νετρόνιο και μετατρέπεται σε  $^{60}\text{Co}$ . Διασπάται με ακτινοβολία βήτα και παράγει ένα ηλεκτρόνιο, ένα αντί-νεutrino και κατόπιν δύο  $\gamma$ -φωτόνια. Το τελευταίο στάδιο της διάσπασης φτάνει στο σταθερό ισότοπο νικέλιο-60 ( $^{60}\text{Ni}$ ). Βρίσκει εφαρμογή σε βιομηχανικές ακτινοβολήσεις, ραδιογραφίες και παλαιότερα σε τηλεθεραπεία. Έχουν μορφή δισκίων, μικρό μέγεθος και τοποθετούνται σε κάψουλες από ανοξείδωτο ατσάλι. Για αποφυγή ραδιορύπανσης, πριν την τοποθέτηση του σε δοχείο υφίσταται επινικέλωση. [14]

- Καίσιο-137 ( $^{137}\text{Cs}$ )

Το  $^{137}\text{Cs}$  παράγεται από την πυρηνική σχάση του καυσίμου ουρανίου των αντιδραστήρων και θεωρείται εκπομπός ακτινοβολίας γάμμα μεσαίας ενέργειας. Λόγω της μεγάλης του αντιδραστικότητας χρησιμοποιείται σε SRS είτε μέσα σε χημικές ενώσεις υπό την μορφή αλάτων ή χλωριδίων, είτε υπό την μορφή συμπιεσμένης σκόνης. Είναι εξαιρετικά διαλυτό στο νερό και συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα ασφαλείας στην εφαρμογή του. Ακολουθεί την ροή του νερού και εάν εισαχθεί στον ανθρώπινο οργανισμό διασπείρεται σε ολόκληρο το σώμα. Για τον

περιορισμό του κινδύνου τοποθετείται συνήθως μέσα σε ράβδους και σε κεραμικά δισκία. [14]



Εικόνα 11 : Ραδιενεργές πηγές  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{192}\text{Ir}$

- Στρόντιο-90 ( $^{90}\text{Sr}$ )

Το  $^{90}\text{Sr}$  είναι μέταλλο και εντοπίζεται μέσα σε χημικές ενώσεις χλωριδίων και οξειδίων. Στις περισσότερες εφαρμογές ενσωματώνεται σε κεραμικές και γυάλινες κάψουλες, ενώ συχνά επικαλύπτεται από στρώση παλλαδίου και ασημιού. Δεν εκπέμπει γ-ακτινοβολία, αλλά β, επομένως ακτινοβολεί τοπικά και όχι σε μεγάλες αποστάσεις. Σε περίπτωση διαρροής είναι επιβλαβές για το δέρμα. Ενώ αν εισαχθεί στο σώμα συγκεντρώνεται στα οστά, προκαλώντας μόνιμες βλάβες. [14]

- Ιρίδιο-192 ( $^{192}\text{Ir}$ )

Το  $^{192}\text{Ir}$  είναι το μέταλλο με την μεγαλύτερη πυκνότητα. Ως ραδιενεργός πηγή αξιοποιείται στην ραδιογραφία ακτινοβολίας γάμμα, σε μη καταστρεπτικές δοκιμές σωλήνων και σε βραχυθεραπείες ασθενών. Έχει μορφή σύρματος και εντοπίζεται σε στοίβες μικρών δισκίων. Ο μικρός χρόνος ημιζωής του, περίπου στις 74 ημέρες, συνδράμει στην εύκολη απόσυρσή του, ωστόσο χρήζει τακτικής αλλαγής λόγω της γρήγορης εξάντλησης των αποθεμάτων του. [14]

- Αμερίκιο-241 ( $^{241}\text{Am}$ )

Το  $^{241}\text{Am}$  είναι υπερουράνιο στοιχείο, το οποίο παρασκευάζεται μετά από συνεχόμενες ενσωματώσεις νετρονίων στο  $^{238}\text{U}$ . Διασπάται με ακτινοβολία σωματιδίων άλφα και τα προϊόντα του είναι επίσης ραδιενεργά. Ωστόσο εκπέμπει και γ-φωτόνια με ενέργεια 59 keV. Χρησιμοποιείται σαν πηγή άλφα και σε συνδυασμό με βηρύλλιο μπορεί να αξιοποιηθεί σαν πηγή νετρονίων. Η συνηθέστερη μορφή του είναι σε χημικές ενώσεις από οξείδια και ασφαλίζεται μέσα σε κεραμικές κάψουλες, λόγω της μεγάλης αντιδραστικότητας του με το νερό. [14]

- Καλιφόρνιο-252 ( $^{252}\text{Cf}$ )

Το  $^{252}\text{Cf}$  είναι χημικό στοιχείο της σειράς των ακτινιδών και δεν έχει σταθερό ισότοπο. Είναι έντονος εκπομπός νετρονίων. Συναντάται σε μικρές ποσότητες, καθώς παράγεται με συνεχόμενες λήψεις νετρονίων σε πυρήνες – στόχους άλλων χημικών στοιχείων της σειράς των ακτινιδών. [14]

- Σελήνιο-75 ( $^{75}\text{Se}$ )

Το  $^{75}\text{Se}$  είναι πτητικό, διαβρωτικό, τοξικό και εξαιρετικά αντιδραστικό χημικό στοιχείο. Διασπάται προς το σταθερό ισότοπο αρσενικό-75 ( $^{75}\text{As}$ ) μετά από απορρόφηση ηλεκτρονίου (electron capture) στον άτομό του και κατόπιν το  $^{75}\text{As}$  εκπέμπει ακτινοβολία γάμμα. Εντοπίζεται σε εφαρμογές ραδιογραφίας λεπτών κατασκευών. Λόγω της μεγάλης τοξικότητας και αντιδραστικότητάς του όχι μόνο με το νερό, αλλά με άλλα χημικά στοιχεία, τα οποία χρησιμοποιούνται σε SRSs, συμπίεζεται σε σχήμα σφαιριδίου και περιβάλλεται αρχικά, από επίστρωση τιτανίου και δευτερευόντως, από ανοξείδωτο ατσάλι. [14]

- Ιώδιο-125 ( $^{125}\text{I}$ )

Ο πυρήνας του  $^{125}\text{I}$  απορροφά ηλεκτρόνια και συνεπακόλουθα εκπέμπονται ακτίνες Χ χαμηλής ενέργειας από το άτομό του. Εφαρμόζεται σε βραχυθεραπείες ασθενών και βιομηχανικές διεργασίες ακτινοβολίας. Για την τοποθέτηση του σε SRSs πρώτα υφίσταται προστατευτική επίστρωση τιτανίου και σε δεύτερη φάση περιβάλλεται με κάψουλα από ανοξείδωτο ατσάλι. [14]

- Πλουτόνιο-238 ( $^{238}\text{Pu}$ )

Το  $^{238}\text{Pu}$  είναι υπερουράνιο χημικό στοιχείο της σειράς των ακτινίδων. Παράγεται με απορρόφηση νετρονίου στο ποσειδώνιο-237 ( $^{237}\text{Np}$ ), το οποίο με την σειρά του παρασκευάζεται από την ακτινοβόληση του ουρανίου σε πυρηνικό αντιδραστήρα. Διασπάται εκπέμποντας σωματίδια άλφα και σαν προϊόν προκύπτει το φυσικό ραδιονουκλίδιο  $^{234}\text{U}$ . Συναντάται κυρίως σε στερεά σφαιρική μορφή ενθυλακωμένη μέσα σε ανοξείδωτο ατσάλι. [14]

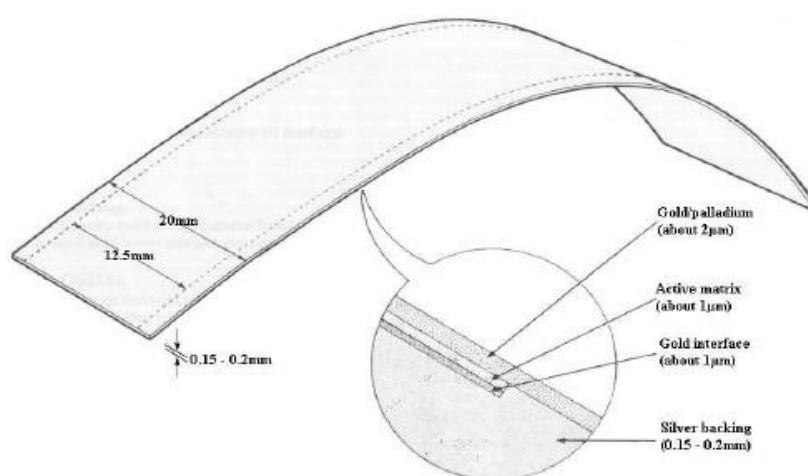
Τα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{226}\text{Ra}$  είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ραδιονουκλίδια σε πηγές νετρονίων. Η διάσπασή τους με εκπομπή σωματιδίων άλφα προκαλεί αντίδραση ( $\alpha, n$ ) με ελαφριά χημικά στοιχεία, όπως το βηρύλλιο ( $^4\text{Be}$ ), το βόριο ( $^5\text{B}$ ), το λίθιο ( $^3\text{Li}$ ) και το φθόριο ( $^9\text{F}$ ). Οι πυρήνες των ελαφρών στοιχείων απορροφούν τα σωματίδια άλφα και εκπέμπουν νετρόνια. Οι πιο ευρέως εφαρμοσμένες πηγές νετρονίων είναι οι αμερικίου – βηρυλλίου (Am – Be). Το μήκος των πηγών νετρονίων κυμαίνεται από 3 mm έως και 40 mm. [14]



Εικόνα 12 : Πηγή Νετρονίων Αμερικίου - Βηρυλλίου

### 2.2.3 Δομή και Σχεδιασμός SRSs

Οι ραδιενεργές πηγές σωματιδίων άλφα περιέχουν κυρίως  $^{210}\text{Po}$  (πολώνιο-210),  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Am}$ . Οι διαστάσεις ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιότητες και την φύση της εκάστοτε εφαρμογής. Παλαιότερα, οι κατασκευές αποτελούνταν από υγρά ραδιονουκλίδια, τα οποία εγκλωβίζονταν μέσα σε γυάλινα ή πλαστικά φιαλίδια, ωστόσο αυτή η μέθοδος παραγωγής εγκαταλείφθηκε, λόγω της αυξημένης επικινδυνότητας στον χειρισμό και στην μεταφορά των υλικών. [14]

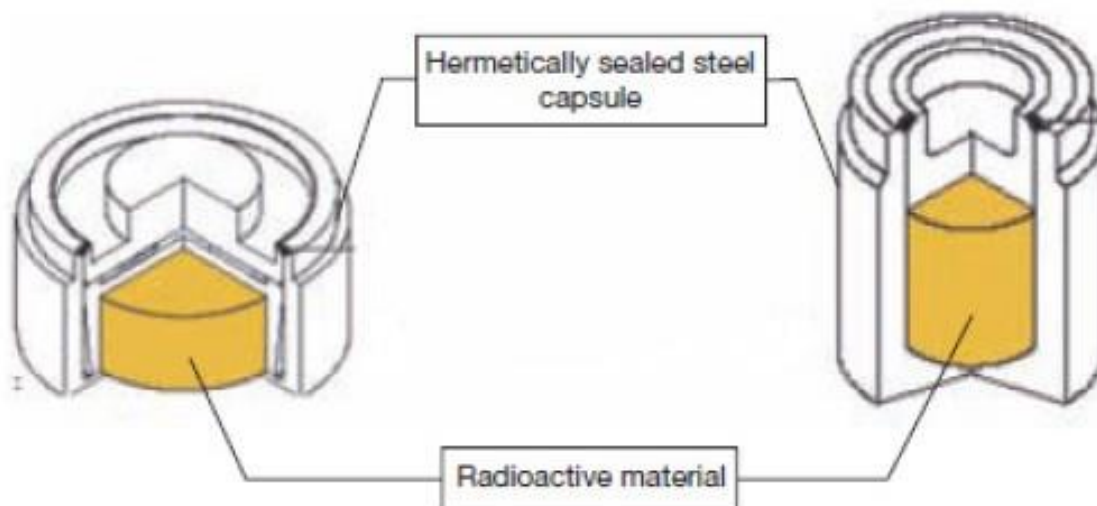


Εικόνα 13 : Τυπική Κατασκευή Πηγής Σωματιδίων Άλφα σε Μορφή Ταινίας

Οι πηγές ακτινοβολίας βήτα είναι συνήθως το  $^{63}\text{Ni}$  (νικέλιο-63), ο  $^{14}\text{C}$  (άνθρακας-14) και το  $^{90}\text{Sr}$ . Γενικά, οι κατασκευές αποτελούνται από λεπτά μεταλλικά φύλλα, τα οποία ενθυλακώνουν τα ραδιονουκλίδια. Το  $^{63}\text{Ni}$  συναντάται υπό την μορφή συρμάτων ή μεταλλικών σωληνώσεων και το μήκος του δεν υπερβαίνει τα 40 mm. Οι πηγές από  $^{14}\text{C}$  έχουν μήκος μικρότερο από 70 mm, πάχος έως 1 mm και απαρτίζονται από πολυμερείς ταινίες κολλημένες σε αλουμινένια φύλλα. Το  $^{90}\text{Sr}$  χρησιμοποιείται συνήθως μέσα σε κεραμικές κάψουλες για περαιτέρω ασφάλεια από διαρροή. [14]

Τα ραδιονουκλίδια στις πηγές γ-ακτινοβολίας δύνανται να έχουν στερεά μορφή κοκκώδη, κυλινδρική, δισκοειδή, σωλήνωσης, ταινίας ή συρμάτινη. Για την ενθυλάκωση του πυρηνικού υλικού χρησιμοποιείται εκτενώς ανοξειδωτο ατσάλι και σε μικρότερη κλίμακα τιτάνιο και αλουμίνιο. Επίσης, για υψηλότερη ασφάλεια και ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής ακτινοβολίας συνηθίζεται η διπλή

προστασία – σφράγιση. Για παράδειγμα, διπλή θωράκιση εφαρμόζεται στην περίπτωση της χρήσης  $^{137}\text{Cs}$  υπό την μορφή αλάτων, όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η ποσότητα της ραδιενεργού υλικού να βρεθεί εκτός του δοχείου. [14]



Εικόνα 14 : Παραδείγματα Ενθυλάκωσης σε Κυλινδρική Πηγή

### 2.3 Μεταφορά Ραδιενεργών Πηγών

Οποιαδήποτε μεταφορά ραδιενεργού υλικού πρέπει να συμμορφώνεται με τους κανόνες μεταφοράς (IAEA Transport Regulations) της IAEA, λόγω της επικινδυνότητάς του υλικού. Η μεταφορά αχρησιμοποίητων (disused) ραδιενεργών πηγών από την τοποθεσία της χρήσης τους προς εγκαταστάσεις αποθήκευσης ή απόρριψης ραδιενεργού υλικού, εξαρτάται άμεσα τόσο από την φυσική κατάσταση, το είδος και την ενεργότητα της πηγής, όσο και από το είδος και την καταλληλότητα της συσκευής μεταφοράς. Επίσης, σημαντικές παράμετροι της μεταφοράς είναι οι προδιαγραφές των εγκαταστάσεων παραλαβής, καθώς προσδιορίζουν την εξασφάλιση των απαραίτητων επιπέδων ασφάλειας, την ικανότητα διαχείρισης του υλικού και την χρονική διάρκεια της παραμονής και της αποθήκευσης του στον χώρο τους. [14]

### 2.3.1 Δοχεία Μεταφοράς

Τα δοχεία μεταφοράς σχεδιάζονται με βάση την μάζα, τον όγκο και το σχήμα τους, στοχεύοντας παράλληλα στην εύκολη και ασφαλή μεταφορά τους. Επιπρόσθετα αντικείμενα - επεκτάσεις πρέπει να ενεργούν επικουρικά στο δοχείο μεταφοράς σε περίπτωση ανύψωσης ή γενικής κίνησης της κατά την διάρκεια της μεταφοράς και σε κάθε περίπτωση να μην αποτελούν εμπόδιο στην ασφάλεια. Η εξωτερική επιφάνεια των δοχείων είναι αναγκαίο να είναι υδρόφοβη για τον περιορισμό της συγκράτησης υγρών και υγρασίας και να μην απαρτίζεται από προεξέχοντα αντικείμενα, ώστε να δύναται να απορρυπανθεί εύκολα σε περίπτωση ραδιορύπανσης. Ο σχεδιασμός, χρησιμοποιώντας δικλείδες ασφαλείας, πρέπει να προλαμβάνει και να αποτρέπει μη εξουσιοδοτημένες ενέργειες με σκοπό την διαρροή ακτινοβολίας. Επίσης, κρίσιμοι παράγοντες είναι η χημική και η φυσική συμβατότητα των ραδιενεργών πηγών και των συσκευών μεταφοράς και η λήψη μέτρων κατά της διάβρωσης και της γήρανσης του εξοπλισμού. Τέλος, οι αντοχές σε πιθανές επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, δονήσεις, ταλαντώσεις και σε απότομες αλλαγές θερμοκρασίας και πίεσης, κατά την διάρκεια της μεταφοράς, πρέπει να είναι ικανές να εκμηδενίσουν την πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών και οδών διαρροής ιονίζουσας ακτινοβολίας. [16]

	A1	A2
Cobalt ( <sup>60</sup> Co)	0.4 TBq	0.4 TBq
Caesium ( <sup>137</sup> Cs)	2 TBq	0.6 TBq
Iridium ( <sup>192</sup> Ir)	1 TBq	0.5 TBq
Strontium ( <sup>90</sup> Sr)	0.2 TBq	0.1 TBq
Americium ( <sup>241</sup> Am)	10 TBq	$1 \times 10^{-3}$ TBq
Californium ( <sup>252</sup> Cf)	0.05 TBq	$3 \times 10^{-3}$ TBq

Πίνακας 1 : Οριακές Τιμές A1, A2 Ραδιενεργών Διασπάσεων για Δοχεία Μεταφοράς

Κατηγορίας A

Τα δοχεία μεταφοράς ραδιενεργών πηγών χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες ακολουθούν τους κανόνες μεταφοράς της ΙΑΕΑ. Η κατηγορία A μπορεί να είναι κουτί, τύμπανο ή απλό εμπορευματοκιβώτιο, το οποίο αντέχει ραδιενέργεια έως την τιμή A2, ή ακόμα και έως την τιμή A1, εάν η ραδιενεργή πηγή χαρακτηρίζεται τεχνικά

ως «ειδικής μορφής ραδιενεργό υλικό». Τα υλικά, τα οποία ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι είτε μη διασπειρόμενα στερεά ραδιενεργά υλικά, είτε σφραγισμένες κάψουλες, οι οποίες περιέχουν ραδιενεργό υλικό. Η μικρότερη διάσταση των δοχείων της κατηγορίας A δεν είναι μικρότερη των 10 cm και η εξωτερική επιφάνεια αποτελείται από σφράγισμα, το οποίο αποτρέπει την άμεση διάρρηξη του δοχείου και εξασφαλίζει με οπτική ένδειξη ότι το περιεχόμενο παραμένει ασφαλές. Οι κατηγορίες B(U) και B(M) σχεδιάζονται, ώστε να είναι ευκρινώς διακριτή η κατηγορία τους από όλες τις οπτικές γωνίες του περιβάλλοντος και φέρουν κολλημένες πάνω τους τις κατάλληλες ετικέτες της εκάστοτε κατηγορίας. Οι ετικέτες κολλιούνται συνήθως εκατέρωθεν των πλευρών των συσκευών και περιλαμβάνουν το σύμβολο της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες οι τιμές ακτινοβολίας, των μεταφερόμενων ραδιενεργών πηγών, ξεπερνούν τα όρια A1 και A2 και σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τις συνήθως ισχύουσες συνθήκες περιβάλλοντος, όσο και ακραίες περιστάσεις αλλαγών θερμοκρασίας, πίεσης, σφάλματος στην θερμική μόνωση και περιορισμού του εξαερισμού κατά την μεταφορά. Τα δοχεία μεταφοράς της κατηγορίας C κατασκευάζονται με στόχο την μέγιστη μείωση διαρροής ραδιενέργειας σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας, μεταφοράς και αποθήκευσης. Για παράδειγμα, πρέπει να είναι ανθεκτικές σε τοποθέτηση εντός του εδάφους, σε εφαρμογές μεγάλων πιέσεων και στην παρουσία μειγμάτων διαφορετικών ραδιονουκλιδίων στο εσωτερικό τους. [14], [16]

	A1	A2
Cobalt ( $^{60}\text{Co}$ )	1,2 PBq	1,2 PBq
Caesium ( $^{137}\text{Cs}$ )	6 PBq	1,8 PBq
Iridium ( $^{192}\text{Ir}$ )	3 PBq	1,5 PBq
Strontium ( $^{90}\text{Sr}$ )	0,6 PBq	0,3 PBq
Americium ( $^{241}\text{Am}$ )	30 PBq	3 PBq
Californium ( $^{252}\text{Cf}$ )	150 TBq	9 TBq

*Πίνακας 2 : Οριακές Τιμές A1, A2 Ραδιενεργών Διασπάσεων για Δοχεία Μεταφοράς Κατηγορίας B(U) και B(M)*



### 2.3.2 Τρόποι Μεταφοράς

Ένας τρόπος μεταφοράς ραδιενεργών πηγών είναι η κανονική μεταφορά τους με το αρχικό δοχείο. Τα δοχεία, τα οποία περιέχουν τις ραδιενεργές πηγές προς χρήση, μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως κατηγορίας *A* είτε ως κατηγορίας *B*. Η πιθανότητα διαρροής ραδιενέργειας είναι μηδαμινή, διότι δεν απαιτούνται ενέργειες για την αλλαγή δοχείου του ραδιενεργού υλικού πριν την μεταφορά του. Στην περίπτωση κατά την οποία η μεταφορά είναι αναγκαία και το αρχικό δοχείο δεν τηρεί τις προδιαγραφές των συσκευών μεταφοράς, δύναται να ζητηθεί ειδική έγκριση και κατάλληλο πιστοποιητικό από την αρμόδια αρχή μεταφορών ραδιενεργών υλικών για την διεκπεραίωση των ενεργειών. Συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει κυρίως σε εφαρμογές ραδιενεργών πηγών για ραδιογραφία και σε βιομηχανίες μικρής εμβέλειας. Ένας άλλος τρόπος μεταφοράς λαμβάνει χώρα μετά την αφαίρεση του αρχικού δοχείου. Σε αυτήν την περίπτωση, η απομάκρυνση της ραδιενεργής πηγής από το αρχικό δοχείο της πρέπει να πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας κατάλληλες υποδομές και μεθόδους τηρώντας όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας εναντίον της ρύπανσης. Συνηθέστερα, οι ραδιενεργές πηγές υψηλής ακτινοβολίας τοποθετούνται σε συσκευές μεταφοράς τύπου *B*. Σε παλαιές εξαντλημένες μονάδες τηλεθεραπείας, των οποίων τα δοχεία είναι παρωχημένα και οι προδιαγραφές τους βρίσκονται πλέον εκτός του πλαισίου προστασίας, απαιτείται η αφαίρεση της ραδιενεργής πηγής και η επανατοποθέτηση της σε νέα συσκευή μεταφοράς. Επιπρόσθετα, κάποιες ραδιενεργές πηγές, των οποίων το σχήμα και το επίπεδο ραδιενέργειας δεν καλύπτονται από κάποια υπάρχουσα συσκευή μεταφοράς, χρήζουν σχεδίασης και κατασκευής ειδικών συσκευών προσαρμοσμένων στα μέτρα και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περίπτωσης.[14]

Τα κυριότερα προβλήματα, τα οποία αντιμετωπίζει ο κλάδος της μεταφοράς των ραδιενεργών πηγών, είναι η έλλειψη χρηματοδότησης, η δυσκολία έκδοσης των απαραίτητων αδειών για μεταφορά, η ανυπαρξία πιστοποιητικών και πληροφοριών σχετικά με τις ραδιενεργές πηγές και η αδυναμία εύρεσης κατάλληλων πιστοποιημένων συσκευών μεταφοράς. Την χρονική στιγμή της αγοράς μιας ραδιενεργής πηγής και της αποστολής της στον τελικό χρήστη, οι προδιαγραφές συνήθως υπακούν στα πρότυπα ασφαλείας. Ωστόσο, οι αρχικές συμφωνίες δεν περιλαμβάνουν την μεταφορά μετά την εξάντληση τους, καθώς είναι κοστοβόρες, με αποτέλεσμα οι ραδιενεργές πηγές να

«ξεμένουν» στους χρήστες τους. Επίσης, οι αναθεωρήσεις του πλαισίου προστασίας προς ισχυροποίηση των μέτρων και οι αλλαγές, οι οποίες εφαρμόζονται στις προδιαγραφές για ασφαλείς μεταφορές, οδηγούν στην αχρήστευση των αρχικών πιστοποιητικών με κατάληξη να βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων. Τα περισσότερα κράτη – μέλη της ΙΑΕΑ απαιτούν την έκδοση άδειας για μεταφορά ραδιενεργού υλικού. Συνεπώς, στην περίπτωση διεθνούς μεταφοράς, διαμέσου πολλών χωρών, είναι αναγκαία η πρόσληψη ειδικά πιστοποιημένων, και γηγενών στην εκάστοτε χώρα διέλευσης, μεταφορικών εταιρειών ή οδηγών. [14]



*Εικόνα 15 : Συσκευή Μεταφοράς Ραδιενεργών Πηγών Ακτινοβολίας Βήτα και Γάμμα*

## **Κεφάλαιο 3 : Υπολογιστική Όραση**

### *3.1 Εισαγωγή*

Η ακοή, η γεύση, η όσφρηση, η αφή και η όραση αποτελούν τις πέντε κύριες αισθήσεις των ανθρώπων. Η όραση είναι η πιο σημαντική, διότι παρέχει πληθώρα πληροφοριών για τον άμεσο περίγυρο και τον τρόπο λειτουργίας του. Το αισθητήριο όργανο είναι το μάτι και το μέσο της αντίληψης είναι το φως. Υπολογίζεται ότι περίπου το 1/3 των συνολικών ενεργειακών πόρων του εγκεφάλου, διοχετεύονται στην ανάλυση και στην επεξεργασία των οπτικών σημάτων, τα οποία δέχεται. Το φως παρέχει την δυνατότητα στα μάτια να φέρνουν εις πέρας διεργασίες είτε μικρής πολυπλοκότητας, όπως η αναγνώριση των χρωμάτων και των αντικειμένων, είτε μεγάλης πολυπλοκότητας, όπως είναι ο υπολογισμός των αποστάσεων και η αντίληψη των κινήσεων. Τα τρία βασικά χρώματα, τα οποία καταλαβαίνει το μάτι, είναι το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. Η σύνθεση αυτών των χρωμάτων, οδηγείται στους υποδοχείς φωτός του ματιού, τους πυροδοτεί και έπειτα, σχηματίζεται το οπτικό ερέθισμα, το οποίο καταλήγει στον εγκέφαλο για επεξεργασία.[17], [18]

Το 1921, ο Αμερικανός διαφημιστής Fred R. Barnard προσπάθησε να προωθήσει την εκμετάλλευση των διαφημιστικών πάνελ, τα οποία βρίσκονταν πάνω στα τραμ. Στην προσπάθειά του να πουλήσει την ιδέα του, χρησιμοποίησε τη φράση «Μία εικόνα, χίλιες λέξεις». Έκτοτε, οι εικόνες ανελίχθηκαν στο κύριο μέσο μετάδοσης πληροφοριών των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης. Αρχικά, η τηλεόραση κυριάρχησε στον τομέα, προσφέροντας στο κοινό όχι μόνο ενημέρωση και διαφήμιση, αλλά ψυχαγωγία και διασκέδαση. Έπειτα, με την εξέλιξη του διαδικτύου και της τεχνολογίας, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές ανέλαβαν τα ηνία, χωρίς ωστόσο να αλλάξουν το μέσο της μετάδοσης των πληροφοριών. Έτσι, οι εικόνες κατέλαβαν όλο το φάσμα της ενημέρωσης και ο ρυθμός παραγωγής και αξιοποίησης τους αυξήθηκε ραγδαία.[19], [20]

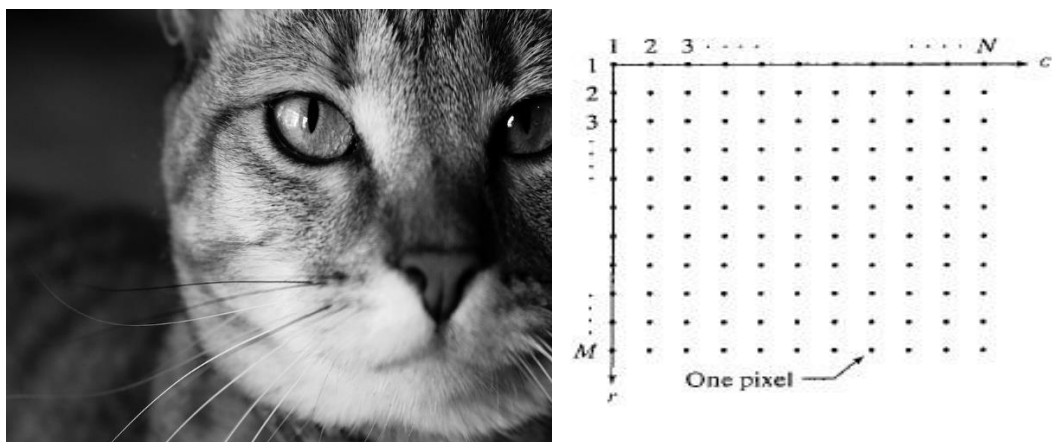
### 3.1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Στην αρχή, οι υπολογιστές απεικόνιζαν τις εικόνες με αναλογική μορφή. Η συγκεκριμένη μορφή αποτυπώνει την πληροφορία με «άπειρη» ακρίβεια και εξαιτίας, των υπέρογκων απαιτούμενων υπολογισμών, προκύπτει η αδυναμία επεξεργασίας τους. Από τις αρχές του '90, η επιστημονική κοινότητα εφάρμοσε στους υπολογιστές μία νέα μορφή ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων. Η ψηφιακή μορφή κατάφερε σύντομα να εκτοπίσει την αναλογική από τον τομέα των επικοινωνιών. Το ψηφιακό σήμα είναι σήμα διακριτού χρόνου και δύναται να πάρει συγκεκριμένες (διακριτές) τιμές στον άξονα του χρόνου. Η διαδικασία κατασκευής ψηφιακού σήματος από αναλογικό ονομάζεται ψηφιοποίηση και αποτελεί ουσιαστικά μία δειγματοληψία. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η μείωση του όγκου της πληροφορίας σε ένα επίπεδο διαχειρίσιμο από τους εκάστοτε υπολογιστικούς πόρους. Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των δικτύων διευκολύνει ολοένα και περισσότερο την μεταφορά και την διάδοση οπτικών πληροφοριών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα «smartphone», καθώς πλέον είναι καθημερινό φαινόμενο η αποστολή, η λήψη και η επεξεργασία εικόνων. Επίσης, τα «live» βίντεο, όντας αλληλουχία εικόνων, είναι μεγάλος όγκος δεδομένων και χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας. Συνεπώς, αντιλαμβάνεται κανείς ότι έχει διογκωθεί η ποσότητα της πληροφορίας, η οποία προορίζεται για αποθήκευση και για επεξεργασία.[21]–[23]

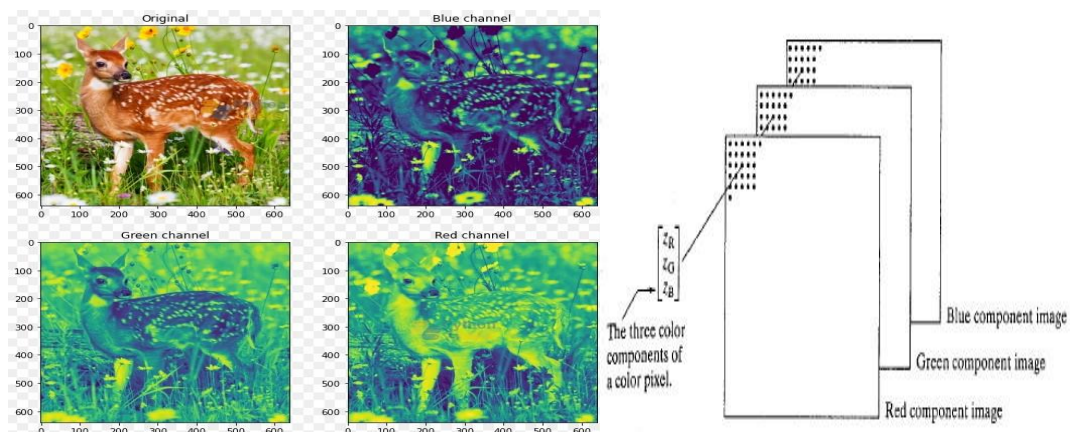
### 3.1.2 Απεικόνιση Εικόνων στον Υπολογιστή

Οι ψηφιακές εικόνες αναπαρίστανται στον υπολογιστή σαν πίνακες - συναρτήσεις τιμών πεπερασμένων διαστάσεων  $M$ ,  $N$  και καθορισμένου αριθμού εικονοστοιχείων. Οι διαστάσεις  $M$ ,  $N$  αποτυπώνονται στον υπολογιστή ως γραμμές και στήλες του πίνακα, αντίστοιχα. Διακρίνονται σε δύο είδη, τις «grayscale» και τις «RGB». Οι «grayscale» εικόνες ορίζονται ως δισδιάστατες συναρτήσεις και έχουν την μορφή  $f(x,y)$ , όπου  $x$  και  $y$  είναι οι συντεταγμένες του χώρου. Τα πεπερασμένα στοιχεία τους ονομάζονται pixels και το καθένα χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό ζευγάρι συντεταγμένων  $x$ ,  $y$ . Η τιμή της συνάρτησης  $f$ , για κάθε pixel, αντικατοπτρίζει την

φωτεινότητα του. Οι «RGB» εικόνες είναι τρισδιάστατοι πίνακες διαστάσεων  $M \times N \times 3$ . Η τρίτη διάσταση έχει τον αριθμό 3, καθώς αποτελεί τα τρία κανάλια χρωμάτων, το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε, τα οποία αναγνωρίζει και ο ανθρώπινος οφθαλμός. Κάθε «RGB» εικόνα, μπορεί να θεωρηθεί σαν μία στοίβα τριών «grayscale» εικόνων, με την διαφορά ότι, κάθε «grayscale» φωτίζεται μόνο με το χρώμα, το οποίο της αντιστοιχεί. Έτσι, κάθε κανάλι αποτελείται μόνο από κόκκινα ή μόνο από πράσινα ή μόνο από μπλε pixel.[23], [24]



Εικόνα 16 : Παράδειγμα Grayscale Εικόνας και η Διάταξή της σε Ψηφιακή Μορφή



Εικόνα 17 : Παράδειγμα RGB Εικόνας και η Διάταξή της σε Ψηφιακή Μορφή

### 3.2 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας

Αφορμώμενοι από τον μεγάλο όγκο πληροφοριών, οι επιστήμονες της πληροφορικής εφηύραν ένα καινούριο τομέα για την επιστήμη, ο οποίος ονομάζεται ψηφιακή ανάλυση και επεξεργασία εικόνων (Digital Image Processing). Ο κλάδος ασχολείται με την ψηφιακή επεξεργασία εικόνων, χρησιμοποιώντας ψηφιακά μέσα, όπως είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Η επεξεργασία πραγματοποιείται με πίνακες – φίλτρα, οι οποίοι είναι πολύ μικρότερων διαστάσεων από αυτές των ψηφιακών εικόνων. Συγκεκριμένα, η διαδικασία ξεκινάει με την λήψη και την αποτύπωση μιας ψηφιακής εικόνας και ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου. Η εφαρμογή του φίλτρου στην εικόνα συνεπάγεται ορισμένους υπολογισμούς, όπως για παράδειγμα η συνέλιξη, από τους οποίους προκύπτει μία νέα ψηφιακή εικόνα. Οι τιμές των pixels της νέας εικόνας, όντας φιλτραρισμένες, έχουν διαφορετικές τιμές από αυτές των αρχικών. Σαν αποτέλεσμα, στην έξοδο του συστήματος φαίνεται μία νέα, διαφορετική από την αρχική, «φιλτραρισμένη» ψηφιακή εικόνα.[24]

Οι βασικές δυνατότητες την ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων είναι :

- Η βελτίωση της ποιότητας
- Το φιλτράρισμα του θορύβου
- Η συμπίεση του όγκου της πληροφορίας
- Οι γεωμετρικές μετατροπές
- Οι χρωματικές μετατροπές
- Η κατάτμηση

Η ποιότητα μιας φωτογραφίας επηρεάζεται από το ποσό του φωτός, το οποίο προσλαμβάνει ο φακός, από το κούνημα της φωτογραφικής μηχανής κατά την διάρκεια της λήψης και από τον θόρυβο, ο οποίος βρίσκεται γενικά στο υπόβαθρο. Τα φίλτρα αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων ονομάζονται φίλτρα εξομάλυνσης του θορύβου, τα οποία εξισορροπώντας το ιστόγραμμα της εικόνας, οδηγούν σε επιθυμητά και βελτιωμένα αποτελέσματα, όσον αφορά την ποιότητα και τον θόρυβο. Η αποθήκευση και η μετάδοση των φωτογραφιών προϋποθέτει την μείωση του μεγέθους τους. Το 1972, ο Nasir Ahmed, ανέπτυξε την μέθοδο συμπίεσης JPEG, η οποία

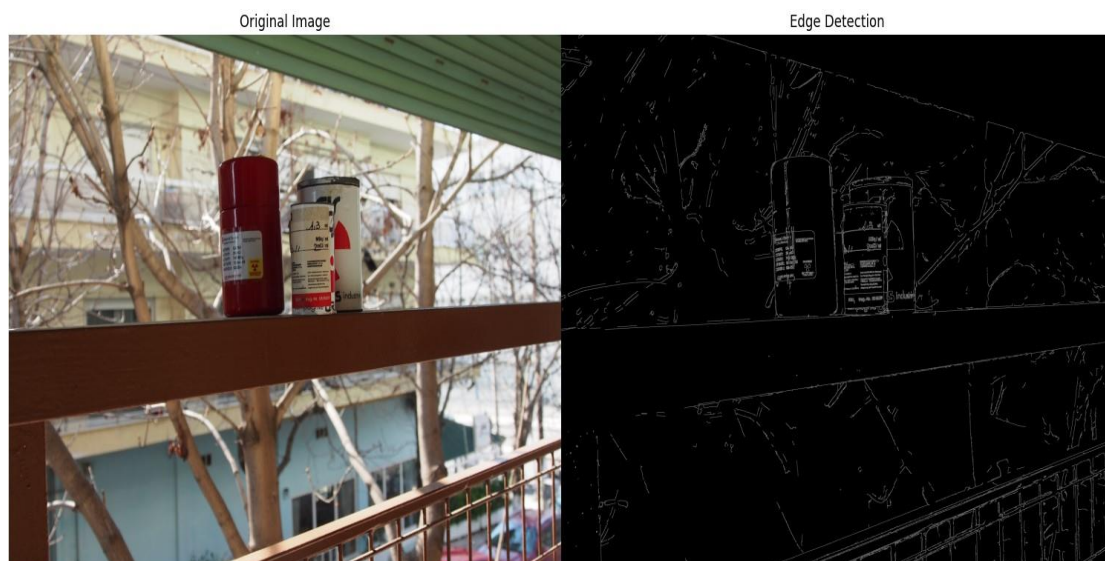
κατάφερε να μειώσει δραστικά το μέγεθος των εικόνων και να εμφανίζεται ως η κύρια μορφή εικόνων στο διαδίκτυο. Οι βασικές γεωμετρικές αλλαγές είναι η σμίκρυνση, η μεγέθυνση, η περιστροφή σε συγκεκριμένο αριθμό μοιρών, η παραμόρφωση και η αλλαγή προοπτικής. Οι χρωματικές μετατροπές περιλαμβάνουν την αλλαγή του χρωματικού προτύπου, όπως είναι το RGB, η αλλαγή φωτεινότητας, η ενίσχυση της αντίθεσης και η εναλλαγή των χρωμάτων. Τέλος, η κατάτμηση είναι ο «χωρισμός» της εικόνας με περιοχές μεγάλου και μικρού ενδιαφέροντος. Συνήθως, εφαρμόζεται στην μελέτη συγκεκριμένων σημείων της φωτογραφίας και γενικότερα αποτελεί μεμονωμένο βήμα μίας ευρύτερης διαδικασίας ανάλυσης και αναγνώρισης εικόνων. [25]–[27]

Η ψηφιακή ανάλυση και επεξεργασία εικόνας προσπαθεί να αντιγράψει την λειτουργία της ανθρώπινης όρασης. Ωστόσο, η ανθρώπινη όραση είναι ένα πολύπλοκο νευροφυσιολογικό σύστημα και εκτελεί διεργασίες άγνωστες, ακόμα και σήμερα, για τους επιστήμονες της Βιολογίας. Τα ανεπτυγμένα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται από υπολογιστές για την προσομοίωση των ανθρώπινων οπτικών συμπεριφορών, είναι περιορισμένων δυνατοτήτων. Έχουν καλή απόδοση σε εφαρμογές, όπου το περιβάλλον είναι απλό και εύκολο, όπως είναι το εργοστασιακό περιβάλλον παραγωγής συγκεκριμένων προϊόντων, ενώ δυσκολεύονται σε περιπτώσεις, όπου το περιβάλλον εμπεριέχει πολλή πληροφορία, όπως είναι οι ιατρικές εφαρμογές σε κύτταρα και ιστούς. Η επίτευξη ενός γενικού, ολοκληρωμένου συστήματος είναι ακόμα τεχνολογικά και χρονικά μακριά και συνεπώς, η σημερινή αιχμή του δόρατος του κλάδου αρκείται μόνο σε εξειδικευμένες εφαρμογές. [23]

### *3.3 Υπολογιστική Όραση*

Η τεχνητή υπολογιστική όραση (computer vision) πραγματεύεται το θέμα της κατανόησης του πραγματικού οπτικού κόσμου από τους υπολογιστές και χρησιμοποιεί εικόνες και βίντεο για την εκπαίδευσή τους. Αποτελεί κλάδο της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και αξιοποιεί τις μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και της μηχανικής μάθησης (machine learning). Η αρχή της έλαβε χώρα την δεκαετία του '60. Κάποιοι

επιστήμονες προσπάθησαν να αναπτύξουν αλγορίθμους και τρόπους για τις μηχανές, ώστε να αναγνωρίζουν το περιβάλλον τους. Τα πειράματα ξεκίνησαν σε γάτες, στις οποίες οι επιστήμονες πρόβαλλαν ορισμένο αριθμό φωτογραφιών και προσπάθησαν να συσχετίσουν τις αντιδράσεις, οι οποίες συνέβαιναν στους εγκεφάλους τους. Τότε, αντιλήφθηκαν ότι οι γάτες αντιδρούσαν πρώτα σε πιο απλά και μεγάλα πράγματα, όπως ευθείες γραμμές και ξεκάθαρα σχήματα, και έπειτα σε λεπτομέρειες, όπως αμφιλεγόμενα σχήματα και θολά σημεία. Λίγο αργότερα, επιτεύχθηκε η πρώτη σάρωση εικόνων από τους υπολογιστές και η παραγωγή ψηφιακών αντιγράφων. Το 1982, ο νευροεπιστήμονας David Marr, εδραίωσε και τεκμηρίωσε επιστημονικά την ήδη υπάρχουσα αντίληψη ότι, η όραση λειτουργεί ιεραρχικά και ανέπτυξε αλγορίθμους για αναγνώριση άκρων (edge detection). Από το 2000, οι έρευνες επικεντρώθηκαν στην αναγνώριση αντικείμενων (object detection), ενώ το 2001 παρουσιάστηκε η πρώτη εφαρμογή ζωντανής αναγνώρισης προσώπου (real-time face recognition). Οι βασικότεροι παράγοντες οι οποίοι οδήγησαν την τελευταία εικοσαετία στην ραγδαία εξέλιξη του computer vision είναι η τεχνολογία των smartphone, η οποία κατακλύζει το διαδίκτυο με φωτογραφίες και βίντεο, η πτώση των τιμών για υπολογιστικούς πόρους, η μεγάλη ανάπτυξη του hardware, όπως είναι οι κάρτες GPU (graphics processing unit) και τέλος, η ανάπτυξη αλγορίθμων, όπως η συνέλιξη (convolution), η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην επεξεργασία εικόνων.[28]–[31]



*Εικόνα 18 : Edge Detection σε μια Εικόνα με Τρία Δοχεία Ραδιενεργού Πηγής*



### 3.3.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Το computer vision χρησιμοποιεί τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural network), για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τις εικόνες. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ή αλλιώς εν συντομία νευρωνικά δίκτυα, προσπαθούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα και τις πληροφορίες, αξιοποιώντας τις μεθόδους λειτουργίας των ανθρώπινων νευρικών συστημάτων, όπως είναι ο εγκέφαλος. Απαρτίζονται από μερικές δεκάδες έως αρκετά εκατομμύρια νευρώνες – κόμβους, οι οποίοι συνδέονται και συνεργάζονται προκειμένου να λύσουν περίπλοκα προβλήματα. Ένας απλός τεχνητός νευρώνας χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση ενεργοποίησης και δύναται να έχει πολλές εισόδους, αλλά μόνο μία έξοδο. Αν η τιμή της εισόδου δύναται να φέρει την συνάρτηση ενεργοποίησης μέσα σε ένα επιθυμητό εύρος τιμών, τότε ο νευρώνας ενεργοποιείται και προκύπτει η έξοδος, η οποία με την σειρά της αποτελεί είσοδο για τον επόμενο νευρώνα. Η εκπαίδευση τους μοιάζει με αυτή του ανθρώπινου εγκεφάλου και περιλαμβάνει αναδιατάξεις στην ισχύ των συνδέσεων. Οι τεχνητοί νευρώνες υστερούν έναντι των βιολογικών στο γεγονός ότι, προορίζονται μόνο για συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως είναι η εξαγωγή των τιμών κάποιας πρόβλεψης ή η κατηγοριοποίηση των εικόνων. Οι βιολογικοί νευρώνες έχουν την ικανότητα να επιτελούν πολύπλοκες και ασύνδετες διεργασίες, καθώς μπορούν να εκπαιδεύονται συνεχώς και πολλές φορές με πληροφορίες, οι οποίες μοιάζουν εξαρχής άσχετες με τον τελικό στόχο της εκπαίδευσης.[32]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα τους, συγκριτικά με τους συμβατικούς αλγόριθμους, είναι η δυνατότητα την οποία έχουν, να καταλαβαίνουν σύνθετες και συγκεχυμένες πληροφορίες. Συγκεκριμένα, διακρίνονται από την προσαρμοσμένη εκμάθηση, την αυτοοργάνωση, την λειτουργία πραγματικού χρόνου και την ανοχή σε σφάλματα. Η προσαρμοσμένη εκμάθηση είναι η ικανότητα τους να μαθαίνουν τον τρόπο να κάνουν κάτι, βασιζόμενα στα δεδομένα τα οποία έλαβαν. Η αυτοοργάνωση είναι δημιουργία αυτοτελούς οργάνωσης και αναπαράστασης των εισαγόμενων πληροφοριών. Η λειτουργία πραγματικού χρόνου χαρακτηρίζει την παραλληλοποίηση των εκτελούμενων διεργασιών, με σκοπό την ταχύτητα σε επίλυση πολύπλοκων ζητημάτων. Τέλος, η ανοχή σε σφάλματα είναι η διατήρηση του τρόπου λειτουργίας

και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, με συνεπαγόμενη μικρή μείωση στην απόδοση, ακόμα και μετά από κατάρρευση ενός μέρους του.[32]

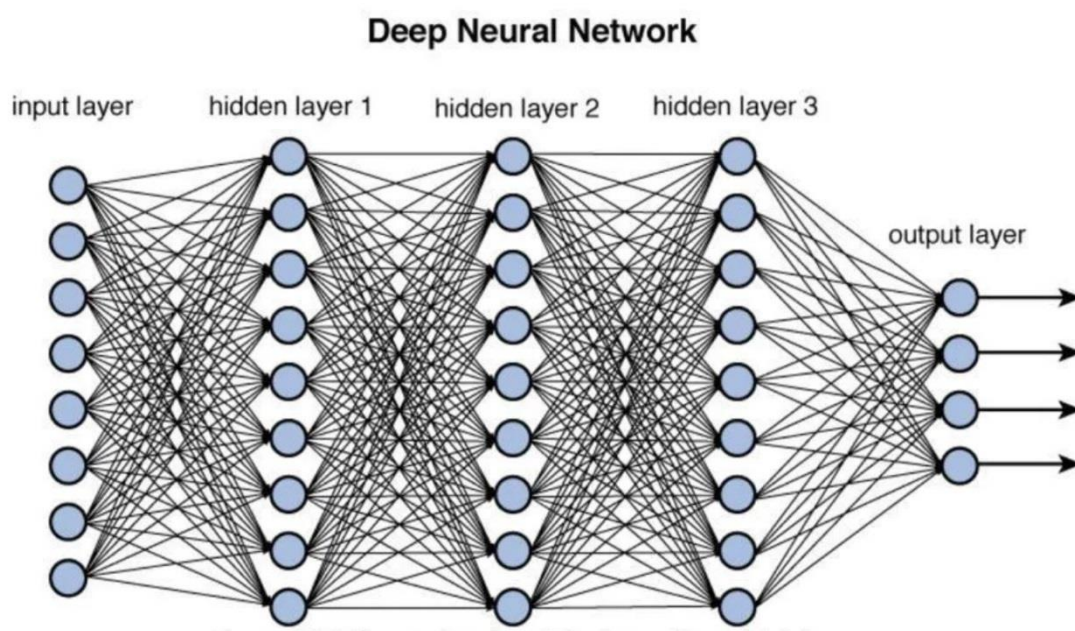
### *3.4 Βαθιά και Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα*

Τα απλά νευρωνικά δίκτυα αποδείχθηκαν απολύτως επιτυχημένα και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε ποικίλες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, ο μεγάλος όγκος δεδομένων εισόδου, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα των υπολογισμών και απαιτώντας μεγάλο αριθμό νευρώνων, στάθηκε εμπόδιο στην εξέλιξη και στην καθολική εφαρμογή τους. Συγκεκριμένα, η αξιοποίηση τους σε εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature extraction) από εικόνες και στην κατηγοριοποίηση τους δεν προτιμάται διότι, είναι μη επιτεύξιμο τεχνολογικά και μη βιώσιμο οικονομικά. Για αυτό τον λόγο, η επιστημονική κοινότητα εφηύρε τα βαθιά και τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα. [32]

#### *3.4.1 Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα*

Τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα (deep neural network) είναι υποσύνολο των νευρωνικών δικτύων και της μηχανικής μάθησης. Ο όρος «βαθιά» χρησιμοποιείται επειδή το δίκτυο αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα νευρώνων – κόμβων. Το πρώτο επίπεδο λαμβάνει στους νευρώνες του, την είσοδο του δικτύου. Στην συνέχεια, ακολουθούν τα «κρυμμένα» επίπεδα νευρώνων και το κάθε ένα αποτελείται από διαφορετικό αριθμό νευρώνων. Ως τελευταίο κομμάτι του δικτύου υπάρχει το επίπεδο εξόδου, το οποίο λαμβάνει σαν είσοδο την έξοδο των «κρυμμένων» επιπέδων και την τροφοδοτεί σε κατάλληλα επιλεγμένες λογιστικές συναρτήσεις ενεργοποίησης προκειμένου να ληφθεί η αναμενόμενη πιθανότητα ή απόφαση. Η συμπεριφορά τους είναι ανάλογη των γάτων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα πειράματα για το computer vision, καθώς, όσο πιο βαθιά οδεύουν οι υπολογισμοί στο νευρωνικό, τόσο πιο υψηλού επιπέδου και λεπτομέρειας είναι οι εξαγόμενες πληροφορίες. Για παράδειγμα, στην αναγνώριση εικόνων, τα πρώτα επίπεδα διακρίνουν πληροφορίες οι οποίες προκύπτουν από μεγάλα και ευδιάκριτα σχήματα στην εικόνα, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα, μπορούν και

αναγνωρίζουν «κρυμμένες» πληροφορίες, όπως αυτές των χρωμάτων, των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών ενός προσώπου. Οι κύριες εφαρμογές τους συναντώνται στην αυτόματη αναγνώριση φωνής (automatic speech recognition), στην επεξεργασία φυσικής γλώσσας -από διάφορες εταιρείες πληροφορικής(natural language processing)-, στην ψηφιακή οπτική τέχνη (visual art processing), στην αναγνώριση απαγορευμένων ουσιών(drug discovery and toxicology) -από αεροπορικές εταιρείες-, στην ιατρική και την υγεία μέσω αναγνώρισης προτύπων από ακτινογραφίες ή από το μικροσκόπιο (medicine), στην βελτίωση της ποιότητας θολών εικόνων από την αστυνομία για την εξακρίβωση στοιχείων των υπόπτων(image restoration) και σε ένα ευρύ φάσμα στρατιωτικών αποστολών, όπως η παρακολούθηση με ρομπότ (military). [33], [34]

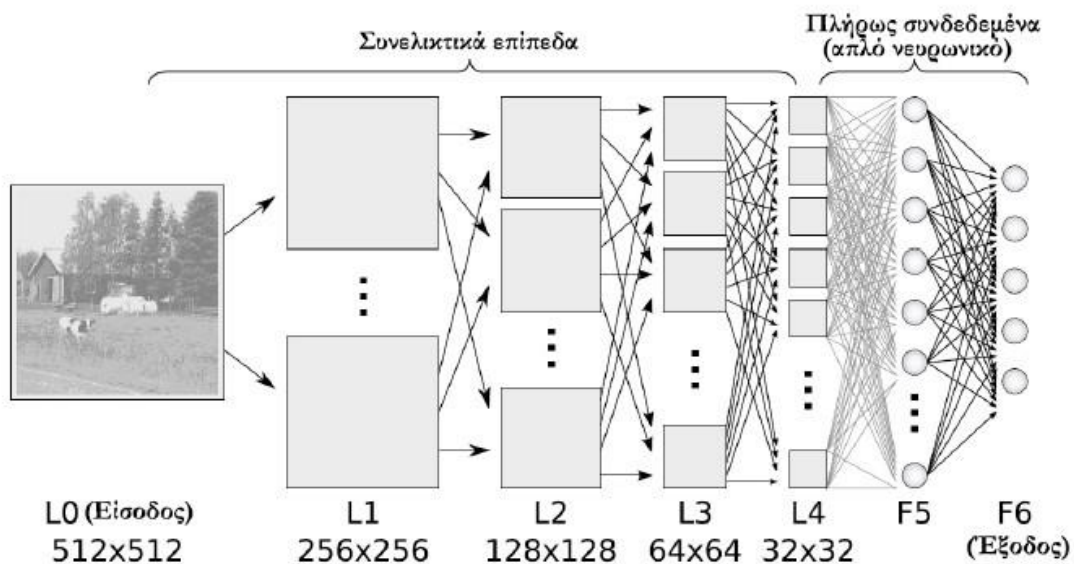


*Εικόνα 19 : Deep Neural Network*

### 3.4.2 Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (convolutional neural network, CNN) είναι ένα είδος αρχιτεκτονικής νευρωνικού δικτύου. Η αρχική έμπνευση τους προέκυψε από τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών οπτικών διεργασιών και χρησιμοποιείται κυρίως για

επεξεργασία διδιάστατων πινάκων. Επίσης, συναντάται ευρέως στην επεξεργασία εικόνων και σε τομείς του computer vision, όπως είναι η αναγνώριση (image recognition), η κατηγοριοποίηση (image classification) και η κατάτμηση εικόνων (image segmentation), η ανάλυση ιατρικών φωτογραφιών μικροσκοπίου (medical image analysis) και η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (natural language processing). Τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι η ικανότητα τους να χειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων, χωρίς να υστερούν σε ακρίβεια αποτελεσμάτων, η ανθεκτικότητα τους σε αλλαγές της οπτικής των δεδομένων, όπως για παράδειγμα, είναι η σμίκρυνση και η περιστροφή φωτογραφιών, η δυνατότητα τους να αναγνωρίζουν σημαντικά χαρακτηριστικά μέσα σε εικόνες και βίντεο και τέλος, η απουσία ανάγκης επέμβασης στο δίκτυο, καθώς μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα. Από την άλλη πλευρά, μειονεκτούν στο γεγονός ότι, χρειάζονται πολλά επεξεργασμένα δεδομένα για να εκπαιδευτούν, είναι υπολογιστικά κοστοβόρα, καθώς δεσμεύουν αρκετή μνήμη επεξεργασίας, είναι επιρρεπή στην υπερπροσαρμογή (overfitting), η οποία ερμηνεύεται ως η ανικανότητα να γενικεύουν τα συμπεράσματα τους στις μελλοντικές άγνωστες προβλέψεις και τέλος, η πλήρης άγνοια των διαδικασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τους υπολογισμούς του δικτύου, αφού είναι αδύνατο να αντιληφθεί κανείς τί ακριβώς συμβαίνει και τί «έμαθε» το δίκτυο. [35][36]

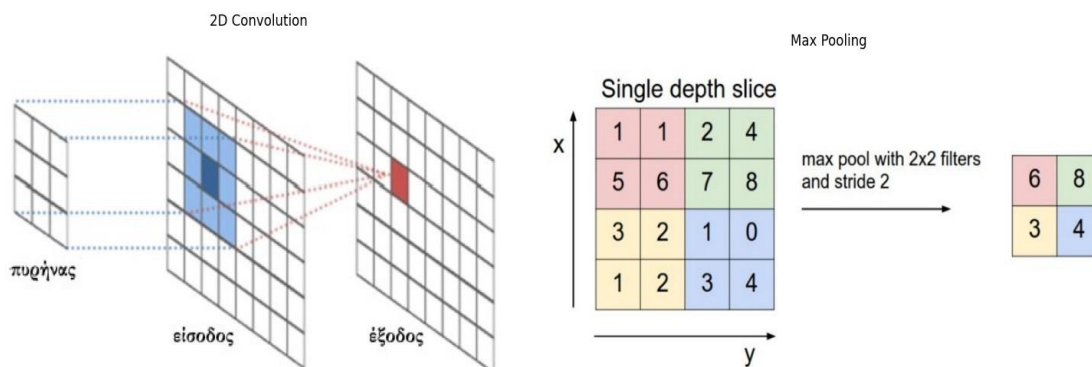


Εικόνα 20 : Δομή CNN

Όπως κάθε νευρωνικό δίκτυο, έτσι και τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από το επίπεδο εισόδου (input layer), τα ενδιάμεσα – «κρυφά» επίπεδα (hidden layer) και το επίπεδο εξόδου (output layer). Συνήθως, απαρτίζονται από δύο μέρη, ένα συνελκτικό, το οποίο πραγματοποιεί υπολογισμούς πάνω στις εικόνες και εξάγει τα χαρακτηριστικά τους, και ένα απλό, πλήρως συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο, το οποίο λαμβάνει τα pixel της εξόδου του συνελκτικού μέρους και παρουσιάζει ως έξοδο την απόφαση – πρόβλεψη του δικτύου.

Η είσοδος του δικτύου, για παράδειγμα ενός δικτύου επεξεργασίας RGB εικόνων, έχει μέγεθος (αριθμός εικόνων) x (γραμμές) x (στήλες) x (κανάλια), όπου στην προκειμένη περίπτωση τα κανάλια είναι 3. Στη συνέχεια, θεωρώντας ότι ο κάθε νευρώνας εισόδου λαμβάνει την τιμή ενός pixel της εικόνας, η σύνδεσή του με τους νευρώνες του επόμενου -του πρώτου «κρυφού» επιπέδου- πραγματοποιείται μέσω της διδιάστατης συνέλιξης. Η συνέλιξη συμβαίνει ανάμεσα σε pixel και διδιάστατα φίλτρα – πυρήνες και η τιμή η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό συνεχίζει ως είσοδος στο επόμενο επίπεδο του δικτύου. Οι ερευνητές απέδειξαν ότι, η πλήρης σύνδεση των νευρώνων στο συνελκτικό μέρος των δικτύων αυξάνει υπέρογκα τους υπολογισμούς και επιβραδύνει την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα, ακολουθώντας τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών συστημάτων όρασης, δεν είναι πλήρως συνδεδεμένα και οι νευρώνες επηρεάζονται μόνο από συγκεκριμένο αριθμό εξόδων του προηγούμενου επιπέδου.

Έπειτα από κάθε συνελκτικό επίπεδο, εντοπίζεται το επίπεδο υποδειγματοληψίας (max pooling). Το max pooling χωρίζει την εικόνα σε υποπεριοχές τετραγώνων, συνήθως μεγέθους 2x2 pixel και παρουσιάζει ως έξοδο τής κάθε υποπεριοχής το pixel με την μεγαλύτερη τιμή. Η υποδειγματοληψία, μετά την συνέλιξη, συνεισφέρει στην γρήγορη σύγκλιση των υπολογισμών. Μέσω της ελάττωσης του αριθμού των πράξεων, μειώνει το μέγεθος της εικόνας και βοηθάει στην αποφυγή του overfitting. Η κύρια συνάρτηση ενεργοποίησης των εσωτερικών «κρυμμένων» επιπέδων των δικτύων είναι η συνάρτηση  $f(x)=\max(0,x)$  και ονομάζεται ReLU (rectified linear unit). Η αποτελεσματικότητα της έγκειται στην εξάλειψη των μη γραμμικών στοιχείων λόγω εισαγωγής πιθανοτήτων και στον μηδενισμό των αρνητικών τιμών των εξόδων. Ένα γραφικό παράδειγμα της διαδικασίας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 21 : Διδιάστατη Συνέλιξη, Υποδειγματοληψία (Max Pooling)

Τέλος, μετά από τους συνδυασμούς συνέλιξεων και υποδειγματοληψιών, χρησιμοποιούνται πλήρως συνδεδεμένα νευρωνικά δίκτυα. Η είσοδος τους είναι ο πίνακας χαρακτηριστικών (feature map) ο οποίος προκύπτει από τα προηγούμενα στάδια και η έξοδος τους οδηγείται στο επίπεδο εξόδου. Ο αριθμός των νευρώνων του εξωτερικού επιπέδου διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή, για παράδειγμα αν εκτελείται κατηγοριοποίηση εικόνων (multiclass image classification), ο αριθμός των νευρώνων ισούται με τον αριθμό των κλάσεων της κατηγοριοποίησης, ενώ αν η εφαρμογή είναι η κατάτμηση φωτογραφιών (image segmentation) οι νευρώνες εξόδου είναι όσοι και τα pixel της εικόνας εξόδου. [32], [35]

### 3.5 Σύγχρονα Μοντέλα

Αρχικά, τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα αξιοποιήθηκαν κυρίως στην αναγνώριση συμβόλων και χειρόγραφων γραμμάτων και αριθμών, ενώ τα τελευταία 15 χρόνια αποτελούν την πλέον εφαρμοζόμενη μέθοδο κατάτμησης, κατηγοριοποίησης και αναγνώρισης αντικειμένων σε εικόνες. Η ραγδαία εξέλιξη τους συνέβη μετά το 2007, καθώς κατάφεραν να αξιοποιήσουν πλήρως τις ικανότητες των γραφικών καρτών. Η ευρεία χρήση των GPU επιτάχυνε την εκπαίδευση των δικτύων και συγκεκριμένα η παράλληλη εφαρμογή πληροφοριών εκμηδένισε τον χρόνο επεξεργασίας, επιβάλλοντας ελάχιστες απώλειες στο δίκτυο. Η καθολική αναγνώριση των

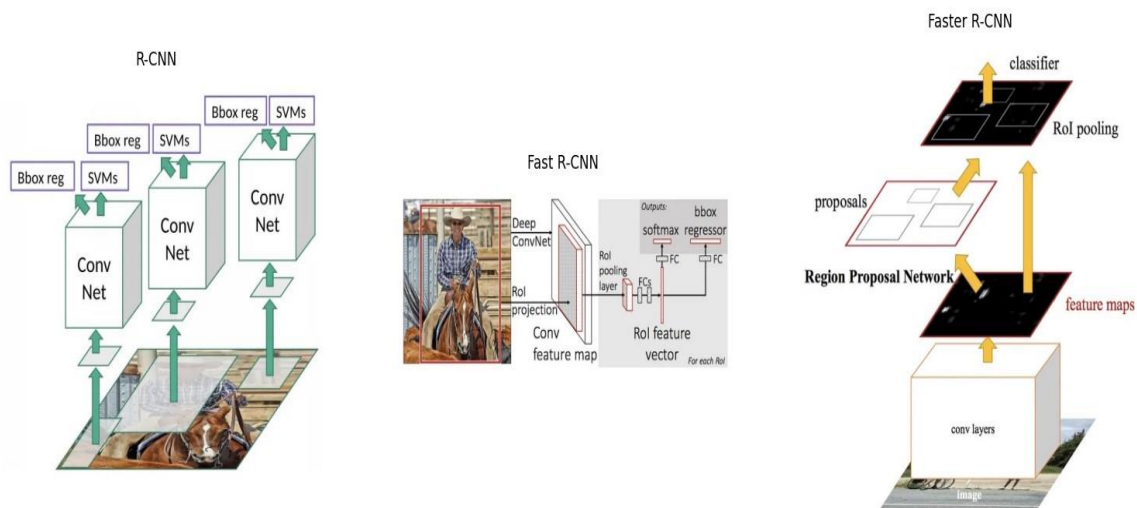
δυνατοτήτων τους ήρθε μέσα από τους διαγωνισμούς του Kaggle και του ImageNet, οι οποίοι ασχολούνται με το computer vision. Η πρώτη αξιοσημείωτη επιτυχία έλαβε χώρα το 2012, όταν ένα CNN νίκησε σε διαγωνισμό multiclass image classification με 1000 κλάσεις, πετυχαίνοντας ποσοστό ακρίβειας 65%. Τον επόμενο χρόνο υπήρξε βελτίωση του ποσοστού ακρίβειας και από τότε τα δίκτυα συνεχώς ενισχύονται και αναβαθμίζονται. [32]

### 3.5.1 R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN

Τα βασισμένα σε περιοχές ενδιαφέροντος συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (region based convolutional neural networks, R-CNN) εμφανίστηκαν το 2013 και είναι μοντέλα μηχανικής μάθησης, τα οποία αξιοποιούνται εκτενώς στην αναγνώριση αντικειμένων και στην υπολογιστική όραση. Τα R-CNN λαμβάνουν στην είσοδό τους μία εικόνα και χρησιμοποιούν την μέθοδο της επιλεκτικής αναζήτησης (selective search), προκειμένου να δημιουργηθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος (region of interest, RoI). Οι RoI είναι υποπεριοχές της εικόνας μέσα στις οποίες το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει κάποιο αντικείμενο προς αναγνώριση και χαρακτηρίζονται από το τετράγωνο κουτί διαχωρισμού τους (bounding box). Για κάθε εικόνα το μοντέλο παράγει περίπου 2000 RoI, οι οποίες στην συνέχεια τροφοδοτούνται στο συνελκτικό μέρος του δικτύου για επεξεργασία. Ο διανυσματικός αλγόριθμος (support vector machine, SVM) αποτελεί εργαλείο απόφασης για την κατηγοριοποίηση εικόνων και εφαρμόζεται ευρέως στα R-CNN. Οι επεξεργασμένες πλέον RoI καταλήγουν στον SVM και στον αλγόριθμο παλινδρόμησης, από τους οποίους εξάγονται η πιθανότητα το αντικείμενο να απεικονίζεται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος και τα όρια του bounding box, αντίστοιχα.[37], [38]

Τα R-CNN, λόγω των υπέρογκων υπολογισμών των οποίων απαιτούν και της μεγάλης καθυστέρησής τους να εκπαιδευτούν, κρίθηκαν ανέκτα να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Γι' αυτό τον λόγο, το 2015 οι επιστήμονες βελτίωσαν με τροποποιήσεις το αρχικό μοντέλο και εφηύραν τα Fast R-CNN. Η κύρια διαφορά, η οποία τα καθιστά 10 φορές ταχύτερα από το προκάτοχο τους, είναι ότι, οι εικόνες

περνούν ως είσοδος στο συνελκτικό «κομμάτι» του δικτύου και μετά τις συνελίξεις πραγματοποιείται η επιλεκτική αναζήτηση για τις RoI. Με αυτή τη μέθοδο, επιτυγχάνεται οικονομία στις πράξεις, καθώς πλέον, δεν χρειάζεται να παραχθούν οι περίπου 2000 RoI, για κάθε εικόνα. Έπειτα, οι περιοχές ενδιαφέροντος υφίστανται υποδειγματοληψία, με σκοπό να τροφοδοτηθούν στο απλό πλήρως συνδεδεμένο νευρωνικό και από εκεί στο εξωτερικό επίπεδο απόφασης. Σε αυτά τα μοντέλα, για τον υπολογισμό της πιθανότητας ύπαρξης του αντικειμένου μέσα στην RoI, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ταξινόμησης «softmax», ο οποίος θεωρείται ο αποδοτικότερος για εφαρμογές multiclass image classification.[37], [39]



Εικόνα 22 : R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN

Μολονότι, τα Fast R-CNN, αποτελούσαν τα κύρια μοντέλα για αναγνώριση αντικειμένων, μία ομάδα ερευνητών της Microsoft αντιλήφθηκε ότι, μπορούσε να επιτύχει περαιτέρω βελτίωση και ανέπτυξε τα Faster R-CNN. Ο πρωταρχικός σκοπός των ερευνητών ήταν η απαλλαγή από την επιλεκτική αναζήτηση για RoI, η οποία ήταν το κύριο κοστοβόρο και χρονοβόρο μειονέκτημα των R-CNN και των Fast R-CNN. Κατέληξαν λοιπόν, σε μία νέα μέθοδο για κατάτμηση και εύρεση των περιοχών ενδιαφέροντος της εικόνας, το δίκτυο πρότασης περιοχών (region proposal network, RPN) και κατάφεραν να επιταχύνουν τα δίκτυα και να εξοικονομήσουν πόρους και υπολογιστική μνήμη. Τα Faster R-CNN είναι ουσιαστικά μία επέκταση των Fast R-



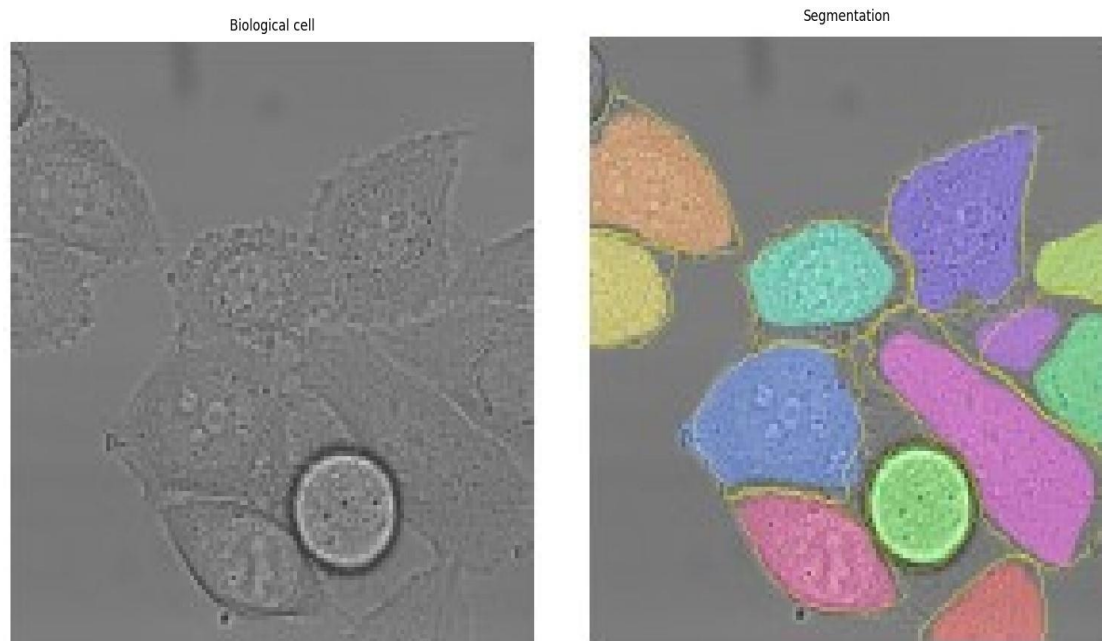
CNN, καθώς παράλληλα με το ήδη υπάρχον δίκτυο, λειτουργεί ένα RPN. Ως είσοδο, δέχονται τα pixel μιας εικόνας και ακολουθεί η συνέλιξη της με αποτέλεσμα, την δημιουργία του feature map. Στην συνέχεια, το feature map αφενός υπόκεινται σε υποδειγματοληψία και ενοποιούνται με τα αποτελέσματα του RPN και αφετέρου τροφοδοτείται στο RPN, για εξαγωγή των RoI. Η λειτουργία διαφέρει μόνο στο ότι, το RPN υποδεικνύει στα feature map τις περιοχές με μεγάλη πιθανότητα ύπαρξης αντικειμένου. Τα δειγματοληπτημένα feature map συνδυάζονται με την έξοδο του RPN και συνεχίζουν την διαδικασία της συνέλιξης μέχρι την τελική κατάληξη στο επίπεδο εξόδου. Τα Faster R-CNN είναι πρωτοποριακά στην λειτουργία τους και αποδεικνύουν ότι, μπορούν να επιλύσουν σύνθετα και πολύπλοκα ζητήματα υπολογιστικής όρασης. [37], [40], [41]

### 3.5.2 YOLO

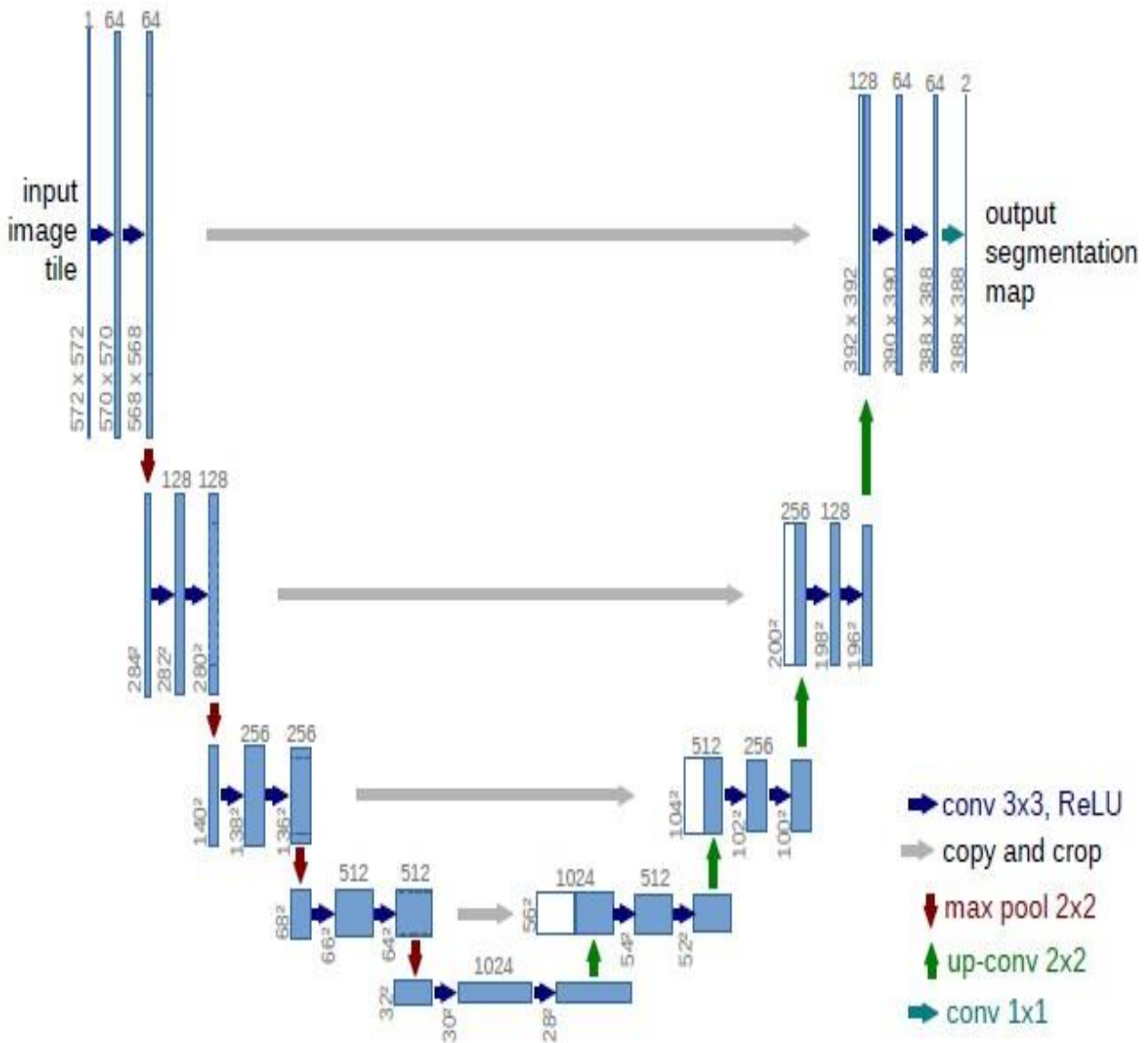
Το μοντέλο YOLO (you only look once) αναπτύχθηκε και δημοσιεύτηκε το 2016 με σκοπό την απλοποίηση των διαδικασιών της αναγνώρισης αντικειμένων και της εκτέλεσης τους σε ένα μεμονωμένο δίκτυο. Η διαφορά του, σχετικά με τα τρία είδη R-CNN, είναι ότι, δεν προσπαθεί να ανιχνεύσει αντικείμενα με βάση κάποιες περιοχές ενδιαφέροντος μέσα στην εικόνα, αλλά, χωρίζει αρχικά ολόκληρη την εικόνα σε πλέγμα τετραγώνων πλαισίων. Αν κάποιο από τα pixel ενός αντικειμένου βρίσκεται μέσα σε ένα πλαίσιο, τότε το εκάστοτε πλαίσιο οφείλει να αναγνωρίσει το αντικείμενο. Κάθε πλαίσιο δημιουργεί στο εσωτερικό του bounding boxes γύρω από τα σημεία στα οποία θεωρεί ότι υπάρχει κάποιο αντικείμενο. Τα bounding boxes χαρακτηρίζονται από 5 στοιχεία, το ποσοστό εμπιστοσύνης (*confidence*) και τα  $x$ ,  $y$ ,  $w$ ,  $h$ . Τα  $x$ ,  $y$  είναι οι συντεταγμένες του κέντρου του bounding box ανηγμένες στα όρια του πλαισίου, το οποίο το περιβάλλει. Τα  $w$ ,  $h$  είναι το πλάτος και το ύψος, αντίστοιχα, του bounding box και υπολογίζονται αναλογικά με τις διαστάσεις της εικόνας. Το ποσοστό εμπιστοσύνης αντιπροσωπεύει το πόσο σίγουρο είναι το μοντέλο, για την εύρεση του αντικειμένου στο συγκεκριμένο bounding box. Το YOLO χρησιμοποιείται ευρέως όχι μόνο για αναγνώριση αντικειμένων, αλλά και για κατάτμηση και κατηγοριοποίηση εικόνων. Το κύριο πλεονέκτημα του έγκειται στην βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης με ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας απόκρισης και επεξεργασίας, γεγονός



ακολουθείται από την συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU και υφίσταται δειγματοληψία με την μέθοδο max pooling, η οποία υποδιπλασιάζει τις διαστάσεις των εικόνων. Μετά από την δειγματοληψία, διπλασιάζεται ο αριθμός των εφαρμοζόμενων φίλτρων συνέλιξης με σκοπό την αύξηση των feature map. Το expansive path περιέχει συνελίξεις, οι οποίες ακολουθούνται από την ReLU. Ωστόσο, μετά τις συνελίξεις, οι διαστάσεις των εικόνων διπλασιάζονται με την μέθοδο “upsampling” και υποδιπλασιάζονται τα φίλτρα συνέλιξης για μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών. Επειδή υπάρχει απώλεια της πληροφορίας στα γειτονικά pixel της κάθε κλάσης κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά και η συνένωση της πληροφορίας από το κάθε επίπεδο του contracting path στο αντίστοιχο του στο expansive path. Το U-Net διακρίνεται για την απόδοση του σε εφαρμογές image segmentation και συγκεκριμένα σε βιολογικές εικόνες ιστού και κυττάρων. Επίσης, η ικανοποιητική λειτουργία του με λίγα δεδομένα εικόνων και η εκτενής εκμετάλλευση της μεθόδου “data augmentation”, για ενίσχυση του πλήθους των δεδομένων με απλές γεωμετρικές μετατροπές, όπως είναι η σμίκρυνση, η μεγέθυνση και η περιστροφή υπό συγκεκριμένες μοίρες, το καθιστούν κυρίαρχο στον τομέα του.[44]



*Εικόνα 24 : Παράδειγμα Segmentation*



Εικόνα 25 : U-Net, Αρχιτεκτονική

## Κεφάλαιο 4 : Πειραματικό Μέρος

### *4.1 Εισαγωγή*

Το θεωρητικό υπόβαθρο της πυρηνικής τεχνολογίας αναλύθηκε παραπάνω για να καταστούν κατανοητά τα υπάρχοντα πλαίσια πυρηνικής ασφάλειας (security), η δομή και οι προδιαγραφές των ραδιενεργών πηγών. Η σύνδεση της θεωρίας με το πειραματικό μέρος της εργασίας έγκειται στην πρότερη απαραίτητη κατανόηση της θεωρίας της πυρηνικής ασφάλειας (security) με σκοπό την ύστερη ανάπτυξη αλγορίθμου τεχνητής νοημοσύνης για τον εντοπισμό ραδιενεργών πηγών, αντικείμενα τα οποία είναι επιρρεπή σε κλοπές και κακόβουλες μεταφορές ή/και τοποθετήσεις σε δημόσιους χώρους. Στόχος ενός ευρύτερου ερευνητικού πλαισίου, μέρος του οποίου είναι η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η συνεργασία της οπτικής αναγνώρισης ραδιενεργών πηγών μέσα από εικόνες και της ανίχνευσης ιονίζουσας ακτινοβολίας μέσω ανιχνευτών. Η πρώτη προσπάθεια μέσω της παρούσας εργασίας, υλοποιεί την αναγνώριση κυλινδρικών θωρακίσεων – περιεκτών ραδιενεργών πηγών που απεικονίζονται σε περίπου 600 φωτογραφίες.

Για την δημιουργία του μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης, καθώς και για την διαχείριση και την επεξεργασία των εικόνων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση των δοκιμών και της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη κώδικα που υλοποιεί τις κατάλληλες μεθόδους. Λόγω των ευρέων δυνατοτήτων της, της συνεχούς ανανέωσης των επεκτάσεων των βιβλιοθηκών της, από την παγκόσμια κοινότητα προγραμματιστών, και της καταλληλότητάς της για ανάπτυξη μεθόδων μηχανικής μάθησης και εκπαίδευσης αλγορίθμων επιλέχθηκε σαν γλώσσα ανάπτυξης του κώδικα, η Python. Επιπρόσθετα, ο κώδικας του πειράματος εκτελέστηκε στο Google Colab, το περιβάλλον που ανέπτυξε η Google με σκοπό την εύκολη σύνταξη και εκτέλεση αλγορίθμων από το ευρύ κοινό, χρησιμοποιώντας απομακρυσμένα συστοιχίες επεξεργαστών και GPU της εταιρείας.

## 4.2 Πείραμα

Η δημιουργία αλγορίθμου κατάτμησης εικόνων με στόχο της αναγνώριση συγκεκριμένων μοτίβων και αντικειμένων απαιτεί μία διαδικασία συλλογής δεδομένων και προεπεξεργασίας τους, πριν την τροφοδότηση τους στον κώδικα για την εκπαίδευση του μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης. Επίσης, καίρια κρίνεται η επιλογή του μοντέλου της τεχνητής νοημοσύνης, καθώς δεν υπάρχει, ακόμα τουλάχιστον, κάποιο δίκτυο, το οποίο είναι καθολικά εφαρμόσιμο. Με άλλα λόγια, το κάθε μοντέλο διακρίνεται για τα χαρακτηριστικά του και έχει αυξημένη απόδοση σε μία μόνο εφαρμογή ή σε ένα συγκεκριμένο φάσμα εφαρμογών. Για παράδειγμα, μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση και επεξεργασία φυσικής γλώσσας αποτυγχάνουν στην ταξινόμηση φωτογραφιών σε κατηγορίες και στην αναγνώριση αντικειμένων σε εικόνες, και το αντίστροφο.

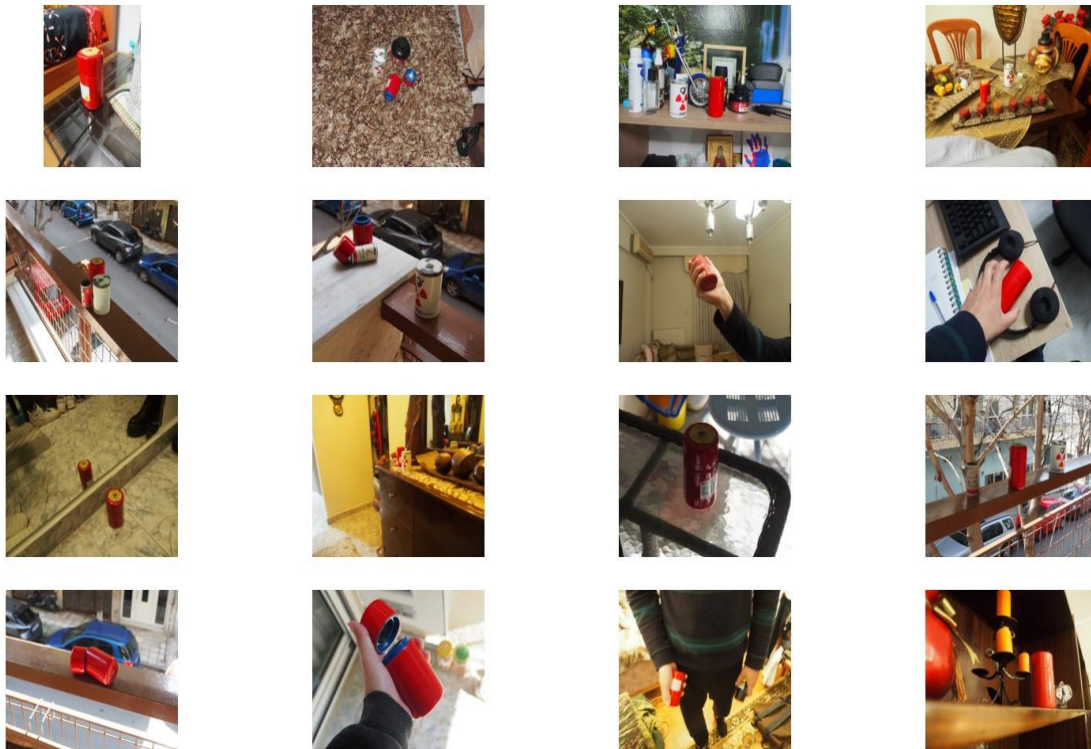
### 4.2.1 1<sup>ο</sup> Στάδιο (δημιουργία Dataset)

Αρχικά, εντοπίζεται το επιθυμητό αντικείμενο προς αναγνώριση και ξεκινάει η διαδικασία συλλογής φωτογραφιών του για την δημιουργία μίας βάσης δεδομένων (dataset) φωτογραφιών. Σημαντικός παράγοντας είναι η διαφοροποίηση του υπόβαθρου (background) των εικόνων για αποδοτικότερη εκπαίδευση του μοντέλου και μετέπειτα αναγνώριση σε περίπλοκα περιβάλλοντα. Εάν δεν πραγματοποιηθεί η διαφοροποίηση και τα background των φωτογραφιών είναι όμοια μεταξύ τους, το δίκτυο μετά την εκπαίδευση του θα «δυσκολεύεται» να εντοπίσει τα αντικείμενα προς εύρεση. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα ένα αντικείμενο να χρησιμοποιηθεί σαν «πρότυπο» για την αναγνώριση και άλλων παρεμφερών αντικειμένων με παρόμοιες διαστάσεις και γεωμετρικό σχήμα. Παρακάτω απεικονίζονται οι 3 θωρακίσεις ραδιενεργών πηγών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε όλη την διαδικασία και η αριστερά χρησιμοποιείται ως τελικός στόχος ανίχνευσης.



Εικόνα 26 : Αντικείμενα, Θωρακίσεις

Η βάση δεδομένων αποτελείται από 621 στοιχεία – φωτογραφίες. Έγινε εκτενής προσπάθεια να αποτυπωθούν τα αντικείμενα ευκρινώς μέσα στο περιβάλλον ενός σπιτιού με πολλαπλές λήψεις και πολλές εναλλαγές background. Επιπρόσθετα, φωτογραφήθηκαν τα αντικείμενα δίπλα και πίσω από όμοια τους οικιακά αντικείμενα, όπως για παράδειγμα κεράκια ρεσό, κόκκινο αυτοκίνητο και κόκκινο σεντόνι, με σκοπό να δυσκολευτεί το μοντέλο και να εκπαιδευτεί καλύτερα.

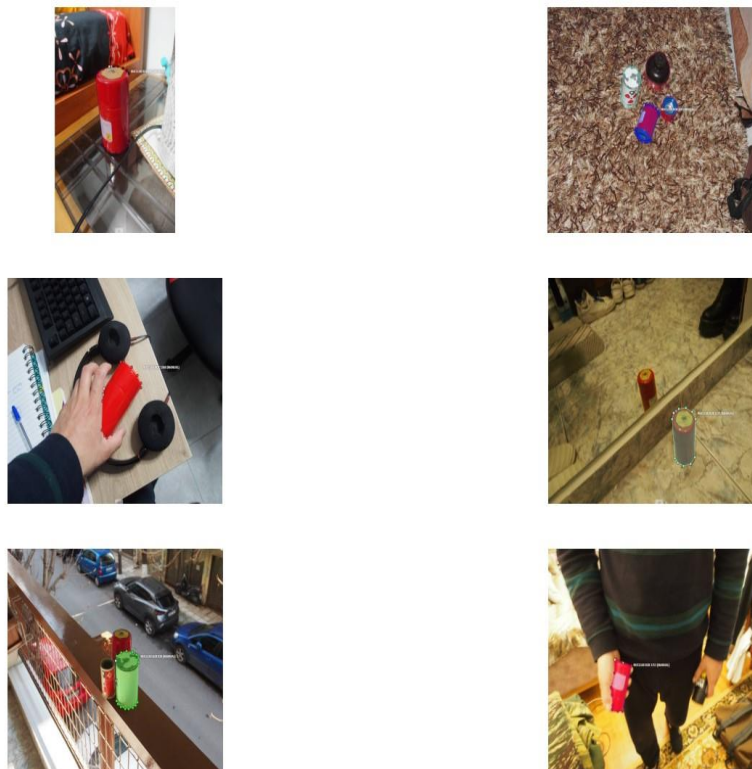


Εικόνα 27 : Δείγμα Εικόνων του Dataset

Για ανάπτυξη μοντέλων αναγνώρισης αντικειμένων (object recognition) αρκεί ένα dataset μεγέθους μέχρι 10.000 εικόνες, ενώ για αντίστοιχα μοντέλα κατάτμησης εικόνων και εντοπισμού των επιθυμητών pixel (semantic segmentation) είναι επαρκή dataset με τουλάχιστον 500 εικόνες.

#### 4.2.2 2<sup>ο</sup> Στάδιο (annotation)

Μετά την δημιουργία του dataset, οι συλλεγμένες εικόνες πρέπει να χαρακτηριστούν (annotation) ως προς τα επιθυμητά pixel για αναγνώριση. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CVAT (computer vision annotation tool), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Intel. Το CVAT είναι ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα, μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω διαδικτύου και αποτελεί, λόγω της χρηστικότητάς του, ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά για προεπεξεργασία εικόνων γενικότερα για μηχανική μάθηση και ειδικότερα για εφαρμογές computer vision.



Εικόνα 28 : Annotated Εικόνες από το Προηγούμενο Δείγμα



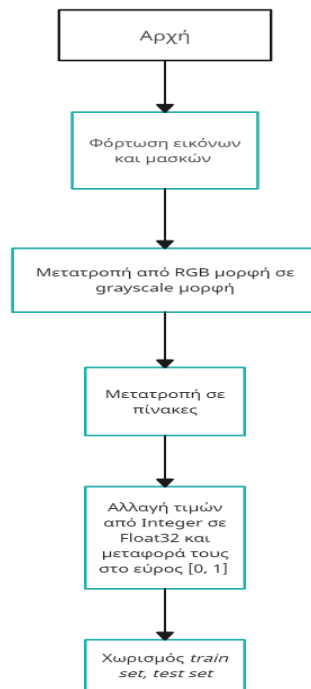
Η διαδικασία του annotation επιτυγχάνεται επιλέγοντας χειροκίνητα τα pixel των ορίων των περιοχών του αντικειμένου ενδιαφέροντος και μετά την ολοκλήρωση της επιλογής δημιουργείται μια τεθλασμένη γραμμή, η οποία περικλείει το αντικείμενο. Οι annotated εικόνες μπορούν να δημιουργήσουν διάφορες εξαγωγές – εικόνες, όπως για παράδειγμα εικόνες με bounding boxes να περιλαμβάνουν όλα τα annotated pixel, εικόνες grayscale με άσπρο το annotated κομμάτι και μαύρο το background, εικόνες με instance segmentation, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικό χρώμα για κάθε annotation της εικόνας. Η επιστήμη των νευρωνικών δικτύων αποκαλεί μάσκες (masks), τις εξόδους - εξαγωγές του annotation. Επιλέχθηκε η έξοδος του annotation, από το CVAT, να είναι εικόνες grayscale για μείωση του όγκου των δεδομένων και για την μικρότερη χρονική απόκριση στην επεξεργασία τους κατά την εκπαίδευση του μοντέλου.



*Εικόνα 29 : Annotated Εικόνες Αντιστοιχισμένες με τις Εξόδους από την Επιλεγμένη Grayscale μορφή Εξαγωγής*

### 4.2.3 3<sup>ο</sup> Στάδιο (επεξεργασία με την Python)

Οι εικόνες και οι μάσκες τους φορτώθηκαν, μέσω της Python, στο Google Colab για περαιτέρω επεξεργασία. Αρχικά, τα πειράματα εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας τις εικόνες σε μορφή RGB και τις μάσκες του σε μορφή grayscale. Ωστόσο, η φόρτωση των εικόνων και η επεξεργασία τους ήταν πολύ χρονοβόρες και προϋδέασε την άσκοπη σπατάλη σε χρόνο και πόρους χωρίς να επιτυγχάνεται κέρδος στα τελικά αποτελέσματα. Συνεπώς, λήφθηκε η απόφαση να φορτωθούν οι εικόνες σε μορφή grayscale για την μείωση του όγκου των υπολογισμών, την επιτάχυνση της εκπαίδευσης του μοντέλου και την συνολική μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την εκπαίδευση του μοντέλου. Εκ των υστέρων, αποδείχθηκε ότι, καλώς πάρθηκε η προηγούμενη απόφαση, καθώς δεν υπήρχε μείωση στην τελική αποτελεσματικότητα του δικτύου. Οι λήψεις των εικόνων πραγματοποιήθηκαν με κάμερα Olympus, μοντέλου E-M5 και οι αρχικές τους διαστάσεις ήταν 3200x2400 pixel. Χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της Python “*open-cv*”, για την μείωση των διαστάσεων σε 256x256 pixel για την παράμετρο των διαστάσεων εισόδου των εικόνων και των μαस्कών στο επιλεγμένο δίκτυο. Για την καλύτερη διαχείριση των τιμών των pixel και για την ευκολότερη εκτέλεση υπολογισμών, αξιοποιήθηκε η βιβλιοθήκη “*numpy*” για την μετατροπή των εικόνων σε μορφή πινάκων. Η βιβλιοθήκη *open-cv* φορτώνει τις τιμές των pixel σαν ακέραιους (integer) και σε εύρος τιμών [0, 256], από 0 για ελάχιστη φωτεινότητα pixel έως 256 για μέγιστη φωτεινότητα, παρόλα αυτά κρίθηκε αναγκαία η μετατροπή των τιμών σε δεκαδική ψηφιακή μορφή (float32) και ο περιορισμός των τιμών τους στο εύρος [0,1] για μεγαλύτερη ευελιξία στους υπολογισμούς. Επιπλέον, με την συνάρτηση “*train\_test\_split*” της κλάσης “*model\_selection*” της βιβλιοθήκης “*scikit-learn*”, η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές εκπαίδευσης μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, χωρίστηκε το αρχικό dataset των εικόνων σε δύο νέα dataset. Το “*train set*” αποτελούνταν από το 80% των εικόνων του αρχικού dataset, δηλαδή από 496 εικόνες και 496 μάσκες, ενώ το “*test set*” είχε το 20%, δηλαδή 125 εικόνες και 125 μάσκες. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα, επειδή το μοντέλο θα χρησιμοποιήσει το *train set* για να εκπαιδευτεί, χωρίς να υπολογίζει στα δεδομένα του *test set*, και το *test set* για να αξιολογήσει τις επιδόσεις του μετά την εκπαίδευσή του. Τέλος, στο Colab μέσω της βιβλιοθήκης “*keras*” και των κλάσεων της “*model*”, “*layers*” και “*optimizers*” υλοποιείται το νευρωνικό δίκτυο.



Εικόνα 30 : Διάγραμμα Ροής Κώδικα Επεξεργασίας στην Python

#### 4.2.4 4<sup>ο</sup> Στάδιο (μοντέλο – νευρωνικό δίκτυο)

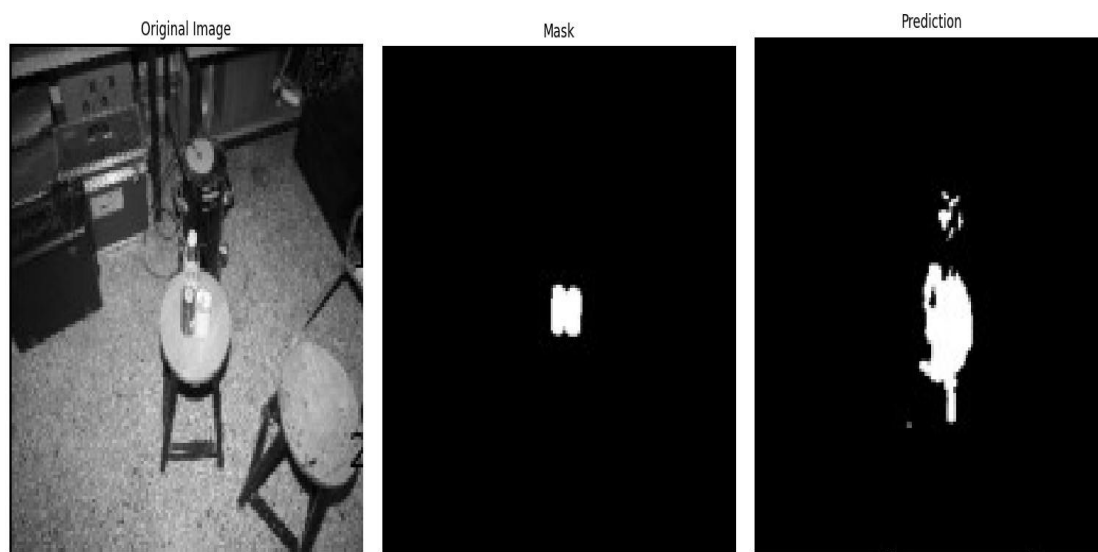
Στην εκπαίδευση μοντέλων νευρωνικών δικτύων, ο αλγόριθμος επεξεργάζεται πεπερασμένο αριθμό δεδομένων, τα οποία τα επεξεργάζεται σε κύκλους μέχρι να οριστεί ότι έφτασε σε επιθυμητά επίπεδα απόδοσης και να σταματήσει την εκπαίδευσή του. Ένας πλήρης κύκλος εκπαίδευσης, κατά τον οποίο, ο αλγόριθμος επεξεργάστηκε μία φορά κάθε δεδομένο, ονομάζεται εποχή. Λόγω του περιορισμού, τον οποίο επιβάλλουν οι προδιαγραφές του hardware του εκάστοτε υπολογιστή, δεν είναι δυνατό σε μία εποχή ο αλγόριθμος να επεξεργαστεί όλα τα δεδομένα σε ένα μόνο βήμα, ειδικά όταν η εφαρμογή ασχολείται με εικόνες, οι οποίες είναι αρχεία πολλών δεδομένων. Γι' αυτό το λόγο κατά την εκπαίδευση, τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα (batch) και τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο για επεξεργασία. Οι πειραματισμοί των επιστημόνων σε διεθνείς διαγωνισμούς τεχνητής νοημοσύνης έχουν δείξει ότι, για καλύτερη απόδοση στην εκπαίδευση ο αριθμός του batch πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 2 και πιο συγκεκριμένα 32 ή 64. Στην ορολογία της εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων υπάρχουν οι όροι υπερεκπαίδευση (overfitting) και υποεκπαίδευση (underfitting). Το overfitting είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί

«υπερβολικά» όσον αφορά το training dataset του και τείνει να τα πάει τέλεια σε ανίχνευση δεδομένων, τα οποία ανήκουν στο training dataset, ενώ αποτυγχάνει πλήρως στην ανίχνευση δεδομένων του test dataset και δεν δύναται να γενικεύσει τα συμπεράσματά του. Από την άλλη πλευρά, το underfitting, λαμβάνει χώρα όταν οι εποχές είναι «πολύ λίγες» για τον αλγόριθμο και δεν «προλαβαίνει» να εκπαιδευτεί επαρκώς σύμφωνα με το training set, οπότε τα συμπεράσματά του δεν μπορούν να ανιχνεύσουν επιτυχώς και με ικανοποιητικό περιθώριο εμπιστοσύνης κανένα στοιχείο, είτε ανήκει στο test dataset είτε στο training dataset.

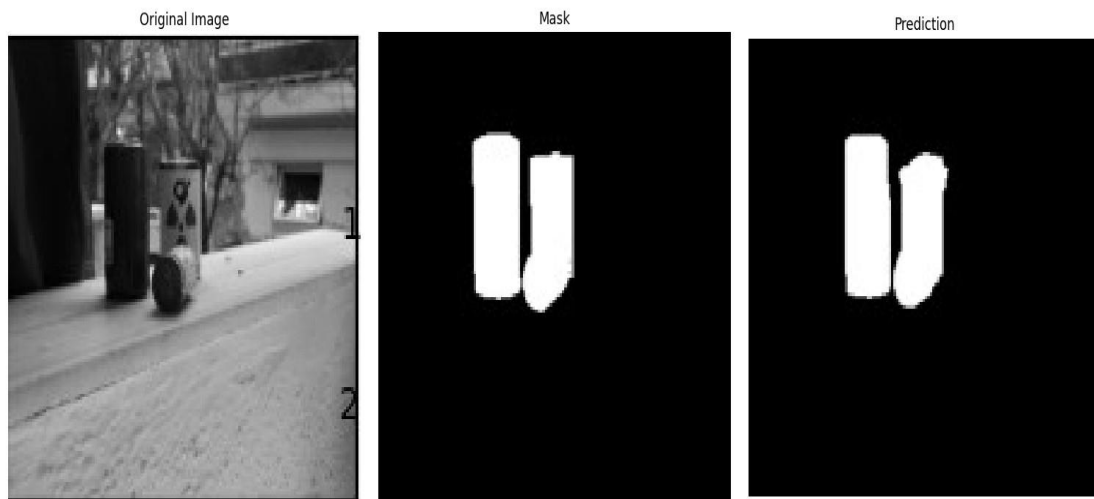
Για τις ανάγκες της ανάπτυξης του αλγορίθμου επιλέγεται το δίκτυο U-Net. Η εγνωσμένη επιτυχία του στο semantic segmentation και ιδιαίτερα σε απαιτητικά background εικόνων, η χαμηλή πολυπλοκότητά του, σε επίπεδο απλών συνελίξεων και οι μικρές απαιτήσεις για χρόνο εκπαίδευσης οδηγούν στην τελική εκλογή. Ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται για 500 εποχές και σε batch των 8 εικόνων. Το μέγεθος του batch επιλέγεται να είναι σε αυτήν την τιμή λόγω του περιορισμού της RAM στα 12,7 GB του απλού πακέτου παροχής των συστοιχιών της Google στο Colab. Ο αριθμός των εποχών αποφασίζεται να λάβει αυτήν την τιμή για να φτάσει μεν στα επιθυμητά επίπεδα απόδοσης και να μην οδηγηθεί σε overfitting δε. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 496 εικόνες εκπαίδευσης και δέχεται επεξεργασία σε batch των 8 εικόνων, συνεπώς γίνονται  $496/8=62$  επαναλήψεις σε κάθε εποχή, προκειμένου «να βλέπει» ο αλγόριθμος όλες τις εικόνες σε κάθε εποχή. Κατά το compile του μοντέλου, επιλέγεται ως βελτιστοποιητής (optimizer) ο ADAM (adaptive moment estimation), ο οποίος είναι στοχαστικός βελτιστοποιητής βαθμωτής κλίσης (stochastic gradient descent, SGD). Χρησιμοποιεί ως μέθοδο βελτιστοποίησης την παραγωγήση (derivative) για εύρεση των ελαχίστων απωλειών, προσπαθεί να μειώσει τις απώλειες του δικτύου σε κάθε επόμενη εποχή και εφαρμόζεται ευρέως σε όλο το φάσμα των εφαρμογών της εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων. Τέλος, ως μέτρο σύγκρισης των απωλειών εφαρμόστηκε το IoU (intersection over union). Ο τρόπος λειτουργίας του είναι η σύγκριση των τιμών των pixel της εικόνας πρόβλεψης ενός μοντέλου, με τις τιμές των αντίστοιχων pixel των αρχικών εικόνων – μασκών. Λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$  και έχει την τιμή 0 όταν κανένα pixel της πρόβλεψης δεν ταιριάζει με το αντίστοιχο του στην μάσκα, ενώ είναι 1 όταν όλα τα pixel της εικόνας – πρόβλεψης είναι ίδια με τα αντίστοιχά τους στην μάσκα.

### 4.3 Αποτελέσματα

Η εκπαίδευση του μοντέλου πραγματοποιείται σε 3 βήματα για την επιτήρηση της ομαλής εκπαίδευσης του, μέσω της επίβλεψης της μείωσης των απωλειών και της αύξησης του IoU και του περιορισμού του καθημερινού χρόνου χρήσης του Colab, ο οποίος είναι οι 12 συνεχόμενες ώρες σύνδεσης στις GPU. Το πρώτο και το δεύτερο βήμα αποτελούνται από 200 εποχές και χρειάζονται 6 ώρες, το καθένα, για την ολοκλήρωσή τους. Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει 100 εποχές και απαιτεί 3 ώρες για την ολοκλήρωσή του. Μετά το πέρας της εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος αξιολογείται ως προς την επίδοση του στο test dataset και έχει αποτέλεσμα 0,775 ή 77,5% μέσο όρο IoU σε όλες τις εικόνες αξιολόγησης. Οι μεμονωμένες IoU επιδόσεις του σε κάθε εικόνα κυμαίνονται από ελάχιστο 60,24% έως μέγιστο 81,74%.

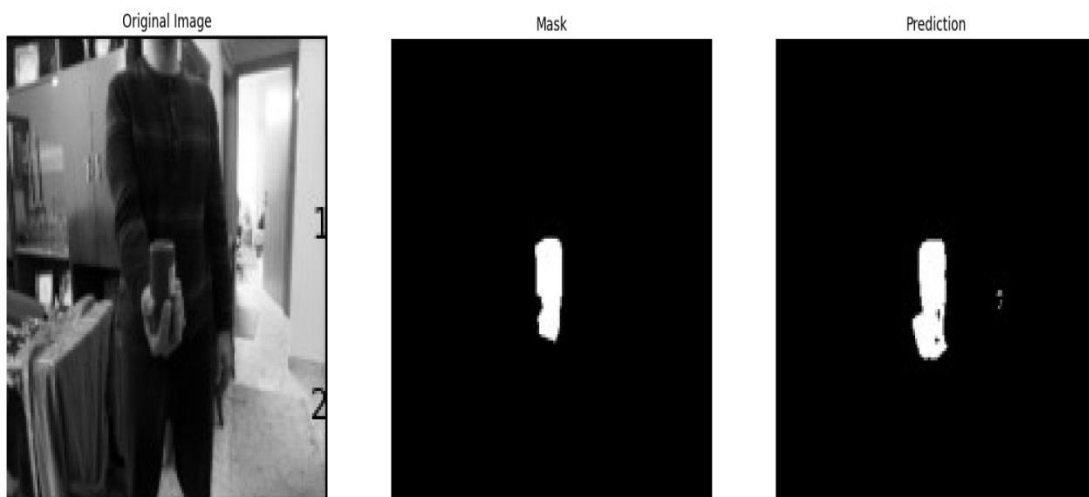


Εικόνα 31 : Πρόβλεψη με την Χειρότερη Απόδοση IoU (60,24%)

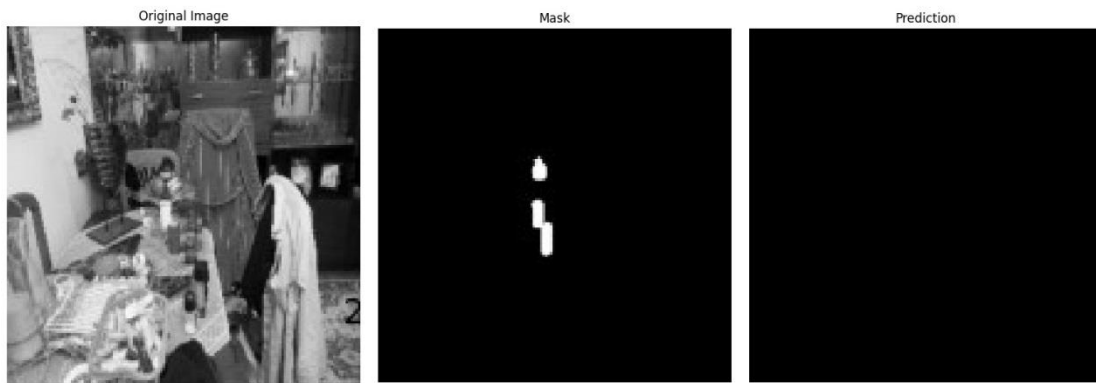
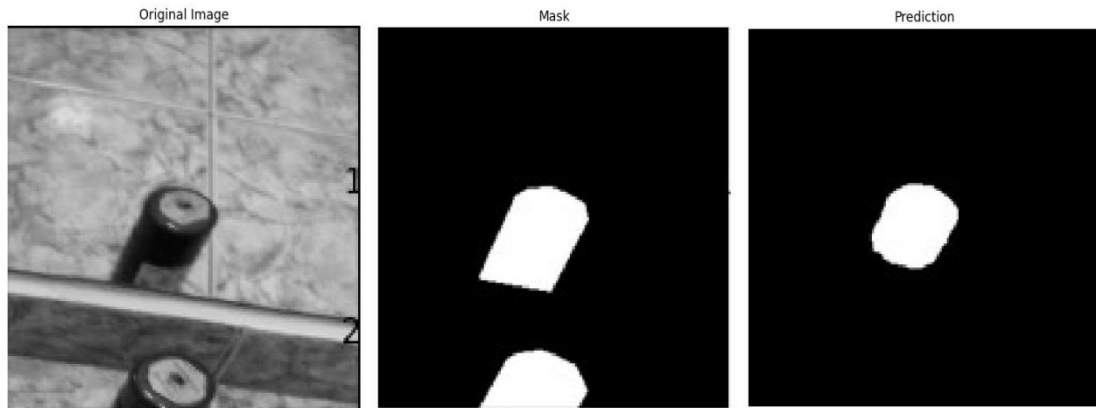


*Εικόνα 32 : Πρόβλεψη με την Καλύτερη Απόδοση IoU (81,74%)*

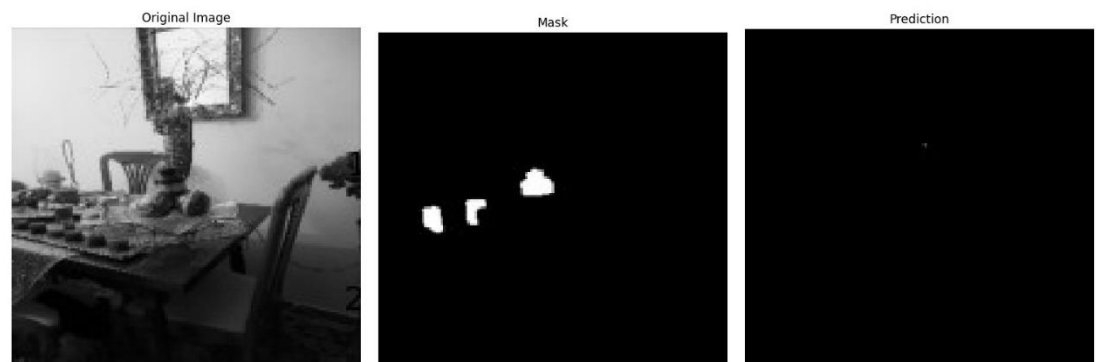
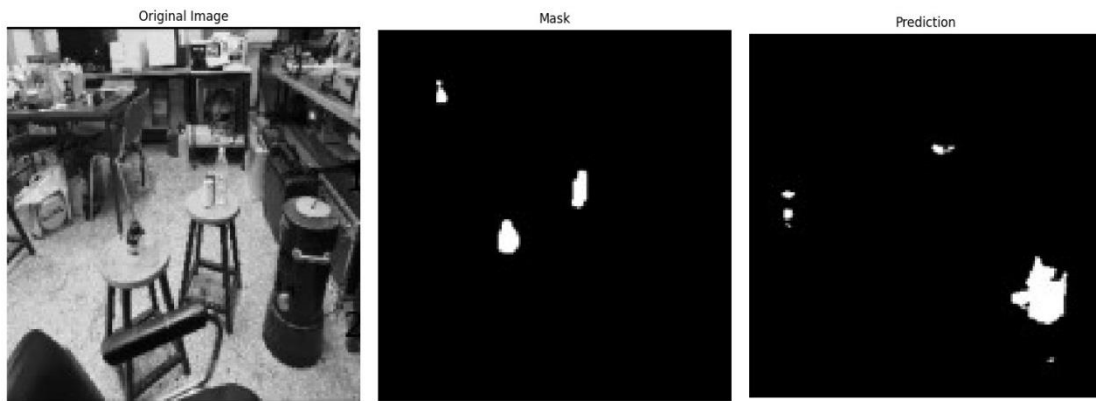
Επίσης, παρατίθενται αξιοσημείωτες περιπτώσεις, στις οποίες το δίκτυο δυσκολεύεται και εντοπίζει λάθος αντικείμενα, όπως για παράδειγμα το πολύπλοκο περιβάλλον του εργαστηρίου και του τραπεζιού και η «πρόκληση του καθρέφτη ή δεν βρίσκει τίποτα ή τα αποτελέσματα είναι απροσδόκητα καλά.

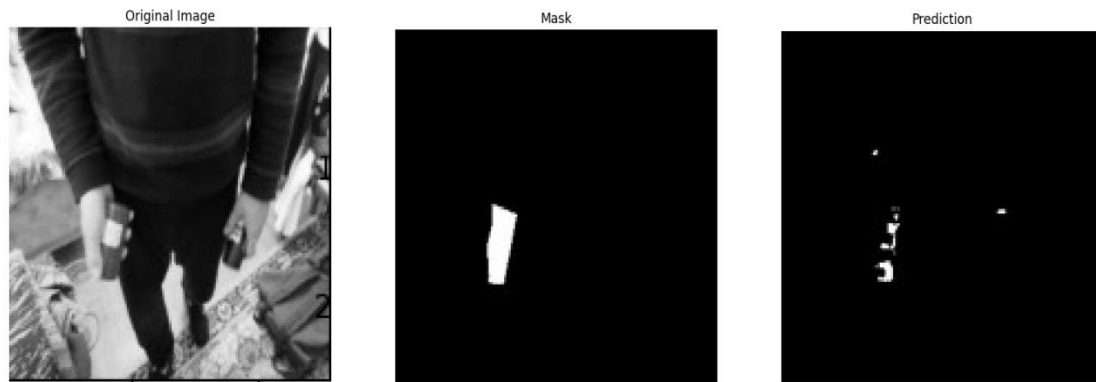


*Εικόνα 33 : Απροσδόκητα Καλή Επίδοση*



*Εικόνες 34 : Πάνω η Δυσκολία με τον Καθρέφτη και  
Κάτω το Πολύπλοκο Background του Τραπεζιού*





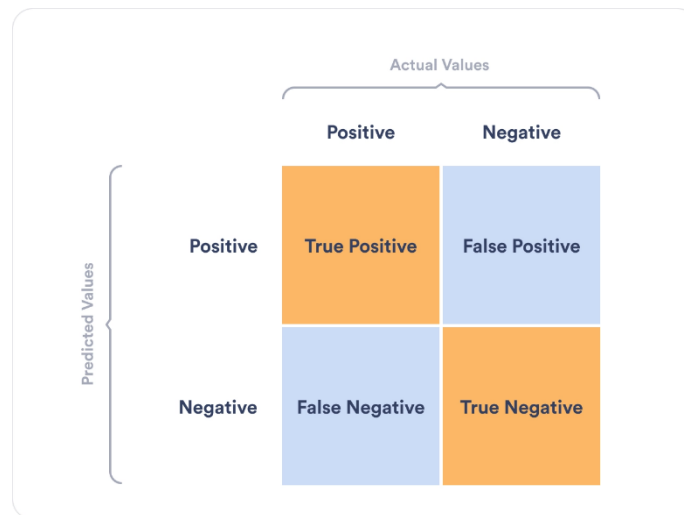
*Εικόνα 35 : Προβλέψεις στις οποίες Δυσκολεύεται ο Αλγόριθμος ή Εντοπίζει Λάθος Αντικείμενα*

Επιπρόσθετα, για την διασταύρωση και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν ακόμα δύο μέτρα αξιολόγησης των επιδόσεων των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Αφενός η κατασκευή του ROC curve (receiver operating characteristics), μέσω χρήσης πολλαπλών κατωφλίων στα IoU των εικόνων και κατασκευής των confusion matrix και αφετέρου ο υπολογισμός του AUC (area under curve), ο οποίος υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα ενός δικτύου. Αρχικά, καταμετράται χειροκίνητα ο αριθμός των εικόνων του test dataset, ο οποίος περιέχει πραγματικά το αντικείμενο προς ανίχνευση (κόκκινη κυλινδρική θωράκιση) και διαπιστώνεται ότι είναι 90. Συνεπώς, οι υπόλοιπες 35 φωτογραφίες δεν το περιλαμβάνουν. Έπειτα, εφαρμόζονται 20 διαφορετικά thresholds στο IoU για την διάκριση του ποσοστού εμπιστοσύνης, με το οποίο το δίκτυο ανιχνεύει το αντικείμενο και δημιουργούνται τα confusion matrix. Με άλλα λόγια, μετά την εφαρμογή ενός threshold, ο αλγόριθμος θεωρεί ότι μόνο οι εικόνες με IoU μεγαλύτερο του threshold περιέχουν το αντικείμενο και απορρίπτει τις υπόλοιπες. Τα confusion matrix είναι πίνακες αξιολόγησης των ταξινομητών και περιλαμβάνουν αριθμούς, οι οποίοι προκύπτουν από το εάν η πραγματική εικόνα περιέχει ή όχι το αντικείμενο προς ανίχνευση και εάν ο αλγόριθμος το εντοπίζει επιτυχώς ή ανεπιτυχώς. Το άθροισμα “True Positive + False Negative” είναι 90, ενώ το άθροισμα “False Positive + True Negative” είναι 35. Από το confusion matrix εξάγονται οι τελικές τιμές, οι οποίες δημιουργούν την καμπύλη ROC, καθώς ισχύουν :



$$TPR = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Negative}}$$

$$FPR = \frac{\text{False Positive}}{\text{False Positive} + \text{True Negative}}$$

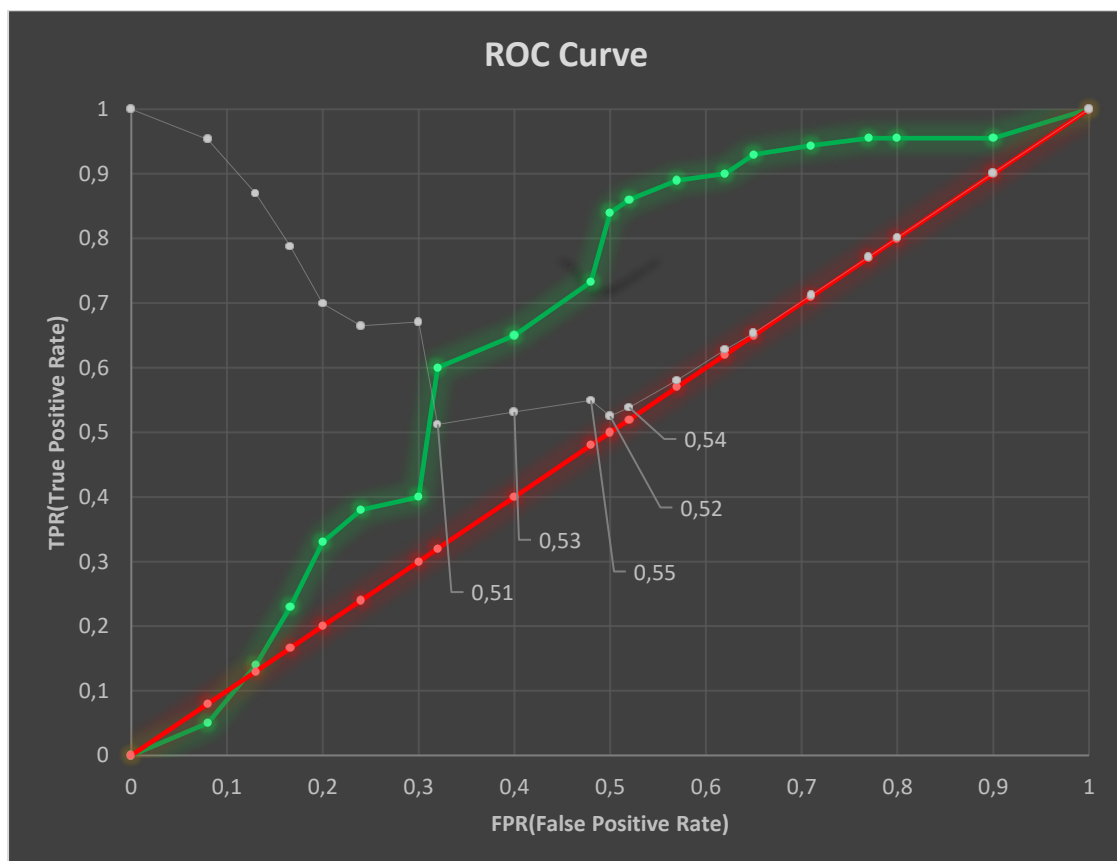


Εικόνα 36 : Μορφή Confusion Matrix

Για παράδειγμα, θέτοντας το threshold ίσο με 0,775 ή 77,5% το μοντέλο ανιχνεύει 78 εικόνες ότι περιέχουν το αντικείμενο, οι οποίες όντως το περιέχουν, 12 εικόνες ότι δεν περιέχουν το αντικείμενο, ενώ πραγματικά το περιλαμβάνουν, 18 εικόνες ότι περιλαμβάνουν το αντικείμενο, ενώ στην πραγματικότητα δεν το περιλαμβάνουν και τέλος 17 εικόνες ότι δεν περιέχουν το αντικείμενο, οι οποίες όντως δεν το περιλαμβάνουν. Από αυτές τις τιμές προκύπτουν  $TPR = 0,86$  και  $FPR = 0.52$  και προστίθεται ένα σημείο στην καμπύλη. Επαναληπτικά με την ίδια διαδικασία εφαρμόστηκαν τα υπόλοιπα threshold, τα οποία εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα με τις εξαγόμενες TPR και FPR τιμές τους και κατασκευάζεται το διάγραμμα ROC curve. Το μικρότερο IoU των προβλέψεων είναι 60,24%, οπότε η εφαρμογή thresholds στο διάστημα (0, 60,24) δεν έχει νόημα, καθώς βγάζει τα ίδια αποτελέσματα με το  $threshold=0$ . Γι' αυτό το λόγο, το αμέσως επόμενο threshold από την τιμή 0 είναι το  $threshold = 61$ .

Threshold	TPR	FPR	Threshold	TPR	FPR
0	1	1	78,2	0,733	0,48
61	0,955	0,9	78,5	0,65	0,4
65	0,955	0,8	78,8	0,6	0,32
70	0,955	0,77	79	0,4	0,3
75	0,944	0,71	79,2	0,38	0,24
76	0,93	0,65	79,5	0,33	0,2
76,5	0,9	0,62	79,8	0,23	0,166
77,2	0,89	0,57	80	0,14	0,13
77,5	0,86	0,52	81	0,05	0,08
78	0,84	0,5	100	0	0

Πίνακας 3 : Εφαρμοζόμενα Threshold με τις TPR, FPR τιμές τους



Εικόνα 37 : ROC curve

Η πράσινη τεθλασμένη γραμμή απεικονίζει την καμπύλη ROC, η οποία αντιστοιχεί στην επίδοση του νευρωνικού δικτύου μας. Η κόκκινη γραμμή αποτυπώνει την επίδοση τυχαίου ταξινομητή, ο οποίος εκτελεί ενέργειες με πλήρη τυχαιότητα. Η καμπύλη κάποιου «τέλειου» θεωρητικού μοντέλου περνάει από το σημείο (0,1) του διαγράμματος και ακολουθεί τους άξονες κατά μήκος. Η γκρι καμπύλη καταδεικνύει τις αποστάσεις των σημείων της καμπύλης ROC από το σημείο (0, 1) και συνεπώς από την «τέλεια» επίδοση. Διαφαίνεται ότι, το σημείο (FPR, TPR) = (0,32 , 0,6) έχει την μικρότερη απόσταση από το σημείο (0, 1) μεταξύ των αποστάσεων των υπολοίπων σημείων της καμπύλης του και επομένως η καλύτερη επίδοση του μοντέλου επιτυγχάνεται για threshold = 78,8%.

Τέλος, η τιμή AUC αποτελεί το εμβαδό της περιοχής, η οποία περικλείεται από την καμπύλη ROC και τους άξονες TPR = 0 και FPR = 0. Το «τέλειο» θεωρητικό μοντέλο έχει τιμή AUC ίση με 1, ωστόσο εδώ υπολογίζεται η τιμή AUC του μοντέλου ίση με 0,661.

## Κεφάλαιο 5 : Επίλογος

### *5.1 Γενικά Συμπεράσματα*

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται εμφανή στροφή της ΙΑΕΑ προς την ενίσχυση των μέτρων του Nuclear Security με την συνδρομή της τεχνητής νοημοσύνης. Με την βοήθεια κυκλωμάτων παρακολούθησης και αυτόματης ανίχνευσης ύποπτων και παράνομων δραστηριοτήτων στοχεύει να ισχυροποιήσει την ασφάλεια (security) των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα η υπολογιστική όραση δύναται να δημιουργήσει εύρωστα (robust) μοντέλα είτε ανίχνευσης αντικειμένων και σήμανσης συναγερμού είτε παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων μέσω κατάτμησης εικόνων. Γι' αυτό το σκοπό κρίθηκε σκόπιμο να αναπτυχθεί αλγόριθμος εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου, το οποίο θα μπορεί να συνεισφέρει, τουλάχιστον σε αρχικό στάδιο στην επίτευξη της αναβάθμισης του Nuclear Security.

Η δημιουργία του αλγορίθμου περιλάμβανε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών, από συλλογή φωτογραφιών μέχρι την κρίσιμη τελική επιλογή συνελκτικού νευρωνικού δικτύου για εκπαίδευση. Η απόδοση του μοντέλου, προκειμένου να προσδώσει την πολύπλευρη ευελιξία βελτίωσής του στο μέλλον, προσεγγίστηκε από τρεις τρόπους αξιολόγησης. Η πλευρά του IoU εξήγαγε ικανοποιητικό αποτέλεσμα στο 77,5%. Η πλευρά του ROC curve απέδειξε ότι ο αλγόριθμος ενεργεί αρκετά καλύτερα από κάποιον τυχαίο ταξινομητή, αλλά έχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης για να πλησιάσει μία καλή ικανότητα προβλέψεων. Τέλος, αν και η ευρύτερη κοινότητα του machine learning θεωρεί το AUC αμφιλεγόμενο, ως προς την ποιότητά του, λόγω της μεγάλης εισαγωγής θορύβου στην τιμή του, χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο αξιολόγησης και ο αλγόριθμος πέτυχε τιμή 0,661. Διασαφηνίστηκε με αυτόν τον τρόπο, ότι παρά τα αρχικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, το μοντέλο χρήζει βελτίωσης.

## 5.2 Περαιτέρω Επεκτάσεις για Έρευνα

Ο αλγόριθμος, ο οποίος αναπτύχθηκε, απέδειξε ότι είναι ικανός να εκτελέσει τον αρχικό σκοπό του. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης, μερικά από τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά, για να διευρυνθεί και να διερευνηθεί η καλή λειτουργία του αλγορίθμου καλό θα ήταν να δημιουργηθεί ένα αρκετά μεγαλύτερο dataset, της τάξης των χιλιάδων εικόνων, περιλαμβάνοντας εικόνες σε μεγαλύτερο εύρος και ποικιλία background. Στην ενίσχυση της απόδοσης του αλγορίθμου και της αύξησης των μοτίβων αναγνώρισης του θα μπορούσαν να ενσωματωθούν αντικείμενα τύπου Troxler, όπως στην παρακάτω εικόνα. Επίσης, βοηθητικό θα ήταν να δοκιμαστεί η εκπαίδευση του αλγορίθμου σε μεγαλύτερα batch και σε περισσότερες εποχές, με τις αρχικές RGB εικόνες για μεγαλύτερη «πρόκληση» στο background. Επιπλέον, θεωρείται ότι θα βελτίωνε σημαντικά την απόδοση του δικτύου η τεχνική του transfer learning και η εκπαίδευσή του σε τεράστιες βάσεις δεδομένων εικόνων όπως είναι το ImageNet. Το transfer learning είναι η «εκμετάλλευση» στοιχείων ήδη εκπαιδευμένων μοντέλων σε πολύ μεγάλα dataset με σκοπό την ταχύτερη και ασφαλέστερη γενίκευση των προβλέψεων και των επιδόσεων.

Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ζωντανή κάμερα και να δοκιμαστεί η απόδοση του σε ζωντανό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, δύναται να αρχίσει η πραγματική εφαρμογή του αλγορίθμου σε πυρηνικές εγκαταστάσεις. Τέλος, θα μπορούσε να δοκιμαστεί η εκπαίδευση του με κάποιο άλλο μοντέρνο δίκτυο, όπως είναι τα Yolo, τα οποία εξελίσσονται με φρενήρη ρυθμό.



*Εικόνα 38 : Αντικείμενα Τύπου Troxler*

## Βιβλιογραφία

- [1] IAEA and M. Hewes, “How Artificial Intelligence Will Change Information and Computer Security in the Nuclear World | IAEA.” Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/bulletin/how-artificial-intelligence-will-change-information-and-computer-security-in-the-nuclear-world>
- [2] Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ., *Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία*. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ, 2005.
- [3] C. Price, Austria. *Nuclear Security Fundamentals*, (May 2018).
- [4] “What’s the Difference Between Hazard and Risk? A Complete Guide - Wirehouse Employer Services.” Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: <https://wirehouse-es.com/health-and-safety/whats-the-difference-between-hazard-and-risk-a-complete-guide/>
- [5] Φ. Ιατρικής -Ακτινοφυσικός, “Προστασία από τις Ακτινοβολίες (Ακτινοπροστασία) Σημαντηράκης Γεώργιος.”
- [6] *IAEA Safety Standards for protecting people and the environment*. 2006.
- [7] “Nuclear safety and security - Wikipedia.” Accessed: Sep. 21, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_safety\\_and\\_security](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_safety_and_security)
- [8] IAEA, *Computer Security Techniques for Nuclear Facilities*. Austria, 2021.
- [9] “Αιτιοκρατία - Βικιπαίδεια.” Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BF%CE%BA%CF%81%CE%B1%CF%84%CE%AF%CE%B1>
- [10] IAEA council, *Nuclear Security Fundamentals IAEA Nuclear Security Series No. 20 Objective and Essential Elements of a State’s Nuclear Security Regime*. 2013.
- [11] M. Mahmoud, Vienna. *Nuclear Security Detection Measures and Assessment of Alerts and/or Alarms at a Major Public Event*, (May 05, 2021).
- [12] “Radiation portal monitor - Wikipedia.” Accessed: Oct. 07, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_portal\\_monitor](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_portal_monitor)
- [13] International Atomic Energy Agency, *Management of disused sealed radioactive sources*. Vienna, 2014, p. 1.
- [14] International Atomic Energy Agency, *Management of disused sealed radioactive sources*. Vienna, 2014.

- [15] “Goiânia accident - Wikipedia.” Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Goi%C3%A2nia\\_accident](https://en.wikipedia.org/wiki/Goi%C3%A2nia_accident)
- [16] “IAEA Safety Standards for protecting people and the environment Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2018 Edition.” [Online]. Available: <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- [17] “Όραση - Βικιπαίδεια.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%8C%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%B7>
- [18] P. H. Schiller, “The central visual system,” *Vision Res.*, vol. 26, no. 9, pp. 1351–86, 1986, doi: 10.1016/0042-6989(86)90162-8.
- [19] “Όλη η αλήθεια για το μυστήριο ρητό «Μια εικόνα, χίλιες λέξεις» – News.gr.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.news.gr/oikonomia/business-stories/article/828062/oli-i-alithia-gia-to-mistirio-rito-mia-ikona-chilies-lexis.html>
- [20] “ΜΜΕ: Το φαινόμενό τους στη σύγχρονη εποχή και στην κοινωνία της γνώσης – the SAFIA Blog.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://thesafiablog.com/2022/06/27/media-knowledge-contempsoc/>
- [21] “Αναλογικό σήμα - Βικιπαίδεια.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1)
- [22] “Ψηφιακό σήμα - Βικιπαίδεια.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C\\_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1)
- [23] Πήτας Ι. «Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας», *Θεσσαλονίκη, 2010*. Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://metabook.gr/books/psifiaki-epexserghasia-ikonas-ioannis-pitas-50669>
- [24] Gonzalez, Rafael, Woods, Richard, “*Digital Image Processing using Matlab*”, 2017. Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/exec/obidos/ASIN/0133356728/themathworks>
- [25] “Digital image processing - Wikipedia.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_image\\_processing](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_processing)
- [26] “Επεξεργασία εικόνας - Βικιπαίδεια.” Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5>



- %CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1\_%CE%B5%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%BD%CE%B1%CF%82
- [27] N. Ahmed, “How I Came Up with the Discrete Cosine Transform,” 1991.
- [28] “What is Computer Vision? | IBM.” Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>
- [29] J. E. Dobson, Project Muse., and Project MUSE, *The Birth of Computer Vision*. University of Minnesota Press, 2023. Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.upress.umn.edu/book-division/books/the-birth-of-computer-vision>
- [30] “Computer vision - Wikipedia.” Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer\\_vision](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_vision)
- [31] “Computer Vision: What it is and why it matters | SAS.” Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: [https://www.sas.com/el\\_gr/insights/analytics/computer-vision.html](https://www.sas.com/el_gr/insights/analytics/computer-vision.html)
- [32] X. Παπαδόπουλος, “Συνδυάζοντας Απλά και Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα με SVM,” Θεσσαλονίκη, 2015.
- [33] “Deep learning - Wikipedia.” Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_learning](https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_learning)
- [34] J. Schmidhuber, “Deep Learning in Neural Networks: An Overview,” *Neural Networks*, vol. 61, pp. 85–117, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
- [35] “Convolutional neural network - Wikipedia.” Accessed: Sep. 17, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Convolutional\\_neural\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Convolutional_neural_network)
- [36] “Introduction to Convolution Neural Network - GeeksforGeeks.” Accessed: Sep. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-convolution-neural-network/>
- [37] “R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO — Object Detection Algorithms | by Rohith Gandhi | Towards Data Science.” Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e>
- [38] “Region Based Convolutional Neural Networks - Wikipedia.” Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Region\\_Based\\_Convolutional\\_Neural\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Region_Based_Convolutional_Neural_Networks)
- [39] R. Girshick, “Fast R-CNN,” Apr. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1504.08083>

- [40] “Faster R-CNN vs YOLO vs SSD — Object Detection Algorithms | by Abonia Sojasingarayar | IBM Data Science in Practice | Medium.” Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <https://medium.com/ibm-data-ai/faster-r-cnn-vs-yolo-vs-ssd-object-detection-algorithms-18badb0e02dc>
- [41] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks.” [Online]. Available: <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/results>
- [42] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” Jun. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1506.02640>
- [43] “YOLO — You only look once, real time object detection explained | by Manish Chablani | Towards Data Science.” Accessed: Sep. 19, 2023. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/yolo-you-only-look-once-real-time-object-detection-explained-492dc9230006>
- [44] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation,” 2015. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1505.04597>