



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ:
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ & ΤΩΝ
ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PET/CT, SPECT/CT

Φοιτητής:

Γεώργιος Μελιόπουλος (Α.Μ. 48014053)

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευστράτιος Δαβίδ, Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Αθήνα 21/03/2024

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Ευστράτιος Δαβίδ	Παναγιώτης Λιαπαρίνος	Αικατερίνη Σκουρολιάκου
Επίκουρος Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής	Καθηγήτρια

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ] [ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ] [ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Γεώργιος Μελιόπουλος του Θωμά, με αριθμό μητρώου 48014053 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοιατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

21/03/2024

Ο Δηλών

Γεώργιος Μελιόπουλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Πυρηνική Ιατρική είναι μια ιατρική ειδικότητα που χρησιμοποιεί τις ιδιότητες της ακτινοβολίας και των ραδιοφαρμάκων για τη διάγνωση, θεραπεία και έρευνα των ασθενειών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τα ισότοπα, που είναι εκδομένα του ίδιου στοιχείου με διαφορετικό αριθμό νετρονίων, για να παράγει εικόνες και πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των οργάνων και των συστημάτων του ανθρώπινου σώματος. Οι κύριες εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής περιλαμβάνουν την διάγνωση, την θεραπεία και την έρευνα. Με βάση αυτές τις μεθοδολογίες παρέχει μια μη επεμβατική προσέγγιση για τη διάγνωση και θεραπεία διαφόρων καταστάσεων υγείας και έχει ευρεία χρήση στον τομέα της ιατρικής. Συνεπώς, είναι εύκολα κατανοητή η σημασία και η συνεισφορά της γενικότερα στο πεδίο της Ιατρικής.

Στο σήμερα υπάρχει μια άλλη συνιστώσα, η οποία είναι σε θέση να βελτιώσει ακόμα περισσότερο την Πυρηνική Ιατρική και λέγεται Τεχνητή νοημοσύνη. Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική έχει αναπτυχθεί σημαντικά και προσφέρει νέες δυνατότητες για βελτίωση της διάγνωσης, της θεραπείας και της έρευνας. Ορισμένοι τρόποι με τους οποίους η Τεχνητή Νοημοσύνη εφαρμόζεται στην Πυρηνική Ιατρική περιλαμβάνουν την αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνων, τις προσαρμοστικές θεραπείες, την αναζήτηση και ανάλυση δεδομένων και την προβλεπτική διάγνωση.

Ομοίως, η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική έχει οδηγήσει σε σημαντική ανάπτυξη και βελτίωση των συστημάτων απεικόνισης, ειδικά των υβριδικών συστημάτων PET/CT και SPECT/CT. Συνεπώς η συνδυασμένη χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης και των υβριδικών συστημάτων PET/CT και SPECT/CT στην Πυρηνική Ιατρική έχει την δυνατότητα να επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που διαχειριζόμαστε, διαγιγνώσκουμε και θεραπεύουμε ασθενείς, επιφέροντας σημαντικά οφέλη στην κλινική πρακτική.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, Πυρηνική Ιατρική, SPECT, PET, SPECT/CT, PET/CT, ιατρική απεικόνιση, υβριδικά συστήματα απεικόνισης

ABSTRACT

Nuclear Medicine is a medical specialty that uses the properties of radiation and radiopharmaceuticals to diagnose, treat and research diseases. It also uses isotopes, which are versions of the same element with different numbers of neutrons, to produce images and information about the functioning of the organs and systems of the human body. The main applications of nuclear medicine include diagnosis, treatment and research. Based on these methodologies, it provides a non-invasive approach to the diagnosis and treatment of various health conditions and is widely used in the field of medicine. Therefore, its importance and contribution to the field of medicine in general is easily understood.

In today's world there is another component, which is able to improve Nuclear Medicine even more, called Artificial Intelligence. The use of Artificial Intelligence in nuclear medicine has developed significantly and offers new possibilities for improving diagnosis, treatment and research. Some of the ways in which Artificial Intelligence is applied in nuclear medicine include automated image processing, adaptive therapies, data search and analysis, and predictive diagnostics.

Similarly, the use of Artificial Intelligence in Nuclear Medicine has led to significant development and improvement of imaging systems, especially hybrid PET/CT and SPECT/CT systems. Therefore, the combined use of Artificial Intelligence and hybrid PET/CT and SPECT/CT systems in Nuclear Medicine has the potential to redefine the way we manage, diagnose and treat patients, bringing significant benefits to clinical practice.

Key Words: Artificial Intelligence, Nuclear Medicine, SPECT, PET, SPECT/CT, PET/CT, medical imaging, hybrid imaging systems

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες αρχικά στην οικογένεια μου και δη στους γονείς μου, Θωμά και Αγγελική για την αμέριστη συμπαράσταση τους σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου πορείας. Επίσης, εκ βάθους καρδιάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύντροφο μου για όλη την υποστήριξη που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Ωστόσο δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την εκτίμηση και την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ε. Δαβίδ για την ευκαιρία που μου έδωσε προκειμένου να εργασθώ υπό την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη του συνέβαλαν σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτού του ερευνητικού έργου. Η εμπειρία αυτή με έχει εμπλουτίσει ιδιαίτερα, προσφέροντας μου νέες γνώσεις και δεξιότητες στον τομέα της Βιοϊατρικής Μηχανικής. Σας είμαι ευγνώμων για την υπομονή, την ενθάρρυνση και τις καθοδηγητικές συμβουλές που μου παρείχατε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συνεργασία μας αποτέλεσε για μένα μια εκπληκτική ευκαιρία για μάθηση και ανάπτυξη.

Ευελπιστώ ότι η εργασία αυτή αντικατοπτρίζει την αφοσίωση και την προσπάθειά μου και είμαι πεπεισμένος ότι οι γνώσεις που αποκόμισα θα με βοηθήσουν μελλοντικά.

Με εκτίμηση

Γεώργιος Μελιόπουλος

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	8
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
Κεφάλαιο 1 ^ο : Η Πυρηνική Ιατρική.....	12
1.1 Τι είναι η Πυρηνική Ιατρική;.....	13
1.2 Η χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής ως θεραπεία.....	13
1.3 Η χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής στην διάγνωση.....	14
1.4 Οι τεχνικές διάγνωσης.....	16
Κεφάλαιο 2 ^ο : Τα συστήματα απεικόνισης.....	19
2.1 Οι ανιχνευτές της Πυρηνικής Ιατρικής.....	20
2.2 Επίπεδη απεικόνιση.....	23
2.3 Η υπολογιστική τομογραφία εκπομπής φωτονίου (SPECT).....	23
2.4 Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET).....	25
2.5 Η αξονική τομογραφία (CT).....	26
Κεφάλαιο 3 ^ο : Τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης SPECT/CT & PET/CT.....	29
3.1 Τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης.....	30
3.2 PET/CT.....	30
3.3 SPECT/CT.....	32
Κεφάλαιο 4 ^ο : Τεχνητή νοημοσύνη & Πυρηνική Ιατρική.....	33
4.1 Η Τεχνητή Νοημοσύνη σε ευρύτερο πλαίσιο.....	34
4.2 Η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική.....	35
4.3 Οι κατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική.....	36
4.4 Οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική.....	37
4.5 Η «φυσική της απεικόνισης».....	38
Κεφάλαιο 5 ^ο : Ευκαιρίες, Προκλήσεις και Ευθύνες της Πυρηνικής Ιατρικής & της Τεχνητής νοημοσύνης.....	42
5.1 Η σχέση Πυρηνικής Ιατρικής και Τεχνητής νοημοσύνης σήμερα.....	43
5.2 Οι ευκαιρίες της σύμπραξης TN και ΠΙ.....	45
5.3 Το οικοσύστημα της Τεχνητής Νοημοσύνης.....	48
5.4 Προκλήσεις ανάπτυξης, επικύρωσης και εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική.....	48
5.5 Εμπιστοσύνη και Αξιοπιστία.....	49
5.6 Τα βασικά στοιχεία ενός αξιόπιστου συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης.....	50
5.7 Οι περιορισμοί των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης.....	53
Κεφάλαιο 6 ^ο : Επίλογος.....	55
Κεφάλαιο 6 ^ο : Επίλογος.....	56
6.1 Συμπεράσματα.....	56
6.2 Οι μελλοντικές προοπτικές της Πυρηνικής Ιατρικής.....	57
Αναφορές-Πηγές.....	58

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Επίπεδη σάρωση των οστών ολόκληρου του σώματος που δείχνει ασθένεια στον αριστερό ώμο, τη σπονδυλική στήλη και την δεξιά λεκάνη.	15
Εικόνα 2. Διαδικασία εφαρμογής της SPECT	17
Εικόνα 3. Διαδικασία εφαρμογής της PET	17
Εικόνα 4. Δομή Κάμερας Γάμμα	20
Εικόνα 5. Λειτουργία Ανιχνευτή Σπινθηρισμού.....	22
Εικόνα 6. Λειτουργία Κάμερας Anger	22
Εικόνα 7. Σχηματική αναπαράσταση των εντολέων της SPECT	24
Εικόνα 8. Η απεικόνιση με SPECT	24
Εικόνα 9. Εξαύλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου	26
Εικόνα 10. Αξονικός Τομογράφος.....	27
Εικόνα 11. Κλινικά συστήματα SPECT/CT	32
Εικόνα 12. Υποκατηγορίες της τεχνητής νοημοσύνης	36
Εικόνα 13. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στην Ιατρική.....	44
Εικόνα 14. Οι ευκαιρίες Τεχνητής Νοημοσύνης στον χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής	45

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Π.Ο.Ι	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
AC	Attenuation correction
ANN	Artificial Neural Networks
CNN	Convolutional Neural Networks
DL	Deep Learning
GAN	Generative Adversarial Networks
ML	Machine Learning
MR	Magnetic Resonance
MRI	Magnetic Resonance Imaging
PET	Positron Emission Tomography
SC	Scatter Correction
SNMM	Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging
SPECT	Single Photon Emission Tomography

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική συνιστά μια σημαντική επανάσταση στον τομέα της υγείας, προσφέροντας προηγμένες λύσεις και εκτεταμένες δυνατότητες. Οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης σε αυτόν τον κλάδο εκτείνονται από τη διευκόλυνση της διάγνωσης με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνων μέχρι τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της θεραπείας με την εξατομίκευση του προγράμματος θεραπείας κάθε ασθενούς.

Η δυνατότητα της Τεχνητής Νοημοσύνης να αναλύει μεγάλες ποσότητες δεδομένων με ακρίβεια και ταχύτητα ανοίγει νέους ορίζοντες στην κλινική πρακτική. Συγκεκριμένα, η αυτόματη επεξεργασία εικόνων από τις ιατρικές εξετάσεις, όπως η τομογραφία ή η μαγνητική τομογραφία, επιτρέπει την πιο γρήγορη και ακριβή διάγνωση παθήσεων. Επιπλέον, η Τεχνητή Νοημοσύνη συμβάλλει στην πρόβλεψη πιθανών επιπλοκών και στην προσαρμογή της θεραπείας, εξατομικεύοντας την προσέγγιση για κάθε ασθενή. Πέραν της διαγνωστικής διαδικασίας, η Τεχνητή Νοημοσύνη συμβάλλει στην περαιτέρω πρόοδο της Πυρηνικής Ιατρικής μέσω της παρακολούθησης της απόκρισης στη θεραπεία. Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να προβλέπουν την απόκριση του ασθενούς σε θεραπευτικές παρεμβάσεις και να προτείνουν προσαρμοσμένα προγράμματα θεραπείας.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική, αναδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο η συνάντηση της τεχνολογίας αυτής με την Πυρηνική Ιατρική ανοίγει νέους ορίζοντες για την προσωποποίηση και τη βελτίωση της φροντίδας των ασθενών. Το αντικείμενο της έρευνας αυτής αν και σε διεθνές επίπεδο έχει αναλυθεί εκτενώς, εντός ελληνικών συνόρων δεν έχει τύχει έως τώρα ευρείας ανάλυσης και ανάδειξης από όσους ασχολούνται με το πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής. Για αυτόν τον λόγο, το μεγαλύτερο μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας, στηρίχθηκε στην διεθνή βιβλιογραφία.

Το πρώτο μέρος της έρευνας αναφέρεται γενικότερα στο πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής παραθέτοντας ορισμένες επιμέρους πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους που εφαρμόζονται και κατά πόσο αυτές συμβάλλουν στην διάγνωση και στην θεραπεία των ασθενών, κυρίως μέσω των συστημάτων απεικόνισης. Ακολούθως λοιπόν, στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικότερα τα συστήματα απεικόνισης της Πυρηνικής Ιατρικής όπως η υπολογιστική τομογραφία εκπομπής φωτονίου (SPECT), η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και η αξονική τομογραφία (CT). Εν συνεχεία, το τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει ένα από τα κεντρικά θέματα έρευνας, το οποίο είναι τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιεί η Πυρηνική Ιατρική και συγκεκριμένα τα συστήματα SPECT/CT και PET/CT. Αμφότερα, το δεύτερο και το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, αναλύονται συνοπτικά και με όσο το δυνατόν απλούστερο τρόπο προκειμένου να είναι κατανοητά σε όλους τους αναγνώστες και όχι μόνον σε όσους δραστηριοποιούνται σε πεδία σχετικά με την Πυρηνική Ιατρική.

Το τέταρτο κεφάλαιο, επικεντρώνεται στην σχέση Τεχνητής Νοημοσύνης και Πυρηνικής Ιατρικής. Πιο συγκεκριμένα, εξηγείται η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στο πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής και αναλύονται οι τρόποι με τους

οποίους δομείται προκειμένου να ανταπεξέλθει στις λειτουργίες της Πυρηνικής Ιατρικής.

Το πέμπτο κατά σειρά κεφάλαιο της εργασίας κάνει μια ανασκόπηση της συνολικής παρουσίας της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική επιχειρώντας να αναδείξει τις ευκαιρίες που παρουσιάζονται τόσο για την τελευταία, όσο και για την ευρύτερη Ιατρική, χωρίς ωστόσο να παραλείπει να αναφέρει και τις προκλήσεις-ευθύνες που καλείται να σεβαστεί. Συνοψίζοντας και μελετώντας διεξοδικά όλα τα παραπάνω κεφάλαια, ο αναγνώστης είναι σε θέση στο τελευταίο κεφάλαιο να λάβει γνώση για την παρούσα κατάσταση που υφίσταται στον κλάδο της Πυρηνικής Ιατρικής γενικότερα. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια μελλοντικής εκτίμησης της σχέσης Τεχνητής Νοημοσύνης-Πυρηνικής Ιατρικής, με την ελπίδα ενός καλύτερου μέλλοντος για τον άνθρωπο και υγεία.

Κεφάλαιο 1^ο : **Η Πυρηνική Ιατρική**

Κεφάλαιο 1^ο: Η Πυρηνική Ιατρική

1.1 Τι είναι η Πυρηνική Ιατρική;

Η Πυρηνική Ιατρική αποτελεί έναν σύγχρονο κλάδο της Ιατρικής ο οποίος χρησιμοποιεί ίχνη ραδιενεργών ουσιών για την διάγνωση, την θεραπεία αλλά και την έρευνα διαφόρων παθήσεων, όπως ορισμένοι τύποι καρκίνου και παθήσεις νευρολογικού ή καρδιακού τύπου. Η Πυρηνική Ιατρική διαφέρει από την παραδοσιακή ακτινολογία και τις τεχνικές ακτινοθεραπείας, όπου η ακτινοβολία εφαρμόζεται συνήθως από μία εξωτερική πηγή. Από την πρώτη εφαρμογή της την δεκαετία του 1950 εξελίχθηκε τάχιστα και πλέον υφίστανται ολόκληρα τμήματα Πυρηνικής Ιατρικής στα περισσότερα μεγάλα νοσοκομεία του πλανήτη [1].

1.2 Η χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής ως θεραπεία

Η Πυρηνική Ιατρική χρησιμοποιείται ως θεραπευτική μέθοδος κυρίως μέσω της ραδιοθεραπείας, δηλαδή της χρήσης ραδιενεργών υλικών για τη θεραπεία ασθενειών. Η ιδέα πίσω από τη ραδιοθεραπεία είναι να κατευθυνθεί η ραδιενεργός ακτινοβολία προς τον περιορισμένο χώρο ενός ασθενούς προκειμένου να καταστρέψει ή να ελέγξει ασταθείς ή κακοήθεις κύτταρα. Η συνηθέστερη χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής είναι η θεραπεία του καρκίνου του θυροειδούς. Γνωρίζουμε ότι το ιώδιο συγκεντρώνεται στον θυροειδή αδένα πράγμα που αποδεικνύει πως τα περισσότερα καρκινικά κύτταρα του θυροειδούς επίσης συσσωρεύουν ιώδιο. Επομένως, αν χορηγήσουμε μια δόση ραδιενεργού ιωδίου σε ασθενή με καρκίνο του θυροειδούς, η ραδιενέργεια θα συσσωρευτεί μέσα στα καρκινικά κύτταρα του θυροειδούς. Εάν χορηγηθεί επαρκές ραδιενεργό ιώδιο, τα καρκινικά κύτταρα θα σκοτωθούν από την ακτινοβολία και πιθανώς θα θεραπευτεί ο ασθενής. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προκειμένου να αποφευχθεί η βλάβη σε υγιή μέρη του σώματος όταν γίνεται εφαρμογή των θεραπειών της Πυρηνικής Ιατρικής. Ευτυχώς σε αυτή την περίπτωση, το ιώδιο δεν συσσωρεύεται σε σημαντικό βαθμό σε άλλα μέρη του σώματος, άρα η δόση ακτινοβολίας είναι σε χαμηλό ποσοστό. Το μεγαλύτερο ποσοστό της δόσης ακτινοβολίας στην θεραπεία της Πυρηνικής Ιατρικής προκύπτει από την απορρόφηση των σωματιδίων βήτα, τα οποία έχουν πολύ μικρή εμβέλεια στον ανθρώπινο ιστό (μερικά χιλιοστά ή λιγότερο). Η διαδικασία υπολογισμού των δόσεων ακτινοβολίας σε διάφορα μέρη του σώματος κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας της Πυρηνικής Ιατρικής είναι γνωστή ως δοσιμετρία και αποτελεί ένα σημαντικό υπόθεμα της φυσικής της Πυρηνικής Ιατρικής [2].

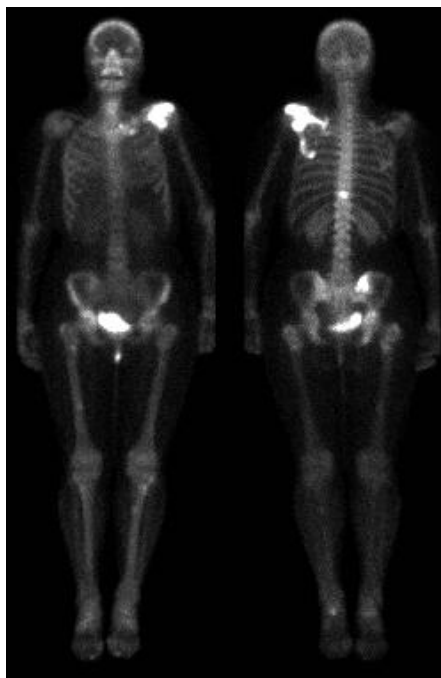
Ένα επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα του θεραπευτικής ιδιότητας της Πυρηνικής Ιατρικής αποτελεί η θεραπευτική ανακούφιση. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μείωση του πόνου με την χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής και των φαρμάκων της. Η χορήγηση ραδιονουκλεϊδίου για την καταστροφή στοχευμένων κυττάρων ονομάζεται ραδιομεταβολική θεραπεία. Οι θεραπείες με ραδιονουκλεΐδια χρησιμοποιούνται ευρέως στην αποτροπή των υποτροπών, μέσω της εξάλυψης των χαλαρών καρκινικών κυττάρων που μπορεί να οδηγήσουν σε μεταστατικό καρκίνο καθώς όλα τα κακοήθη καρκινικά κύτταρα πρέπει να καταστραφούν πλήρως. Επίσης, σε αυτής της μορφής την θεραπεία, τα ραδιοφάρμακα εκπέμπουν ιονίζουσα

ακτινοβολία που ταξιδεύει μόνο σε μικρή απόσταση στο σώμα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις ανεπιθύμητες παρενέργειες και τις βλάβες σε άλλα όργανα ή κοντινές δομές [1].

Επιπροσθέτως, κατά καιρούς, η Πυρηνική Ιατρική χρησιμοποιείται και σε χειρουργικές επεμβάσεις, όπως η αφαίρεση όγκων, προκειμένου να διασφαλίσει ότι όλα τα ασταθή ή κακοήγη κύτταρα θα διαλυθούν. Τέλος, η επιλογή της μεθόδου θεραπείας εξαρτάται από τον τύπο του καρκίνου, το στάδιο της νόσου και άλλους παράγοντες. Συνεπώς, η Πυρηνική Ιατρική ως θεραπεία συμβάλλει στην καταπολέμηση των διαφόρων μορφών νόσων, προσφέροντας μια εξειδικευμένη και αποτελεσματική προσέγγιση.

1.3 Η χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής στην διάγνωση

Η Πυρηνική Ιατρική χρησιμοποιείται συχνότερα ως προς την διάγνωση μιας νόσου. Σε αυτή την περίπτωση, χορηγείται μια ραδιενεργή ουσία στον ασθενή και έπειτα η κατανομή του στο σώμα απεικονίζεται με κάποιο είδος ανιχνευτή. Με την σειρά της η κατανομή της ραδιενεργής ουσίας μπορεί να απεικονιστεί με την πάροδο του χρόνου, παρέχοντας την δυνατότητα παρακολούθησης των αλλαγών (δυναμική απεικόνιση) ή μπορεί απλά να απεικονιστεί μόνο μια φορά (στατική απεικόνιση). Η βασική ιδέα είναι ότι η ραδιενεργή ουσία λειτουργεί ως ιχνηθέτης για μια συγκεκριμένη φυσιολογική διεργασία. Για να κατανοήσουμε την αρχή του ιχνηθέτη, μπορούμε να σκεφτούμε πολύ απλά έναν ιχνηθέτη που χρησιμοποιείται στην μηχανική, όπως είναι ο καπνός σε μια αεροδυναμική σήραγγα. Σε μια αεροδυναμική σήραγγα, ένα μικρό ποσοστό καπνού εγχέεται στο ρεύμα αέρος και μεταφέρεται πέραν του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει. Κατά αυτόν λοιπόν τον τρόπο, μαθαίνουμε σχετικά με τη ροή αέρος γύρω από το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Όσον αφορά γενικότερα τους ιχνηθέτες, θα πρέπει να συναντώνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις για να μην διαταράσσουν την ομαλότητα του συστήματος που προορίζονται να παρακολουθήσουν [2].



Εικόνα 1. Επίπεδη σάρωση των οστών ολόκληρου του σώματος που δείχνει ασθένεια στον αριστερό ώμο, τη σπονδυλική στήλη και την δεξιά λεκάνη.

Πηγή: *Upstate Medical University*

Στην Πυρηνική Ιατρική, μπορούμε να προχωρήσουμε σε παρόμοιες διαδικασίες με τις δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας για τη μέτρηση της πνευμονικής λειτουργίας. Αν ζητήσουμε από έναν ασθενή να εισπνεύσει ραδιενεργό αεροζόλ και εν συνεχεία ληφθεί μια απεικόνιση της κατανομής ραδιενέργειας, είμαστε σε θέση να δούμε εάν υπάρχουν περιοχές στον πνεύμονα που είναι ανεπαρκώς αεριζόμενες. Επίσης, μπορούμε να εγχύσουμε στο αίμα ραδιενεργά φάρμακα προκειμένου να εξεταστούν και άλλες παθήσεις. Το σημαντικό είναι να προσδιοριστεί το σημείο στο οποίο απορροφάται από τον ιστό σε αντιστοιχία με κάποια φυσιολογική διαδικασία. Στην συνέχεια τροποποιείται η ένωση προσθέτοντας ένα άτομο ραδιοϊσοτόπου, μια διαδικασία γνωστή ως «ραδιοσήμανση». Για παράδειγμα, μπορούμε να παρακολουθήσουμε τον σχηματισμό οστών χρησιμοποιώντας διφωσφονικό μεθυλένιο επισημασμένο με ραδιενεργό τεχνητό-99. Το διφωσφονικό συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με τα φυσικά φωσφορικά άλατα στο σώμα και ενσωματώνεται στα οστά, μεταφέροντας και το τεχνητό σε αυτό. Έτσι μπορούν να εντοπιστούν ανωμαλίες στον ρυθμό εναπόθεσης των οστών (βλέπε εικόνα 1). Τέλος, ο σχεδιασμός των ιχνηθετών της Πυρηνικής Ιατρικής είναι μια εξαιρετικά διεπιστημονική διαδικασία. Απαιτούνται ραδιοχημικοί για την κατασκευή του ιχνηθέτη, χρειάζονται φυσιολόγοι για να κατανοήσουν την συμπεριφορά του στο σώμα και απαιτούνται φυσικοί για την επίλυση θεμάτων δοσιμετρίας και απεικόνισης [2].

Εν έτη 2023, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την Πυρηνική Ιατρική ως μια ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία η οποία συμβάλλει καθοριστικά στον τομέα της υγείας. Η Πυρηνική Ιατρική είναι σημαντική καθώς προσφέρει πληροφορίες για τον ασθενή οι οποίες δεν θα ήταν τόσο εύκολο να ανακτηθούν με την χρήση έτερων διαγνωστικών απεικονιστικών μεθόδων. Σε αυτό συμβάλλει το γεγονός πως επικεντρώνεται στην εξέταση των φυσιολογικών λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος, παραβλέποντας την εξέταση της ανατομίας και της δομής του σώματος.

Εξάλλου, οι αλλαγές των λειτουργιών του ανθρωπίνου οργανισμού συντελούνται πριν τις αλλαγές που συμβαίνουν στην ανατομία. Με απλά λόγια, η Πυρηνική Ιατρική προσφέρει υψίστης σημασίας πληροφορίες στον εκάστοτε ιατρό σχετικές με την προδιάθεση, την ανίχνευση αλλά και την εξέλιξη μιας πάθησης, καθώς και σχετικές με την πορεία της θεραπείας που εφαρμόζεται [3].

Οι βασικές τεχνικές διάγνωσης που εφαρμόζονται στην Πυρηνική Ιατρική περιλαμβάνουν τη σκιαγράφιση με το ραδιενεργό στοιχείο τεχνητού τομογράφου (SPECT) και την τομογραφία εκπομπής θετικού ηλεκτρονίου (PET) με την παράλληλη εφαρμογή της Υπολογιστικής Τομογραφίας (CT) Έτσι καταλαβαίνει κανείς πως απαιτείται διαρκής ενημέρωση και εκπαίδευση των επαγγελματιών της Πυρηνικής Ιατρικής προκειμένου να είναι σε θέση να αξιοποιήσουν στον μέγιστο βαθμό τις προοπτικές της. Επιπλέον, η Πυρηνική Ιατρική ενσωματώνει γνωστικά αντικείμενα από διάφορες επιστήμες όπως η Φυσική, η Χημεία και η Φαρμακολογία. Γενικότερα οι εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής κρίνονται ασφαλείς για τον ανθρώπινο οργανισμό. Τα ραδιοφάρμακα δεν είναι τοξικά και αλλεργιογόνα ενώ περιέχουν μόνον ίχνη υλικού. Είναι χαρακτηριστικό πως η ποσότητα των ραδιοφαρμάκων που χορηγείται δεν ξεπερνά το 1,0 ml, σε αντίθεση με την συνήθη ποσότητα των σκιαγραφικών παραγόντων της μαγνητικής τομογραφίας (MRI) και της υπολογιστικής τομογραφίας (CT). Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον Π.Ο.Ι.¹, η Πυρηνική Ιατρική εφαρμόζει την χρήση ραδιενεργών ουσιών με στόχο την διάγνωση και την θεραπεία διαφόρων νόσων χωρίς όμως να επιτρέπεται η χρήση κλειστών πηγών για ακτινοθεραπεία. Εν κατακλείδι, η Πυρηνική Ιατρική είναι σημαντική καθώς προσφέρει μια έγκαιρη και στοχευμένη διάγνωση ακόμα και όταν μια νόσος βρίσκεται σε πολύ πρώιμο και ασυμπτωματικό στάδιο. Το γεγονός εξάλλου πως η ίδια έχει καθιερωθεί ως ξεχωριστή ιατρική ειδικότητα από το 1989, επιβεβαιώνει την σημασία της στην επιστήμη της Υγείας γενικότερα [4].

1.4 Οι τεχνικές διάγνωσης

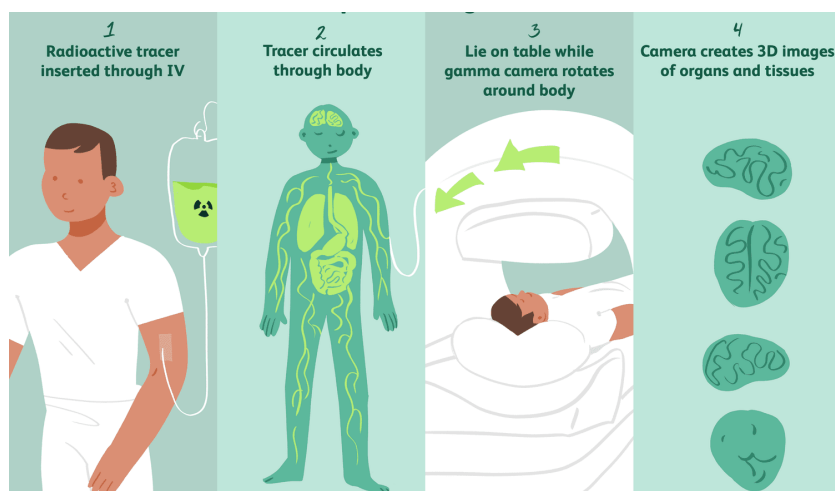
Στον τομέα της διάγνωσης χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές οι οποίες απεικονίζουν το σώμα. Αναλόγως με τον τύπο της εξέτασης που απαιτείται, χορηγείται στον εξεταζόμενο, ραδιοφάρμακο είτε με ένεση, είτε μέσω κατάποσης, είτε με εισπνοή, προκειμένου να γίνει χαρτογράφηση και αναγνώριση της περιοχής ανησυχίας. Εν συνεχεία, οι ραδιενεργές εκπομπές καταγράφονται μέσω μιας ειδικής συσκευής η οποία επιτρέπει την οπτικοποίηση με την βοήθεια υπολογιστή. Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι τεχνικές διάγνωσης της Πυρηνικής Ιατρικής, οι οποίες θεωρούνται υψίστης σημασία για την απεικόνιση, είναι οι εξής:

SPECT²: Κλινικές εικόνες μπορούν να ληφθούν μέσω πολλαπλών γωνιών, δημιουργώντας ένα αντίγραφο του ανθρωπίνου σώματος μέσω μια τεχνικής που ονομάζεται **τομογραφία εκπομπής μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων (SPECT)**. Στην εφαρμογή της SPECT, ο ασθενής λαμβάνει ένα ραδιονουκλεΐδιο που εκπέμπει γάμμα ακτινοβολία (**βλέπε εικόνα 2**). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται μια περιστρεφόμενη κάμερα-γ προκειμένου να ληφθούν εικόνες της κατανομής του ραδιοφαρμάκου στο σώμα του ασθενούς από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Κατά

¹ Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

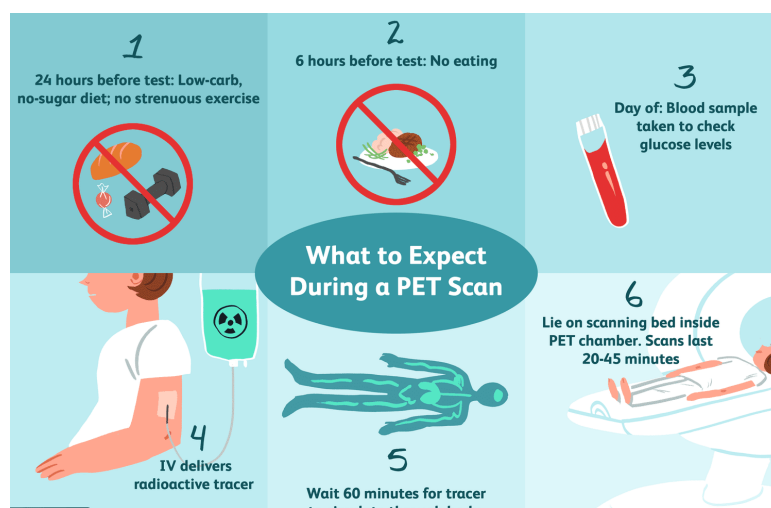
² Single Photon Emission Computed Tomography

αυτόν τον τρόπο τα συστήματα SPECT έχουν την δυνατότητα να εντοπίζουν με μοναδική ακρίβεια την ανωμαλία στο σώμα του ασθενούς μέσω τρισδιάστατης (3D) εικόνας της κατανομής του ραδιοφαρμάκου [1].



Εικόνα 2. Διαδικασία εφαρμογής της SPECT
Πηγή: Verywell Health

PET³. Με την σειρά της, η **τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET)** θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ανίχνευση και την διαχείριση του καρκίνου και λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως η SPECT. Η μόνη διαφορά είναι πως χρησιμοποιεί ραδιοϊσότοπα που γενικά διασπώνται ταχύτερα και παράγουν δύο ακτίνες που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτής της μορφής ειδική διαμόρφωση ενός συστήματος PET επιτρέπει την τρισδιάστατη ανακατασκευή της κατανομής του ραδιοφαρμάκου. Εν τούτοις, οι τρισδιάστατες εικόνες της Πυρηνικής Ιατρικής μπορούν να είναι επάλληλες, χρησιμοποιώντας λογισμικό ή υβριδικές κάμερες σε εικόνες από υπολογιστικούς τομογράφους (CT) ή μαγνητικούς τομογράφους για να επισημανθεί το σημείο του σώματος στο οποίο συγκεντρώνεται το ραδιοφάρμακο (**βλέπε εικόνα 3**) [1].



Εικόνα 3. Διαδικασία εφαρμογής της PET
Πηγή: Verywell Health

³ Positron Emission Tomography

Από την άλλη πλευρά, ο συνδυασμός ανατομικών και λειτουργικών πληροφοριών που παρέχονται από την υβριδική απεικόνιση συστημάτων, αυξάνει την ευαισθησία και την ειδικότητα των ιατρικών εξετάσεων, ιδιαίτερα σε δύσκολες περιπτώσεις. Έτσι η συνολική χρήση των διαδικασιών της Πυρηνικής Ιατρικής επεκτείνεται ραγδαία κυρίως λόγω της βελτίωσης των ιατροτεχνολογικών προϊόντων και της παραγωγής ενός αυξανόμενου αριθμού συγκεκριμένων ραδιοϊχνηθετών, οι οποίοι επιτρέπουν την απεικόνιση περισσότερων ασθενειών [1].

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, όπως είναι φυσικό, η ασφάλεια κατά την χρήση της Πυρηνικής Ιατρικής είναι ένα θέμα που απασχολεί την πλειοψηφία όσων δραστηριοποιούνται σε αυτό το πεδίο. Οι ανησυχίες για την έκθεση στην ακτινοβολία είναι σαφώς γνωστές στο ευρύ κοινό και δη στους ασθενείς. Αντ' αυτού οι εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής είναι ασφαλείς και ανώδυνες. Επιπλέον, το ιατρικό προσωπικό ακολουθεί αυστηρούς κανόνες και είναι εκπαιδευμένο στο να εξασφαλίζει την υγεία των ασθενών που τους χορηγούνται ραδιοϊσότοπα για διαγνωστικούς ή θεραπευτικούς σκοπούς. Κοινώς τα οφέλη της Πυρηνικής Ιατρικής υπερτερούν κατά πολύ των ενδεχόμενων αρνητικών της παραγόντων [1].

Κεφάλαιο 2^ο : **Τα συστήματα απεικόνισης**

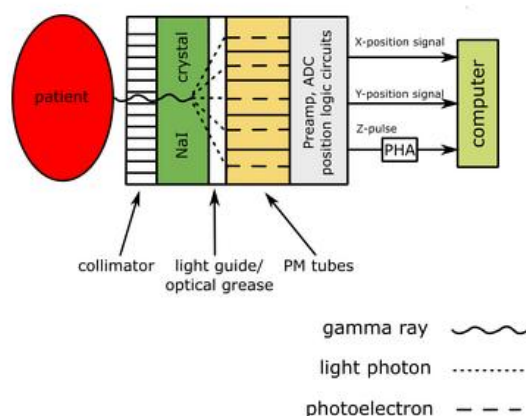
Κεφάλαιο 2^ο: Τα συστήματα απεικόνισης

2.1 Οι ανιχνευτές της Πυρηνικής Ιατρικής

Οι ανιχνευτές της Πυρηνικής Ιατρικής προσδιορίζονται σε συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της ακτινοβολίας που παράγεται από ραδιοακτινοβόλουμενα υλικά που εισέρχονται στον οργανισμό κατά τη διαδικασία της πυρηνικής ιατρικής. Στον κόσμο της Πυρηνικής Ιατρικής, οι ανιχνευτές θεωρούνται ιδιαίτερης σημασίας καθώς είναι υπεύθυνοι για την διεργασία της καταγραφής και ανίχνευσης της ακτινοβολίας που παράγεται από τις ραδιοφαρμακευτικές ουσίες που εντοπίζονται στον ανθρώπινο οργανισμό [5].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανιχνευτών πυρηνικής ιατρικής, ο καθένας από τους οποίους έχει σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές στον τομέα της Πυρηνικής Ιατρικής:

- **Ανιχνευτές σπινθηρισμού (Scintillation Detectors):** Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού χρησιμοποιούν κρυστάλλους, όπως το ιωδιούχο νάτριο ή το οξυορθοπυριτικό λουτέσιο (LSO), οι οποίοι εκπέμπουν λάμπει φωτός (σπινθηρισμούς) όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε κάμερες Γάμμα για επίπεδη απεικόνιση και υπολογιστική τομογραφία εκπομπής ενός φωτονίου (SPECT). Επίσης χρησιμοποιούνται σε σαρωτές τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET).



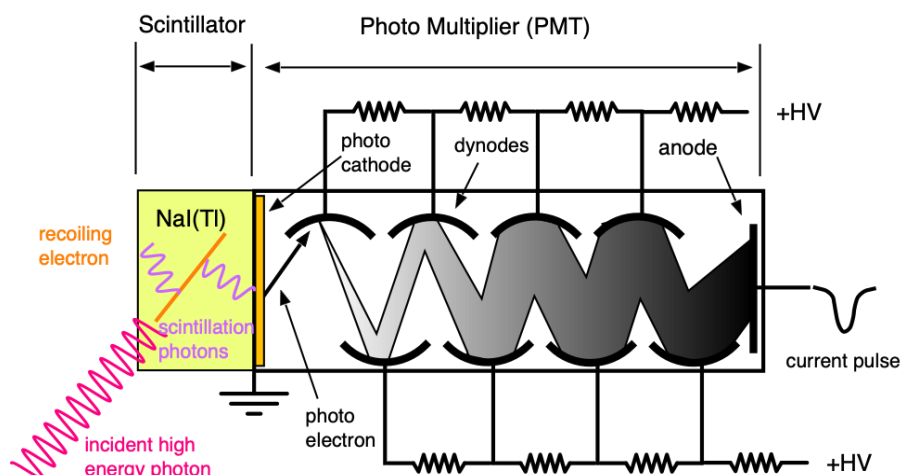
Εικόνα 4. Δομή Κάμερας Γάμμα
Πηγή: Radiopaedia

- **Κάμερες Γάμμα (Gamma Cameras):** Οι κάμερες Γάμμα είναι ένας τύπος συστήματος ανιχνευτή σπινθηρισμού που χρησιμοποιείται για επίπεδη απεικόνιση. Ανιχνεύουν τις ακτίνες Γάμμα που εκπέμπονται από ραδιοφάρμακα, παράγοντας διδιάστατες εικόνες (2D) της κατανομής του ραδιενεργού ιχνηθέτη στο σώμα. Οι κάμερες Γάμμα χρησιμοποιούνται συνήθως για την απεικόνιση οργάνων και ιστών, την αξιολόγηση της λειτουργίας των οργάνων και την ανίχνευση ανωμαλιών ή ασθενειών (βλέπε εικόνα 4).

- **Ανιχνευτές PET:** Οι ανιχνευτές τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) έχουν σχεδιαστεί για να ανιχνεύουν ζεύγη ακτίνων Γάμμα που παράγονται από την εξαύλωση ενός ποζιτρονίου και ενός ηλεκτρονίου. Οι ανιχνευτές PET είναι ζωτικής σημασίας στοιχεία των σαρωτών PET, παρέχοντας λεπτομερείς τρισδιάστατες εικόνες (3D) των φυσιολογικών διεργασιών του σώματος. Η PET χρησιμοποιείται συχνά για τη διάγνωση και την εξέλιξη ενός ασθενή με καρκίνο.
- **Γάμμα ανιχνευτές:** Οι ανιχνευτές Γάμμα είναι φορητές συσκευές εξοπλισμένες με ανιχνευτές σπινθηρισμού. Οι χειρουργοί τους χρησιμοποιούν κατά τη διάρκεια των επεμβάσεων για την ανίχνευση και τον εντοπισμό των ραδιενεργών ιχνηθετών που εγχέονται σε συγκεκριμένους ιστούς ή όργανα. Επίσης, χρησιμοποιούνται συνήθως σε χειρουργικές επεμβάσεις, ιδίως για τον εντοπισμό φραγμένων λεμφαδένων σε επεμβάσεις καρκίνου.
- **Ανιχνευτές ακτίνων-X:** Οι ανιχνευτές ακτίνων-X χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής, όπως οι υβριδικές μέθοδοι απεικόνισης SPECT/CT και PET/CT. Αυτοί οι ανιχνευτές συλλαμβάνουν τις ακτίνες-X που μεταδίδονται μέσω του σώματος ή εκπέμπονται κατά την απεικόνιση PET. Οι ανιχνευτές ακτίνων-X παρέχουν ανατομικές πληροφορίες σε συνδυασμό με λειτουργικές εικόνες της Πυρηνικής Ιατρικής, ενισχύοντας τη διαγνωστική ακρίβεια.
- **Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης:** Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των ανιχνευτών που βασίζονται σε ημιαγωγούς, θεωρούνται αρκετά διαδεδομένοι στην Πυρηνική Ιατρική. Προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως η βελτιωμένη ενεργειακή ανάλυση και η χωρική ανάλυση. Χρησιμοποιούνται σε προηγμένα συστήματα απεικόνισης για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας και της ποσοτικής ακρίβειας [5].

Το σύνολο των ανιχνευτών συμβάλλει στην παραγωγή εικόνων και στην ανίχνευση της ακτινοβολίας που υπάρχει στις διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές στον τομέα της Πυρηνικής Ιατρικής. Σημαντικό επίσης να αναφέρουμε πως η χρήση φωτονίων στην Πυρηνική Ιατρική παρουσιάζει υψηλότερα ποσοστά ενέργειας σε σχέση με εκείνα που συναντώνται στην απεικόνιση με ακτίνες X. Ωστόσο σε συστήματα απεικόνισης που χρησιμοποιούν φιλμ δεν καταγράφονται υψηλά ποσοστά ενεργειών καθώς τα φωτόνια υψηλής ενέργειας διέρχονται απευθείας μέσα από το φιλμ [6].

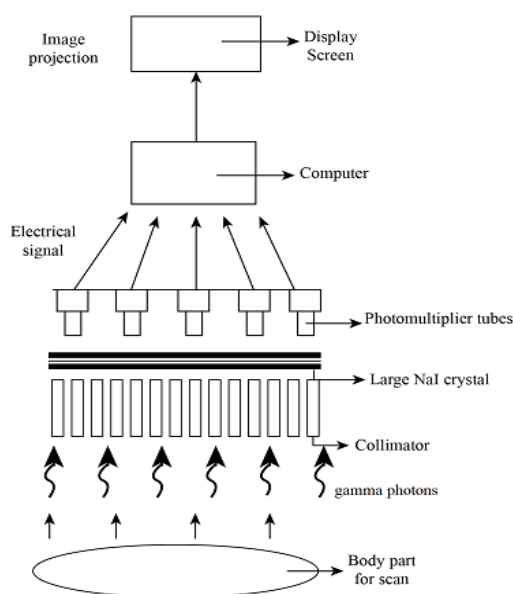
Πέραν όλων των προαναφερθέντων, ο κύριος ανιχνευτής που χρησιμοποιεί η Πυρηνική Ιατρική είναι ο ανιχνευτής σπινθηρισμού. Ο ανιχνευτής σπινθηρισμού απαρτίζεται από έναν κρύσταλλο ο οποίος είναι τοποθετημένος σε έναν σωλήνα (φωτοπολλαπλασιαστής).



Εικόνα 5. Λειτουργία Ανιχνευτή Σπινθηρισμού
Πηγή: Radiology Key

Οι ακτίνες Γ που εισέρχονται αλληλοεπιδρούν με τον σπινθηριστή και δημιουργούν μια λάμψη σπινθηρισμού. Εν συνεχεία, τα φωτόνια εκτοπίζουν φωτοηλεκτρόνια μέσω της καθόδου στο σωλήνα-φωτοπολλαπλασιαστή. Αυτή η συνθήκη εξακολουθεί να υφίσταται σε ολόκληρο τον σωλήνα, οδηγώντας στην εμφάνιση πληθώρας ηλεκτρονίων. Η χρονική διάρκεια σχετικά με την ένταση και την εξασθένιση της λάμψης σπινθηρισμού καθορίζεται από τον σπινθηριστή (βλέπε εικόνα 5).

Από την άλλη πλευρά, ο ανιχνευτής σπινθηρισμού αποκλειστικά δεν θεωρείται συσκευή απεικόνισης. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της παρουσίας ενός φωτονίου υψηλής ενέργειας, όπως και για την καταγραφή της ενέργειάς του. Ωστόσο για να λάβουμε εικόνα πρέπει να εντοπιστεί η θέση αλληλεπίδρασης του φωτονίου με τον ανιχνευτή και η κατεύθυνση κίνησής του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση της κάμερας Anger (βλέπε εικόνα 6) η οποία απαρτίζεται από έναν σπινθηροβόλο κρύσταλλο με σχεδόν 50 φωτοπολλαπλασιαστές στο οπίσθιο μέρος του [6].



Εικόνα 6. Λειτουργία Κάμερας Anger
Πηγή: Stanford University

2.2 Επίπεδη απεικόνιση

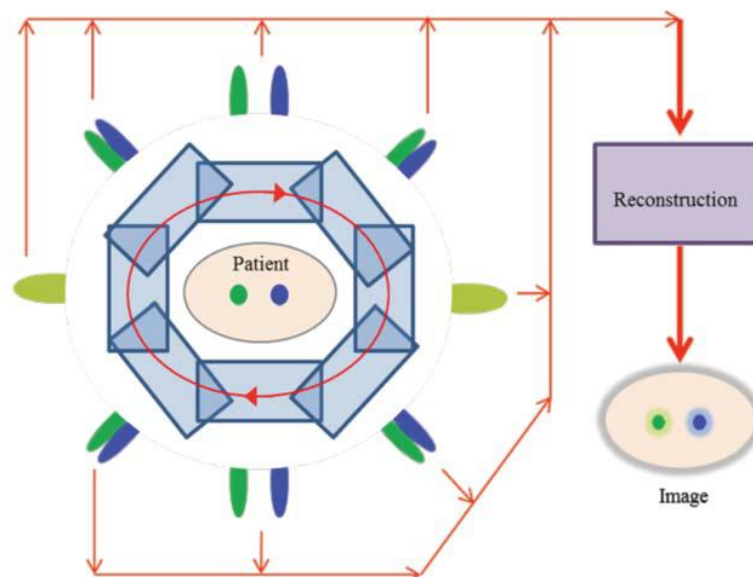
Η επίπεδη απεικόνιση στην Πυρηνική Ιατρική αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της διαγνωστικής διαδικασίας, το οποίο επιτρέπει την οπτικοποίηση της εσωτερικής δομής και λειτουργίας του ανθρώπινου σώματος με την χρήση ραδιενεργών ουσιών. Οι τεχνικές επίπεδης απεικόνισης παρέχουν πληροφόρηση σχετικά με τον μεταβολισμό και την αναπαραγωγική ικανότητα των οργάνων και των ιστών.

Από τους βασικότερους τύπους επίπεδης απεικόνισης στην Πυρηνική Ιατρική είναι η γενικευμένη απεικόνιση των εκπεμπόμενων ακτινοβολιών Γάμμα. Σε αυτήν την περίπτωση απεικόνισης, ένας ανιχνευτής καταγράφει τις ακτινοβολίες Γάμμα που εκπέμπονται από το ραδιοφαρμακευτικό υλικό στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία ενός εικονικού χάρτη, ο οποίος αναπαριστά την κατανομή του ραδιοφαρμάκου εντός του σώματος.

Η επίπεδη απεικόνιση στην Πυρηνική Ιατρική έχει αναπτυχθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Στο σήμερα προσφέρει πληροφορίες που είναι καθοριστικές για τη διάγνωση και τον προσανατολισμό του ιατρικού πεδίου. Αυτές οι τεχνικές δίνουν στους ιατρούς τη δυνατότητα να εξετάζουν τον οργανισμό σε μοριακό επίπεδο, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την ακριβή διάγνωση και τον καθορισμό της θεραπείας [3].

2.3 Η υπολογιστική τομογραφία εκπομπής φωτονίου (SPECT)

Η υπολογιστική τομογραφία εκπομπής φωτονίου (SPECT) είναι μια τεχνική τομογραφικής απεικόνισης της Πυρηνικής Ιατρικής η οποία περιλαμβάνει την τοποθέτηση της κεφαλής της κάμερας γύρω από το σώμα συσσωρεύοντας δεδομένα σε συγκεκριμένα γωνιακά διαστήματα με βάση την δομή. Η αρχή της συλλογής δεδομένων και της ανακατασκευής είναι κοινή με τις υπόλοιπες τομογραφικές τεχνικές όπως π.χ. η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και η υπολογιστική τομογραφία (CT), χρησιμοποιώντας φιλτραρισμένη προβολή με την πιο πρόσφατη εμφάνιση των επαναληπτικών μεθόδων ανασχηματισμού. Η SPECT είναι σε θέση να παρέχει τρισδιάστατες πληροφορίες οι οποίες τυπικά παρουσιάζονται ως διασταυρούμενες διατομές του ασθενούς και μπορούν ελεύθερα να διαμορφωθούν ή να χρησιμοποιηθούν όπως απαιτείται [7].



Εικόνα 7. Σχηματική αναπαράσταση των εντολέων της SPECT
Πηγή: Journal of Nuclear Medicine

Τόσο η SPECT όσο και η PET παρέχουν δεδομένα σύμφωνα με την ποσότητα των εγχυμένων ραδιοφαρμάκων, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους απεικόνισης που χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς. Το ραδιοφάρμακο χορηγείται στον ασθενή και με βάση τις ιδιότητες βιοκατανομής του, απορροφάται από διαφορετικά όργανα. Η πλειοψηφία των ραδιοφαρμάκων αυτών εμπεριέχει ραδιονουκλεΐδια τα οποία εκπέμπουν φωτόνια ακτίνων Γάμμα. Βέβαια, η SPECT διαφέρει από την υπολογιστική τομογραφία (CT) καθώς η ακτινοβολία πηγάζει από το εσωτερικό του ασθενούς και όχι από το εξωτερικό του. Στόχος της γενικότερα είναι ο ακριβής προσδιορισμός της τρισδιάστατης κατανομής ραδιενέργειας η οποία οφείλεται στην λήψη του ραδιοφαρμάκου από τον ασθενή. Επιπλέον, κάνει χρήση των συνηθισμένων ραδιοφαρμάκων που προτιμά η Πυρηνική Ιατρική και όχι εκείνων που εκπέμπουν ποζιτρόνια. Επίσης σημαντικός παράμετρος στην SPECT είναι η ποσότητα χορήγησης του ραδιοφαρμάκου καθώς καθορίζεται από την επιτρεπόμενη δόση ακτινοβολίας στον ασθενή [7].



Εικόνα 8. Η απεικόνιση με SPECT
Πηγή: Netmeds

Τα τελευταία χρόνια, η SPECT έχει υποστεί σημαντική βελτίωση όπως: πολλαπλοί ανιχνευτές, προοδευτική ψηφιοποίηση του επίκτητου σήματος και υψηλότερη ακρίβεια μέτρησης. Όμως η πιο σημαντική πρόοδος ήταν η ανάπτυξη του υβριδικού

συστήματος SPECT με ενσωματωμένο CT (SPECT/CT). Από την άλλη πλευρά, η συμπληρωματική φύση των πληροφοριών που παρέχονται από τους διαφορετικούς τρόπους απεικόνισης είναι εύκολα κατανοητή από τις επιστήμες της ιατρικής ακτινοβολίας. Η καταχώρηση εικόνων μέσω διαφόρων τρόπων λειτουργίας μπορεί να προσφέρει μια εξαιρετικά συμφέρουσα προσέγγιση σχετικά με τον εντοπισμό, την συσχέτιση και την ποσοτικοποίηση των περιφερειακών αλλαγών στην ανατομία και την λειτουργία. Με βάση τις πρόσφατες εξελίξεις λογισμικού και υλικού έχει ενεργοποιηθεί η υβριδική απεικόνιση η οποία μελλοντικά θα βελτιώσει περαιτέρω το κλινικό περιβάλλον. Στην πράξη η απεικόνιση με SPECT εφαρμόζεται για:

- Περιπτώσεις άνοιας
- Περιπτώσεις εγκεφαλίτιδας
- Περιπτώσεις εγκεφαλοαγγειακών νόσων
- Επιβεβαίωση του εγκεφαλικού θανάτου
- Περιπτώσεις στεφανιαίας νόσου κ.α.

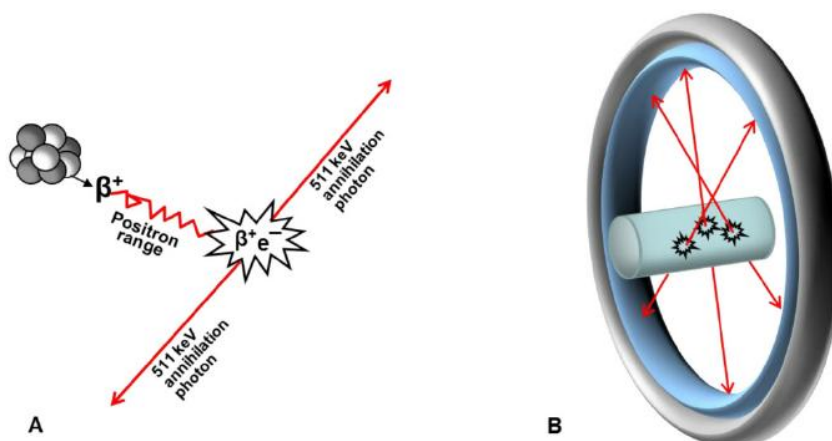
Τέλος, οι απεικονίσεις SPECT συνεισφέρουν στην διάγνωση μη καρδιακών και μη νευρολογικών παθήσεων [7].

2.4 Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET)

Ένα άλλο σημαντικό πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής θεωρείται και η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET). Η PET παρέχει πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία και την ανατομία του ασθενούς. Κατ' επέκταση είναι υψίστης σημασίας για την διάγνωση της λειτουργίας ενός ιστού. Επίσης, η PET είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό και την χορήγηση της θεραπείας που απαιτείται. Η PET στηρίζεται σε δύο αρχές:

- Στην ραδιενέργεια β^+
- Στην εξαύλωση ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου

Όσον αφορά την ραδιενέργεια β^+ διακρίνεται από την εκπομπή ενός ποζιτρονίου. Αντιθέτως, η εξαύλωση χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ ποζιτρονίου και ηλεκτρονίου όπου εν συνεχεία μετατρέπονται σε φωτόνια. Γενικότερα, η PET ανήκει στον χώρο των μοριακών και λειτουργικών απεικονίσεων χρησιμοποιώντας ραδιενεργά ισότοπα. Εκείνα χορηγούνται στο εξεταζόμενο σύστημα και κινούνται προς την περιοχή εξέτασης, όπου το ραδιοφάρμακο διασπάται σε επιμέρους ποζιτρόνια. Βεβαίως, για την καταγραφή είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικών ανιχνευτών ακτινοβολίας. Αυτού του είδους οι ανιχνευτές είναι συνδεδεμένοι με ένα κύκλωμα σύμπτωσης, το οποίο αποκλείει τις μετρήσεις φωτονίων που δεν έχουν ως πηγή προέλευσης το ίδιο γεγονός (φαινόμενο εξαύλωσης) [8].



Εικόνα 9. Εξασύλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου
Πηγή: Radiology Key

Η PET αναπλάθει μια διδιάστατη εικόνα μέσω των μονοδιάστατων προβολών. Επίσης μπορούν να γίνουν 3D ανακατασκευές με την χρήση διδιάστατων προβολών από πολλαπλές γωνίες. Συνεπώς, έπειτα από τις απαιτούμενες διορθώσεις αναφορικά με την εξασθένηση και την σκέδαση των ακτίνων Γ εντός του σώματος, παρέχονται οι ακριβείς εικόνες σχετικά με την κατανομή των ισοτόπων. Επιπροσθέτως, οι απεικονίσεις της PET μπορούν να αξιοποιηθούν ως προς την ποιοτική αξιολόγηση συσσωρευμένων ιχνηθετών, όπως επίσης και στην ποσοτική μέτρηση της πρόσληψης ιχνηθετών, προκειμένου να παρέχεται μια λεπτομερής εικόνα της νόσου [8].

Γενικότερα, η PET έχει συμβάλει ενεργά στην μελέτη του Alzheimer, του Parkinson, της επιληψίας και άλλων σοβαρών νόσων. Πρόσφατες μελέτες επίσης έχουν αναδείξει την χρησιμότητα της στον εντοπισμό όγκων. Επιπλέον, με την PET μελετάται ποσοτικά ο μεταβολισμός του όγκου επιτρέποντας την μη επεμβατική σταθεροποίηση της νόσου. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις λοιπές τεχνικές απεικόνισης, η PET είναι σε θέση να εντοπίσει ποσοτικά και να παρουσιάσει τις συγκεντρώσεις ιχνηθετών στην θέση των νανομορίων. Τέλος, πολύ σημαντική της ιδιότητα θεωρείται η ικανότητα της να διακρίνει του καλοήθεις από τους κακοήθεις όγκους [8].

2.5 Η αξονική τομογραφία (CT)

Η αξονική τομογραφία (CT) είναι αναμφίβολα μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες στην ιατρική απεικόνιση καθώς μας προσφέρει απεικονίσεις μέσα στο ανθρώπινο σώμα οι οποίες είναι πολύ σημαντικές για το ιατρικό προσωπικό. Η αξονική τομογραφία με την σειρά της αποτελεί μια ηλεκτρονική διαδικασία απεικόνισης στην οποία μια στενή δέσμη ακτίνων X στοχεύει έναν ασθενή και περιστρέφεται γρήγορα γύρω από το σώμα του, παράγοντας σήματα που επεξεργάζονται από τον υπολογιστή του μηχανήματος προκειμένου να δημιουργήσουν εικόνες διατομής. Αυτές οι εικόνες διατομής ονομάζονται τομογραφικές εικόνες και μπορούν να προσφέρουν στον κλινικό ιατρό πιο λεπτομερείς πληροφορίες από τις συμβατικές ακτινογραφίες. Αφότου συλλεχθεί ένας αριθμός διαδοχικών εικόνων από τον υπολογιστή του μηχανήματος, μπορούν να ταξινομηθούν ψηφιακά μεταξύ τους προκειμένου να σχηματιστεί μια τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση του ασθενούς. Με την σειρά της αυτή η απεικόνιση επιτρέπει την ευκολότερη αναγνώριση βασικών δομών καθώς και πιθανών όγκων ή ανωμαλιών [9].

Σε αντίθεση με μια συμβατική ακτινογραφία η οποία χρησιμοποιεί ένα σταθερό σωλήνα ακτίνων Χ, ένας αξονικός τομογράφος χρησιμοποιεί μια μηχανοκίνητη πηγή ακτίνων Χ που περιστρέφεται γύρω από το στρογγυλό άνοιγμα μιας δομής σε σχήμα κυκλικό. Κατά τη διάρκεια μιας αξονικής τομογραφίας, ο ασθενής ξαπλώνει σε ένα κρεβάτι που κινείται αργά μέσα από την δομή, ενώ ο σωλήνας ακτίνων Χ περιστρέφεται γύρω από τον ασθενή, εκτοξεύοντας στενές δέσμες ακτίνων μέσω του σώματος. Αντί για φιλμ, οι τομογράφοι χρησιμοποιούν ειδικούς ψηφιακούς ανιχνευτές ακτίνων Χ, οι οποίοι βρίσκονται ακριβώς απέναντι από την πηγή προέλευσης των ακτίνων. Έτσι λοιπόν καθώς οι ακτίνες Χ φεύγουν από τον ασθενή, παραλαμβάνονται από τους ανιχνευτές και μεταδίδονται σε υπολογιστή. Κάθε φορά που η πηγή ακτίνων Χ ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή, ο υπολογιστής του τομογράφου χρησιμοποιεί εξελιγμένες μαθηματικές τεχνικές για να κατασκευάσει μια δισδιάστατη τομή της εικόνας του ασθενούς. Το πάχος του ιστού που απεικονίζεται σε κάθε κομμάτι εικόνας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το μηχάνημα τομογραφίας που χρησιμοποιείται αλλά συνήθως κυμαίνεται από 1-10 χιλιοστά. Με το πέρας της διαδικασίας, η εικόνα αποθηκεύεται και το μηχανοκίνητο κρεβάτι μετακινείται σταδιακά προς τα εμπρός. Στη συνέχεια, η διαδικασία σάρωσης επαναλαμβάνεται για να παραχθεί μια άλλη εικόνα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να συλλεχθεί ο επιθυμητός αριθμός εικόνων [9].



Εικόνα 10. Αξονικός Τομογράφος
Πηγή: Euromedica

Η αξονική τομογραφία (CT) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας περιστροφής της τρισδιάστατης εικόνας στο χώρο ή της προβολής τμημάτων διαδοχικά, διευκολύνοντας την εύρεση του ακριβούς σημείου όπου μπορεί να εντοπιστεί ένα πρόβλημα. Επιπλέον χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ασθένειας ή τραυματισμού σε διάφορες περιοχές του σώματος. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως θεωρείται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο προσυμπτωματικού ελέγχου για την ανίχνευση πιθανών όγκων ή βλαβών εντός της κοιλίας. Εν τοις πράγμασι, μπορεί να εκτελεστεί μια αξονική τομογραφία όταν υπάρχουν υποψίες διαφόρων τύπων καρδιακών παθήσεων. Επιπροσθέτως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του εγκεφάλου, προκειμένου να εντοπιστούν τραυματισμοί, όγκοι και θρόμβοι που οδηγούν σε εγκεφαλικό επεισόδιο, αιμορραγία και άλλες καταστάσεις. Τέλος, είναι ιδιαίτερα σημαντική η συμβολή της κατά την

απεικόνιση σύνθετων καταγμάτων οστών, σοβαρής διάβρωσης αρθρώσεων ή όγκων των οστών, καθώς συνήθως παράγει περισσότερες λεπτομέρειες από ό,τι θα ήταν δυνατό με μια συμβατική ακτινογραφία [9].

Κεφάλαιο 3^ο :
Τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης SPECT/CT & PET/CT

Κεφάλαιο 3^ο: Τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης SPECT/CT & PET/CT

3.1 Τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης

Με τον όρο υβριδικά συστήματα απεικόνισης αναφερόμαστε σε εκείνα τα συστήματα τα οποία παρέχουν απεικονιστικές εξετάσεις οι οποίες συνδυάζουν και συγχωνεύουν ταυτόχρονα εικόνες από δύο ξεχωριστές απεικονιστικές μεθόδους, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τις πληροφορίες για διάφορες παθήσεις. Η πιο δημοφιλής υβριδική απεικόνιση είναι η PET/CT η οποία συνδυάζει απεικονίσεις της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και απεικονίσεις της αξονικής τομογραφίας (CT). Αντίστοιχα εφαρμόζεται και η υπολογιστική τομογραφία εκπομπής ενός φωτονίου (SPECT) σε συνδυασμό με την αξονική τομογραφία (CT) [10].

Ωστόσο, μόλις την τελευταία δεκαετία παρατηρήθηκε η ανάπτυξη τεχνολογιών υβριδικής απεικόνισης. Εξαρχής καταδείχθηκε η υπεροχή των PET/CT και SPECT/CT έναντι των αυτόνομων PET και SPECT όσον αφορά τη διαγνωστική ακρίβεια. Επίσης, τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από την χρήση αυτών των συστημάτων σε διάφορες κλινικές περιπτώσεις δείχνουν ότι αυτή η υβριδική τεχνολογία βελτιώνει την διαγνωστική ακρίβεια σε σύγκριση για παράδειγμα με το σπινθηρογράφημα και την αξονική τομογραφία (CT), ακόμα και αν επιχειρούσαμε την παράλληλη ερμηνεία τους. Βέβαια η βελτιωμένη διαγνωστική ακρίβεια αποδίδεται στην βελτίωση της ποιότητας εικόνας της SPECT και της PET, στον εύστοχο εντοπισμό της νόσου και στην διαφοροποίηση μεταξύ φυσιολογικής και παθολογικής πρόσληψης [11].

Επιπροσθέτως, τα υβριδικά συστήματα απεικόνισης έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα της συμβατικής Πυρηνικής Ιατρικής. Ομοίως ένα χρήσιμο βήμα είναι η παρουσίαση υβριδικών καμερών που συνδυάζουν PET και MRI⁴. Αυτά τα συστήματα θα οδηγήσουν την ιατρική απεικόνιση σε νέους ορίζοντες και θα προσφέρουν ουσιαστικά απεριόριστες δυνατότητες ταυτόχρονης απόκτησης μορφολογικών, λειτουργικών και μοριακών πληροφοριών για το ανθρώπινο σώμα [12].

3.2 PET/CT

Οι ταυτόχρονες τεχνολογικές αναβαθμίσεις στα συστήματα PET και CT αξιοποιήθηκαν ως προς την ανάπτυξη ενός συνδυασμένου συστήματος PET/CT. Στην PET, τα νέα υλικά ανιχνευτών και οι προσεγγίσεις για την απεικόνιση αύξησαν την χωρική ανάλυση και ενίσχυσαν την στατική ποιότητα εικόνας. Στα συστήματα CT, η εισαγωγή της σπειροειδούς σάρωσης και της τεχνολογίας πολλαπλών ανιχνευτών επέτρεψε την τάχιστα απόκτηση δεδομένων σε ένα εκτεταμένο πλαίσιο. Όλες αυτές οι αναβαθμίσεις προϋπέθεταν ότι τα συνδυασμένα συστήματα PET/CT ήταν καλά τοποθετημένα προκειμένου να πλεονεκτούν στην συλλογή δεδομένων και να διαδραματίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ογκολογίας. Η

⁴ Magnetic Resonance Imaging

προσθήκη χωρικά καταχωρημένων ανατομικών πληροφοριών από τα εξαρτήματα των συστημάτων CT του συνδυασμένου σαρωτή έδωσε ώθηση για ευρεία αποδοχή των συστημάτων PET στην ογκολογία και οδήγησε στην ταχεία ανάπτυξη της οργάνωσης των PET/CT. Φτάνοντας λοιπόν στο σήμερα, τα συστήματα PET/CT είναι ευρέως αποδεκτά από την ιατρική κοινότητα, τόσο που τα απλά συστήματα της PET δεν παράγονται από τους κολοσσούς του χώρου [13].

Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πρώιμα συστήματα PET/CT δεν ήταν απολύτως ενοποιημένα και αποτελούνταν από ξεχωριστά εξαρτήματα των συστημάτων PET και CT τα οποία λειτουργούσαν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Δεδομένου ότι οι απεικονίσεις των συστημάτων PET/CT πραγματοποιούνταν διαδοχικά και όχι ταυτόχρονα, αυτή η προσέγγιση ήταν λογική, αλλά σήμαινε ότι απαιτούνταν πολλαπλά υπολογιστικά συστήματα ενώ η διεπαφή με τον χρήστη μπορεί να είναι δύσκολη. Επιπροσθέτως, η διαθεσιμότητα του συστήματος της CT για διόρθωση της εξασθένησης σήμαινε ότι το σύστημα σάρωσης μετάδοσης της PET ήταν περιττό. Τα επακόλουθα σχέδια αφαίρεσαν τις πηγές μετάδοσης των PET και οδήγησαν τα δυο υποσυστήματα σε μεγαλύτερη ενοποίηση. Αυτό λοιπόν σε ορισμένες περιπτώσεις σήμαινε ένα πιο συμπαγές σύστημα. Σε άλλες περιπτώσεις, οι γέφυρες τους χωρίστηκαν με ένα κενό το οποίο επέτρεπε μεγαλύτερη πρόσβαση στον ασθενή κατά την σάρωση. Αυτό επιτεύχθηκε περαιτέρω με την αφαίρεση των διαφραγμάτων από τα υποσυστήματα της PET και με την μείωση του μεγέθους των ακραίων ασπίδων που χρησιμοποιούνται για την απόρριψη της ακτινοβολίας. Παρόλο που οι ανιχνευτές των PET και CT παραμένουν ξεχωριστά υποσυστήματα, πολλές λειτουργίες λογισμικού ενός σύγχρονου συστήματος PET/CT τρέχουν σε κοινή πλατφόρμα συμπεριλαμβανομένης μιας κοινής βάσης δεδομένων ασθενών που περιέχει δεδομένα PET και CT [13].

Με την σειρά τους τα εξαρτήματα των CT των συνδυασμένων συστημάτων PET/CT συνεχίζουν να εξελίσσονται καθώς διατίθεται μεγαλύτερη δυνατότητα πολλαπλών ανιχνευτών. Ο αρχικός σχεδιασμός των PET/CT περιλάμβανε αξονική τομογραφία μονής τομής, ενώ τα μεταγενέστερα συστήματα έχουν ενσωματώσει 4, 16, 64 ή και μεγαλύτερες τομές. Η προηγμένη ικανότητα ενός ανιχνευτή CT επιτρέπει την εκτεταμένη κάλυψη όγκου σε μία μόνο φάση αναπνοής ή σκιαγραφικής φάσης και διευκολύνει επίσης μια σειρά από πρωτόκολλα ταχείας διάγνωσης, ιδιαίτερα εκείνων που προορίζονται για το πεδίο της καρδιολογίας. Το επίπεδο ικανότητας των CT που απαιτείται από ένα συνδυασμένο σύστημα PET/CT εξαρτάται από τον βαθμό στον οποίο το σύστημα θα χρησιμοποιηθεί για διαγνωστική ποιοτική αξονική τομογραφία. Για πολλές ογκολογικές μελέτες PET/CT, τα τελευταία συστήματα CT δεν είναι απαραίτητα και ευνοούνται τα πρωτόκολλα χαμηλής δόσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ρεύμα των ακτίνων X μειώνεται και δεν χορηγείται ενδοφλέβια σκιαγραφική ουσία [13].

Τέλος, παρά την σχετικά γρήγορη σάρωση που παρέχεται από τα σύγχρονα συστήματα PET/CT, η συνιστώσα των PET εξακολουθεί να απαιτεί συνήθως πολλά λεπτά απόκτησης δεδομένων και η διαχείριση της κίνησης του ασθενούς εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα. Η κίνηση δυνητικά μπορεί να προκαλέσει κακή ευθυγράμμιση των εικόνων PET και CT, υποβαθμίζοντας την χωρική ανάλυση της εικόνας και εισάγοντας χαρακτηριστικά αντικειμένων [13].

3.3 SPECT/CT

Από πολλές απόψεις τα συστήματα SPECT επωφελήθηκαν περισσότερο από τα συστήματα της PET με την προσθήκη της CT. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως τα συστήματα SPECT έχουν χαμηλότερη χωρική ανάλυση από τα συστήματα της PET. Πολλοί ιχνηθέτες της SPECT είναι αρκετά συγκεκριμένοι και συχνά δεν προσφέρουν το είδος ανατομικού προσανατολισμού που παρέχεται από τη φυσιολογική πρόσληψη οργάνων με ιχνηθέτες PET όπως η φθοριοδεοξυγλυκόζη (FDG). Η σάρωση μετάδοσης ραδιονουκλεϊδίων είναι περισσότερο δύσκολη στα συστήματα SPECT σε σύγκριση με τα συστήματα PET καθώς οι κάμερες Γάμμα πρέπει να είναι ικανές για πολλαπλούς τρόπους απεικόνισης. Παρά αυτές τις σκέψεις, η απόκτηση συνδυασμένων μηχανημάτων SPECT/CT έγινε αργότερα σε σχέση με τα PET/CT. Αναμφίβολα βέβαια, το ύψος του κόστους συνέβαλε και για αυτό τον λόγο εξακολουθεί να υφίσταται η αβεβαιότητα σχετικά με το επίπεδο απόδοσης της CT που απαιτείται σε ένα σύστημα SPECT/CT [13].



Εικόνα 11. Κλινικά συστήματα SPECT/CT
Πηγή: FV Hospitals

Αρχικά τα πρώιμα σχέδια των SPECT/CT, περιλάμβαναν επιτυχημένες εμπορικές προσφορές συνδυάζοντας συστήματα SPECT με χαμηλής αποδόσεως συστήματα CT. Το υποσύστημα SPECT τοποθετήθηκε μπροστά από την CT και τα δεδομένα αποκτιούνταν διαδοχικά. Η διαδοχική, σε αντίθεση με την ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων CT και των υποσυστημάτων SPECT, καθιερώθηκε γρήγορα ως τυπική διεργασία της λειτουργίας τόσο στα συστήματα SPECT/CT, όσο και στα συστήματα PET/CT. Επιπροσθέτως, οι σωλίνες ακτίνων X χαμηλής ισχύος και οι αργές ταχύτητες περιστροφής σήμαιναν ότι το στοιχείο CT δεν ήταν σε καμία περίπτωση βελτιστοποιημένο για ποιοτική διαγνωστική απεικόνιση. Στόχος λοιπόν ήταν η παροχή διόρθωσης εξασθένησης και ένα πολύ αναγκαίο ανατομικό πλαίσιο για το SPECT, διατηρώντας παράλληλα ένα σχετικά χαμηλό κόστος [13].

Εν κατακλείδι, η επιθυμία για βελτιωμένη ποιότητα εικόνας της αξονικής τομογραφίας οδήγησε στην εισαγωγή συστημάτων SPECT/CT τα οποία ενσωμάτωναν ένα εξάρτημα CT υψηλής απόδοσης με δυνατότητες συγκρίσιμες με τους κοινούς τομογράφους. Στο σήμερα λοιπόν και μέσω αυτής της εξέλιξης, τα συστήματα SPECT/CT επωφελούνται από την σημαντικά βελτιωμένη ποιότητα εικόνας, την ταχύτερη απόκτηση δεδομένων και αξιοποιώντας το ευρύτερο φάσμα πρωτοκόλλων αξονικής τομογραφίας [13].

Κεφάλαιο 4^ο : Τεχνητή νοημοσύνη & Πυρηνική Ιατρική

Κεφάλαιο 4^ο: Τεχνητή νοημοσύνη & Πυρηνική Ιατρική

4.1 Η Τεχνητή Νοημοσύνη σε ευρύτερο πλαίσιο

Η Τεχνητή Νοημοσύνη είναι ένας ευρύς κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών που ασχολείται με την κατασκευή έξυπνων μηχανών ικανών να εκτελούν εργασίες που απαιτούν συνήθως ανθρώπινη νοημοσύνη. Ορισμένες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένες διεπαφές για οπτική αντίληψη, αναγνώριση ομιλίας, λήψη αποφάσεων και μετάφραση μεταξύ των γλωσσών. Για αυτούς τους λόγους η τεχνητή νοημοσύνη θεωρείται μια διεπιστημονική επιστήμη.

Ο όρος «Τεχνητή Νοημοσύνη» επινοήθηκε για πρώτη φορά το 1956 όταν ο Αμερικανός επιστήμονας υπολογιστών John McCarthy οργάνωσε το Συνέδριο του Ντάρτμουθ. Βέβαια πριν από αυτό, οι εργασίες στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης περιλάμβαναν το τεστ Turing που πρότεινε ο Alan Turing ως μέτρο της νοημοσύνης των μηχανών. Έτσι με την πάροδο των χρόνων η Τεχνητή Νοημοσύνη έκανε αισθητή την παρουσία της σε διάφορους κλάδους επιστημών, συμβάλλοντας στην περαιτέρω εξέλιξη τους. Ένας λοιπόν από αυτούς τους κλάδους θεωρείται και η Ιατρική [14].

Είναι ευρέως γνωστή η εφαρμογή και χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις ιατρικές επιστήμες γενικότερα και με αρκετά θετικό πρόσημο. Οι κοινές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διάγνωση ασθενών, την ανακάλυψη και ανάπτυξη φαρμάκων, τη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ γιατρού και ασθενούς, την χορήγηση ιατρικών εγγράφων όπως συνταγές, και την εξ αποστάσεως θεραπεία ασθενών. Παρότι μέχρι πρότινος τα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών συχνά εκτελούσαν εργασίες πιο αποτελεσματικά από τους ανθρώπους, με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης οι σύγχρονοι αλγόριθμοι πέτυχαν ακρίβειες εφάμιλλες των ειδικών στον τομέα των ιατρικών επιστημών. Για αυτό τον λόγο, πολλοί εικάζουν ότι είναι θέμα χρόνου να αντικατασταθούν πλήρως οι άνθρωποι σε ορισμένα παιδιά των ιατρικών επιστημών [15].

Σε γενικό βαθμό, θα μπορούσαμε να πούμε πως η Τεχνητή Νοημοσύνη στον χώρο της ιατρικής διακρίνεται από ένα σταθερό τυπικό μοντέλο. Αυτού του είδους το μοντέλο ξεκινά με έναν μεγάλο όγκο δεδομένων όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την απόκτηση πληροφοριών. Μετέπειτα, αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός αξιοποιήσιμου αποτελέσματος το οποίο θα συμβάλλει τόσο στην περαιτέρω ανάπτυξη του εκάστοτε ιατρικού μηχανήματος, όσο και στην επίλυση του οποιουδήποτε προβλήματος ανακύψει [15].

4.2 Η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική

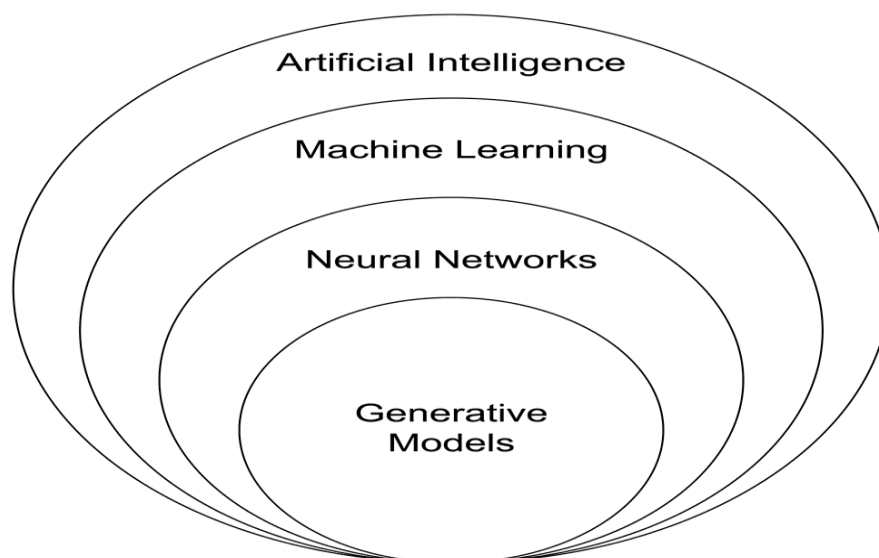
Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στην υγειονομική περίθαλψη είναι πολύπλευρη και δεν περιορίζεται αποκλειστικά και μόνο σε ορισμένους τομείς της Ιατρικής. Η αύξηση του συνόλου των ασθενών, αύξησε ταυτόχρονα τις απαιτήσεις για υψηλότερη ποιότητα διάγνωσης, καθώς επίσης και την ανάγκη για πιο έγκαιρη ανίχνευση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του φόρτου εργασίας του ιατρικού και νοσηλευτικού προσωπικού οδηγώντας στην αυτοματοποίηση της ανάκτησης πληροφοριών σχετικά με τον εκάστοτε ασθενή. Η Τεχνητή Νοημοσύνη από την πρώτη στιγμή έδειξε πως μπορεί να ανταποκριθεί επάξια, με αποτελέσματα τα οποία ήταν εφάμιλλα της ανθρώπινης παρουσίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη ενός επιτυχημένου αλγορίθμου ελέγχου του καρκίνου του μαστού, συγκριτικά με την διάγνωση έμπειρων ακτινολόγων [16].

Στο κομμάτι της Πυρηνικής Ιατρικής, η Τεχνητή Νοημοσύνη μετράει μια πορεία σχεδόν 50 ετών. Κυρίως επιστρατεύεται για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την συλλογιστική των δεδομένων. Επίσης προσφάτως, η Τεχνητή Νοημοσύνη κέντρισε το ενδιαφέρον της παγκόσμιας ιατρικής κοινότητας αναφορικά με την τμηματοποίηση και την ερμηνεία των απεικονίσεων. Φυσικό επακόλουθο όμως ήταν και η αναπαραγωγή αντίθετων απόψεων οι οποίες έκρουσαν τον κώδωνα του κινδύνου λέγοντας πως αυτή η ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης θα οδηγούσε στο τέλος της καριέρας διαφόρων ιατρικών ειδικοτήτων (Liew, 2018). Παρόλες όμως τις αντίθετες απόψεις, ουδείς μπορεί να αμφισβητήσει την συμβολή της στην εξέλιξη και αναβάθμιση των ιατρικών υπηρεσιών της Πυρηνικής Ιατρικής. Η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί το μέσο για την μετάβαση στην νέα σελίδα της βιώσιμης ιατρικής απεικόνισης καθώς υπόσχεται τον επαναπροσδιορισμό των κλινικών και ερευνητικών δυνατοτήτων [17].

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, κατανοεί εύκολα κανείς την σημασία της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική. Πιο συγκεκριμένα, διάφορες μετρήσεις έχουν δείξει πως η οπτική αναγνώριση με την χρήση της τεχνητής νοημοσύνης παρουσιάζει συνήθως μικρότερο ποσοστό σφάλματος σε σχέση με εκείνο της ανθρώπινης παρουσίας. Συνεπώς κατανοεί κανείς πόσο σημαντική είναι η συνεισφορά της σε πιο σύνθετα πεδία απεικόνισης όπως εκείνα της SPECT και της PET. Στα επακόλουθα σημεία της διπλωματικής εργασίας, θα εμβαθύνουμε στην συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης στα μηχανήματα και στις μεθόδους της Πυρηνικής Ιατρικής. Ομοίως θα παραθέσουμε ορισμένους προβληματισμούς για την εφαρμογή της, προτείνοντας ορισμένες προτάσεις περαιτέρω εξέλιξής της με βάση κυρίως την διεθνή βιβλιογραφία.

4.3 Οι κατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική

Για την περαιτέρω γνώση και κατανόηση των εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική θα ήταν συνετή η παράθεση κάποιων υποκατηγοριών της, οι οποίες σχετίζονται με τις απεικονίσεις SPECT και PET. Πρώτη σε σειρά βρίσκεται η «μηχανική μάθηση» (ML⁵) η οποία αξιοποιεί αλγόριθμους μέσα από την ανάλυση δεδομένων, χωρίς όμως να έχει ρυθμιστεί αποκλειστικά για αυτήν την διαδικασία. Η ML αφορά θέματα διδασκαλίας καθορισμένα από τον άνθρωπο και συγγέεται πολλές φορές με την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την λογική. Καθότι αποτελεί κομμάτι της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν θεωρείται ένας κοινός αλγόριθμος άλλα επεξεργάζεται τα δεδομένα της εκπαίδευσης, κατασκευάζοντας ένα πρότυπο συσχετίσεων μέσω μεταβλητών οι οποίες οδηγούν σε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα. Βέβαια προκειμένου να εξαχθεί αυτό το επιθυμητό αποτέλεσμα, απαιτείται σε μεγαλύτερο βαθμό η ανθρώπινη παρουσία. Ακολούθως, σημαντική υποκατηγορία της ML είναι η «βαθιά μάθηση» (DL⁶) [18].



Εικόνα 12. Υποκατηγορίες της τεχνητής νοημοσύνης
Πηγή: Value Investing Academy

Η DL εξάγει αυτόματα τα δεδομένα εισόδου και απαιτεί σε μικρότερο βαθμό την ανθρώπινη παρέμβαση. Επιπλέον, δίνει την δυνατότητα περισσότερων επιπέδων επεξεργασίας για να ανιχνευτούν πιο σύνθετα χαρακτηριστικά εικόνας. Αποτελείται από τρία πεδία: α) τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN⁷), β) τα Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNN⁸) και γ) τα Γεννητικά Αντιθετικά Δίκτυα (GAN⁹). Όσον αφορά τα ANN, θεωρούνται ως κόμβοι με σταθμισμένα δίκτυα. Τα ANN λοιπόν δέχονται δεδομένα χαρακτηριστικών ως είσοδο ενώ τα CNN εξάγουν συνελκτικά χαρακτηριστικά από την ίδια την εικόνα. Με την σειρά τους, τα CNN σκανάρουν μια εικόνα συστηματικά εφαρμόζοντας ένα στρώμα νευρωνικού δικτύου σε μια καθορισμένη περιοχή. Εν συνεχεία, εναλλάσσονται τα επίπεδα συνέλιξης με τα

⁵ Machine Learning

⁶ Deep Learning

⁷ Artificial Neural Networks

⁸ Convolutional Neural Networks

⁹ Generative Adversarial Networks

επίπεδα συγκέντρωσης, συμπληρώνοντας τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Τέλος, υπάρχουν τα GAN τα οποία αποτελούνται από δύο δίκτυα, μια γεννήτρια και έναν διαχωριστή. Η γεννήτρια κατασκευάζει πλασματικά δεδομένα εισόδου και ο διαχωριστής διαχωρίζει τα πραγματικά από τα πλαστά δεδομένα εισόδου [19].

Μολαταύτα λοιπόν, διακρίνεται η σημασία της ML στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Η PET, η SPECT, η κατηγοριοποίηση βλαβών και η φυσική της απεικόνισης αποτελούν ορισμένες από τις εφαρμογές της ML στην απεικόνιση της Πυρηνικής Ιατρικής. Η αξιοποίηση των DL στην Πυρηνική Ιατρική συνεπάγεται με την διάγνωση ασθενειών μέσω SPECT & PET, την φυσική της απεικόνισης μέσω PET & SPECT, την ανακατασκευή εικόνων, την αποθορυβοποίηση εικόνων και την ταξινόμησή τους. Συνεπώς, το σύνολο των διεργασιών της ML, από κοινού με τα υποπεδία της, συμβάλλουν στην βελτίωση των απεικονιστικών μεθόδων και ενισχύουν την προβλεπτική απόδοση [20].

4.4 Οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική

Για λόγους συντομίας και σαφήνειας, μπορούν να διακριθούν δύο βασικά σημεία στα οποία η Τεχνητή Νοημοσύνη εφαρμόζεται στην Πυρηνική Ιατρική. Το πρώτο αφορά τις εργασίες σχηματισμού και επεξεργασίας εικόνας και αναφέρεται συνήθως στην διεθνή βιβλιογραφία ως «φυσική της απεικόνισης». Το δεύτερο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πρακτικές εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης και αφορά το κλινικό κομμάτι. Παρόλο λοιπόν που η διεθνής βιβλιογραφία διαχωρίζει τις εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης, θεωρούνται αλληλένδετες, όπως τα CNN τα οποία συσχετίζονται σε ένα ενιαίο εύρος απεικόνισης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο προτεινόμενος αγωγός ραδιενεργών από τους Hatt και Visvikis όπου βασίζεται η ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, ενώ οι αλγόριθμοι σχηματισμού και τμηματοποίησης εικόνας εξυπηρετούν για τον ακριβή προσδιορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος και την εξαγωγή απεικόνισης βιοδεικτών. Με την σειρά τους αυτοί οι βιοδείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διάγνωση και την διαστρωμάτωση της θεραπείας ασθενών, όπως επίσης και για την παρακολούθηση της θεραπείας [20].

Επίσης είναι ευρέως αποδεκτό πως τα διαθέσιμα δεδομένα από συσκευές πολυτροπικότητας όπως της PET/CT ή της SPECT/CT έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό μέσα από την ανάπτυξη της πολύ-παραμετρικής απεικόνισης. Μέσω της στηριζόμενης ανάλυσης με βάση την βαθιά μάθηση (DL), οι αλγόριθμοι είναι δυνητικά πιο αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση του αυξανόμενου όγκου δεδομένων που αποκτήθηκαν. Κατά αυτόν τον τρόπο οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης συμβάλλουν στην εξέλιξη και την αναβάθμιση των μεθόδων και των συστημάτων της Πυρηνικής Ιατρικής.

4.5 Η «φυσική της απεικόνισης»

Οι δυο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες απεικονίσεις της Πυρηνικής Ιατρικής, η PET και η SPECT ποσοτικοποιούν την κατανομή ραδιονουκλεϊδίων σε έναν δέκτη με μέτρηση φωτονίων Γάμμα που εκπέμπονται από αυτόν τον δέκτη. Στην πράξη, τα φωτόνια Γάμμα εξασθενούν λόγω της απορρόφησης των ιστών. Το φαινόμενο εξασθένησης προκαλεί την μείωση του αριθμού των φωτονίων κάτω από το αναμενόμενο και οδηγεί σε ανομοιόμορφες αποκλίσεις στην κατανομή ραδιενέργειας λόγω της διαφορετικών διαδρομών εξασθένησης από τον ιχνηθέτη στον ανιχνευτή. Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας είναι τα σκεδαζόμενα φωτόνια. Επιπλέον, τα γεγονότα σκέδασης θα προκαλέσουν ποσοτικά σφάλματα [21].

Παρόλα αυτά, η εμφάνιση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί πλήρη αντικατάσταση των παραδοσιακών μεθόδων αλλά μάλλον ένα βοηθητικό μέσο εύρεσης σχέσεων χαρτογράφησης συναρτήσεων και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την δομή μοντέλου, το εύρος δεδομένων και την διαδικασία εκπαίδευσης. Οι χάρτες εξασθένησης και η διόρθωση διασποράς είναι επί του παρόντος το επίκεντρο της έρευνας στην Πυρηνική Ιατρική για απεικόνιση PET και SPECT, με πολλές ομάδες Τεχνητής Νοημοσύνης που συνεισφέρουν στον τομέα .

Διόρθωση εξασθένησης (AC^{10})

Η λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης της PET είναι απαιτητική εξαιτίας της εξασθένησης των φωτονίων, η οποία είναι η απώλεια της έντασης ροής φωτονίων μέσω ενός μέσου. Ένα παράδειγμα αναπόφευκτου παράγοντα που προκαλεί εξασθένηση, είναι η αλληλεπίδραση του φωτονίου με τον ανθρώπινο ιστό πριν από την ανίχνευση. Για μεγαλύτερα δείγματα ανθρώπων, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση της εικόνας και απώλεια ανάλυσης. Η διόρθωση εξασθένησης (AC) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να διορθώσει την εξασθένηση σε ατομική βάση, όπου λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων εικόνας και αφού βέβαια συλλεχθούν [20].

Ανακατασκευή εικόνας και διόρθωση δεδομένων

Μετά την απόκτηση δεδομένων, μια εργασία συμβατικής ανακατασκευής εικόνας περιλαμβάνει την εκτίμηση των παραμέτρων αναπαράστασης για τον ακριβή προσδιορισμό της *in vivo* χωροχρονικής κατανομής ραδιενέργειας. Αυτή περιλαμβάνει την χρήση ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν διάφορες πτυχές, συμπεριλαμβανομένου του σαρωτή/ανιχνευτή γεωμετρίας, την φυσική της διαδικασίας ανίχνευσης, την φυσιολογική κίνηση, τα καταγεγραμμένα δεδομένα θορύβου κ.α. Έως τα τέλη της δεκαετία του 90', η ανακατασκευή εικόνας στην Πυρηνική Ιατρική βασιζόταν στην αντίστροφα φιλτραρισμένη προβολή. Στην τρέχουσα κλινική πρακτική, αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει ένα μέτρο διαφοράς μεταξύ μοντελοποιημένων και μετρούμενων δεδομένων. Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας, η διαφορά ελαχιστοποιείται μέσω διαδοχικών επαναλήψεων χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση επιλογής. Σε αυτό

¹⁰ Attenuation correction

λοιπόν το στάδιο της ανακατασκευής εικόνας, η εισαγωγή της Τεχνητής Νοημοσύνης αντιπροσωπεύει ένα θεμελιώδες παράδειγμα αλλαγής. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα είναι πλέον χαρτογραφημένα σε ένα επίπεδο απεικόνισης που θα μπορούσε να κριθεί ιδανικό ως αποτέλεσμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκμάθηση του χειριστή της ανακατασκευής εικόνας στην χρησιμοποίηση δεδομένων εκπαίδευσης. Για αυτόν τον λόγο τα δεδομένα πρέπει να είναι επαρκώς διαφοροποιημένα και μεταβαλλόμενα ούτως ώστε να καλύπτουν όλες τις πιθανές-διαφορετικές απεικονιστικές δυνατότητες [20].

Στην λεγόμενη άμεση ανακατασκευή, η εκπαίδευση εκτελείται μεταξύ των πρωτογενών δεδομένων στην μορφή σινογραφημάτων/προβολών και των ανακατασκευασμένων εικόνων, με νεότερες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν δημιουργικά αντιφατικά δίκτυα, τα οποία προτείνονται στο πλαίσιο της μετάφρασης από εικόνα σε εικόνα. Ακόμη, η βαθιά μάθηση (DL) δύναται να παρέμβει εντός της συμβατικής επαναληπτικής διαδικασίας ανακατασκευής εικόνας μέσω της αποθορυβοποίησης των διαδοχικών εκτιμήσεων εικόνας ή μέσω της εισαγωγής δεδομένων τα οποία βασίζονται σε προηγούμενες πληροφορίες από τη διαδικασία επανάληψης. Ως εκ τούτου, διευκολύνει μια ταχύτερη σύγκλιση σε συνδυασμό με μια ακριβέστερη τελική εκτίμηση εικόνας. Μέχρι στιγμής, οι περισσότερες από αυτές τις εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί στην απεικόνιση PET και λιγότερο στην απεικόνιση SPECT. Η εξέλιξη επιτάσσει την παροχή περαιτέρω στοιχείων σχετικών με τα πλεονεκτήματα της χρήσης της βαθιάς μάθησης (DL) για τις εργασίες ανακατασκευής εικόνας, σχετικών με: α) την ποιοτική και ποσοτική ακρίβεια της ανακατασκευασμένης εικόνας σε σύγκριση με τους επαναληπτικούς αλγόριθμους αλλά και β) ως προς την ταχύτητα εκτέλεσης που θα πρέπει να βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω της «άμεσης ανακατασκευής» με προσεγγίσεις DL. Αυτό το τελευταίο σημείο μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στα πλαίσια απεικόνισης ολόκληρου του ανθρωπίνου σώματος με τα συστήματα της PET, όπου ο όγκος των συλλεγόμενων δεδομένων αυξάνεται σημαντικά αναφορικά με τις τρέχουσες συσκευές απεικόνισης της PET. Επίσης, θα είναι απαραίτητο να συγκρίνουν συγκεκριμένα την απόδοσή τους με αυτή πριν από τις βελτιώσεις της βαθιάς μάθησης, όπως είναι οι εργασίες αφαίρεσης θορύβων ή η υπερ-ανάλυση [20].

Όσον αφορά τις διορθώσεις δεδομένων, η πλειοψηφία των εργασιών έχει επικεντρωθεί στο πεδίο της βαθιάς μάθησης της διόρθωσης εξασθένησης (AC^{11}) και λιγότερο σε εκείνο της διόρθωσης σκέδασης (SC^{12}). Η μεγάλη πλειοψηφία των προτεινόμενων προσεγγίσεων AC βασίζεται σε μια ευρύτερη μετάφραση εικόνας με εικόνα (γνωστή ως «δημιουργία εικόνας»), πεδίο της DL, η οποία αποτελεί μια γενική εργασία της τεχνητής νοημοσύνης. Οι στόχοι αυτών των εξελίξεων είναι η παραγωγή CT με βάση ισοδύναμους χάρτες AC από εικόνες MR^{13} , σε πολυτροπικότητα PET/MR, η βελτίωση των χαρτών εξασθένησης που παράγονται από μέγιστη πιθανότητα ανακατασκευής δραστηριότητας και εξασθένησης. Οι προαναφερθείσες λειτουργίες προσεγγίζουν ή καταργούν εντελώς την ανάγκη για πληροφορίες ανατομικής εικόνας με απευθείας παραγωγή εικόνων διορθωμένων με εξασθένηση από μη διορθωμένα με εξασθένηση δεδομένα PET. Όσο δε αφορά την διόρθωση σκέδασης, τα σινογράμματα διασποράς θα μπορούσαν να παραχθούν από ακατέργαστα δεδομένα εκπομπής και εξασθένησης μέσω απεικόνισης PET ή SPECT

¹¹ Attenuation Correction

¹² Scatter Correction

¹³ Magnetic Resonance

ή μέσω της άμεσης παραγωγής εικόνων που έχουν διορθωθεί με διόρθωση σκέδασης (συνήθως σε συνδυασμό με AC) με μη διορθωμένες εικόνες PET που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο δίκτυο [20].

Όλες αυτές οι εξελίξεις που προαναφέρθηκαν κρίνονται αρκετά ευοίωτες, αλλά υπάρχει σαφής ανάγκη για αξιολόγηση της ευρωστίας αυτών των προσεγγίσεων τόσο ως προς τη μεταβλητότητα της θέσης ανατομίας, όσο και ως προς την παρουσία ανωμαλιών, μια μελέτη η οποία σαφώς και μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψιν μεγαλύτερους πληθυσμούς ασθενών [20].

Επεξεργασία και ανάλυση εικόνας

Αναφορικά με την επεξεργασία και την ανάλυση εικόνων μπορεί να εντοπίσει κανείς δύο βασικούς τομείς: α) αυτόν που ασχολείται με την ενίσχυση της μετα-επεξεργασμένης βελτίωσης των ανακατασκευασμένων εικόνων (αφαίρεση θορύβου, βελτίωση ανάλυσης) και β) με την περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων που επιτρέπουν την εξαγωγή βιοδεικτών απεικόνισης που εν συνεχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικά κλινικά σημεία [22]. Η αποθορυβοποίηση στοχεύει κυρίως στην πίεση των απεικονίσεων χαμηλής δόσης της Πυρηνικής Ιατρικής και βασίζεται αποκλειστικά στην χρήση των τυπικών ανακατασκευασμένων εικόνων χαμηλής δόσης της PET ή σε συνδυασμό με εικόνες ανατομικού τρόπου (κυρίως MRI), ως είσοδο [23]. Με την σειρά της η υπερανάλυση βασισμένη στην DL στοχεύει στην λήψη εικόνας υψηλής ανάλυσης από μια εικόνα εισόδου χαμηλής ανάλυσης. Οι προσεγγίσεις βασίζονται στην εκπαίδευση που χρησιμοποιεί είτε ζεύγη εικόνων χαμηλής/υψηλής ανάλυσης Πυρηνικής Ιατρικής, είτε σε συνδυασμό εικόνων PET χαμηλής ανάλυσης και υψηλής ανάλυσης εικόνων MR [24]. Και πάλι τα αποτελέσματα είναι υποσχόμενα, αλλά οι περισσότερες μελέτες στερούνται συγκρίσεως με την τρέχουσα τεχνολογία αποθορυβοποίησης.

Όσον αφορά την ανάλυση εικόνων στην Πυρηνική Ιατρική, οι πιο σημαντικές εξελίξεις αφορούν τον τομέα της τμηματοποίησης εικόνων. Η απεικόνιση στην Πυρηνική Ιατρική πάσχει από χαμηλή χωρική ανάλυση και ως αποτέλεσμα οι επιδράσεις μερικού όγκου που αποδίδουν την τμηματοποίηση των λειτουργικών τομών ενδιαφέροντος αποτελούν μια πρόκληση για τον σχηματισμό της ανατομικής εικόνας. Τα πρώτα σημάδια των πιθανών δυνατοτήτων των αλγορίθμων βαθιάς μάθησης σε σχέση με την τρέχουσα άρχισαν να αναδύονται στις πρώτες προκλήσεις λογισμικού τμηματοποίησης που οργανώθηκαν το 2016 [25]. Ο αλγόριθμος που βασίζεται στα συστήματα CNN οδήγησε σε μεγαλύτερη ακρίβεια αναφορικά με τα αποτελέσματα τμηματοποίησης. Πιο πρόσφατα αποτελέσματα δηλώνουν ότι ένας τύπος αρχιτεκτονικής 3D U-Net, ο οποίος βασίζεται σε επίπεδα κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή είναι σε θέση να παρέχει υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα λειτουργικής κατάτμησης του όγκου από εικόνες PET σε διάφορα μοντέλα καρκίνου και να εντοπίζει τις τοποθεσίες τους χωρίς την ανάγκη παρέμβασης του χρήστη [22]. Στην πράξη, ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν είναι ακόμη τα βέλτιστα. Σε μια πρόσφατη μελέτη σε ασθενείς με καρκίνο του τραχήλου της μήτρας κατέστη σαφές ότι οι κατατμήσεις και η ολική μεταβολή του μεγέθους των όγκων που προσδιορίζονται από τον αλγόριθμό τους πρέπει να επαληθευθεί και μερικές φορές, ακόμη και να διορθωθεί ώστε να είναι πανομοιότυπος με τις χειροκίνητες κατατμήσεις [25]. Η μελλοντική κατεύθυνση της έρευνας στον τομέα αυτόν θα αφορά την εκμετάλλευση της πολυτροπικότητας του συνόλου των δεδομένων στο

πλαίσιο της αυτόματης τμηματοποίησης εικόνων συνδυάζοντας PET, CT και MR, όποτε είναι διαθέσιμη (Guo Z, 2019). Σχεδόν όλα τα έργα στον τομέα της ανακατασκευής και ανάλυσης εικόνας που αναφέρονται παραπάνω, έχουν πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψιν τις στατικές ανακτήσεις, αλλά μπορούν να εφαρμοστούν εξίσου σε όλες τις δυναμικές απεικονίσεις, συμπεριλαμβανομένης της άμεσης παραμετρικής ανακατασκευής εικόνας της PET [26].

Τέλος, άλλη μια σημαντική μελλοντική εφαρμογή για τις απεικονίσεις της Πυρηνικής Ιατρικής, εντός της ευρύτερης περιοχής της σύνθεσης εικόνας που βασίζεται στην DL, είναι αυτή της εναρμόνισης εικόνας. Οι πολυκεντρικές δοκιμές θα γίνουν ακόμα πιο σημαντικές στο μέλλον δεδομένων των απαιτήσεων για μεγάλα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης σχετικών με την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη της εναρμόνισης των προσεγγίσεων που υπερβαίνουν την απόκτηση και την επεξεργασία των πρωτοκόλλων.

Ένα πεδίο όπου η Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί επίσης να παίξει σημαντικό ρόλο είναι η εγγραφή εικόνας. Παρά το γεγονός ότι στην κλινική πράξη υπάρχει ήδη ένα ισχυρό στοιχείο κλινικής πολυτροπικότητας (PET/CT, SPECT/CT, PET/MR), στην χρήση, η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στην εγγραφή εικόνας μπορεί να είναι αρκετά σχετική. Ας αναλογιστούμε τις διαχρονικές μελέτες όπως επίσης και την ευθυγράμμιση των δεδομένων της PET και της CT μέσα σε μια απλή PET/CT έρευνα. Δεδομένης της μετακίνησης των ασθενών, υπάρχει πάντα κάποια αναντιστοιχία μεταξύ CT και PET, είτε τυχαία, είτε συστηματικά, είτε κυκλικά. Επίσης, η Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να συνεισφέρει στις στρατηγικές μείωσης των μεταλλικών τεχνουργημάτων, για βελτιωμένη διόρθωση εξασθένησης σε υβριδική απεικόνιση PET/CT [20].









Κεφάλαιο 5^ο :
Ευκαιρίες, Προκλήσεις και Ευθύνες της Πυρηνικής
Ιατρικής & της Τεχνητής νοημοσύνης

Κεφάλαιο 5^ο: Ευκαιρίες, Προκλήσεις και Ευθύνες της Πυρηνικής Ιατρικής & της Τεχνητής νοημοσύνης

5.1 Η σχέση Πυρηνικής Ιατρικής και Τεχνητής νοημοσύνης σήμερα

Η αξιοπιστία αποτελεί βασική αρχή της ιατρικής. Η σχέση ασθενούς-ιατρού εξελίσσεται πέραν του επαγγελματικού μέρους σε ένα ευρύτερο σύστημα φροντίδας-υγείας. Με την σειρά της, η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Ιατρική γενικότερα οδηγεί σε επανεξέταση των στοιχείων εμπιστοσύνης. Στο πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής, το μέλλον επιτάσσει μια χάραξη πορείας προς την δημιουργία περαιτέρω αξιόπιστων συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης. Ανεξάρτητα βέβαια με αυτό το γεγονός, η Τεχνητή Νοημοσύνη εντάσσεται ήδη στην ιστορία των τεχνολογικών επαναστάσεων. Έτσι λοιπόν, όλο και περισσότερο αναδύονται εφαρμογές της στην Πυρηνική Ιατρική που σχετίζονται με την διάγνωση, την θεραπεία, την αποτελεσματικότητα ροής εργασιών, αντιμετωπίζοντας επαρκώς και τις αναδυόμενες προκλήσεις που προκύπτουν. Επομένως, η καθιέρωση και η διατήρηση της δυναμικής των εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια για την προώθηση της ορθολογικής και ασφαλούς ανάπτυξης της στο χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής [27].

Γενικότερα η ιατρική χρησιμοποιεί την επιστήμη και τα βέλτιστα διαθέσιμα εργαλεία όσον αφορά την παροχή φροντίδας. Η αναγκαιότητα της αντιμετώπισης των ασθενειών, έχει οδηγήσει τους ιατρούς στην χρησιμοποίηση νέων μεθόδων και εφαρμογών για την μείωση ή την εξάλειψη του πόνου των ασθενών. Έτσι λοιπόν, τους τελευταίους δύο αιώνες, μαζί με τις τεχνολογικές επαναστάσεις, νέες ιατρικές συσκευές έχουν γίνει το πρότυπο περίθαλψης. Από το στηθοσκόπιο και το ηλεκτροκαρδιογράφημα έως την διατομική απεικόνιση, η επιστήμη της Ιατρικής εξελίσσεται διαρκώς. Ομοίως η Πυρηνική Ιατρική πάντα αγκάλιαζε την πρόοδο της τεχνολογίας. Έτσι λοιπόν, με την εμφάνιση της Τεχνητής Νοημοσύνης, η Πυρηνική Ιατρική είναι σε θέση να βιώσει μια σύγχρονη αναγέννηση, όμοια με αυτή που συντελέσθη μετά το πρωτοποριακό έργο των Kuhl και Edwards την δεκαετία του 1960. Οι δυο τους εφαρμόζοντας τις έννοιες του μετασχηματισμού ραδονίου μέσω νέων διαθέσιμων υπολογιστικών τεχνολογιών, εισήγαγαν την ογκομετρική ιατρική απεικόνιση διατομής με SPECT, την οποία ακολούθησε στη συνέχεια η ανάπτυξη της CT και της PET με ακτίνες X [27].

			
Steam engines	Light bulb	Computer	Self-driving car, IoT
1st Industrial revolution Mechanization	2nd Industrial revolution Electricity	3rd Industrial revolution Digital and IT	4th Industrial revolution Big Data and AI
Mechanical loom Late 18 th - Early 19 th Century	Mass production Late 19 th - Early 20 th Century	Computation and connectivity Latter half of 20 th Century	Hyperconnectivity, CNN Early 21 st Century-Now
Stethoscope	Electrocardiogram	Computed Tomography	Medical Imaging AI application
			

Εικόνα 13. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στην Ιατρική
Πηγή: Arizona State University

Επίσης, τις τελευταίες δεκαετίες σημειώθηκε τεράστια πρόοδος στην τεχνολογία της πληροφορικής και στην ενσωμάτωσή της στην πρακτική της ιατρικής. Επομένως, η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική αλλά και στην ιατρική γενικότερα αντιπροσωπεύει την υλοποίηση μιας νέας εποχής. Τέτοιες μετασχηματιστικές τεχνολογίες μπορούν να επηρεάσουν όλες τις πτυχές της κοινωνίας, αποφέροντας πρόοδο στην εξερεύνηση του διαστήματος, στην άμυνα, στην ενέργεια, στις βιομηχανικές διαδικασίες κ.τ.λ. [28].

Η προσθήκη της Τεχνητής Νοημοσύνης στην κλινική πρακτική της Πυρηνικής Ιατρικής προσφέρει νέες ευκαιρίες και προκλήσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο τα πλήρη οφέλη αυτής της νέας τεχνολογίας θα εξελίσσονται διαρκώς. Από την άλλη πλευρά είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε πως η πυρηνική ιατρική κοινότητα πρέπει να συμμετέχει ενεργά για να διασφαλίσει την ασφαλή και αποτελεσματική εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η καθιέρωση και η διατήρηση της τεχνητής νοημοσύνης στον τομέα της Πυρηνικής Ιατρικής απαιτεί μια συνολική στρατηγική για την προώθηση της εφαρμογής καινοτόμων τεχνολογιών ενώ προστατεύουμε τους ασθενείς και την κοινωνία μας, με ταυτόχρονη εκτέλεση των επαγγελματικών και ηθικών υποχρεώσεων. Το πλεονέκτημα της ανάπτυξης και εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι ότι οι μεθοδολογίες της Πυρηνικής Ιατρικής μπορούν να γίνουν ευρύτερα διαθέσιμες, αυξάνοντας την πρόσβαση των ασθενών στις διαδικασίες της Πυρηνικής Ιατρικής, οι οποίες διακρίνονται από υψηλή ποιότητα [29].

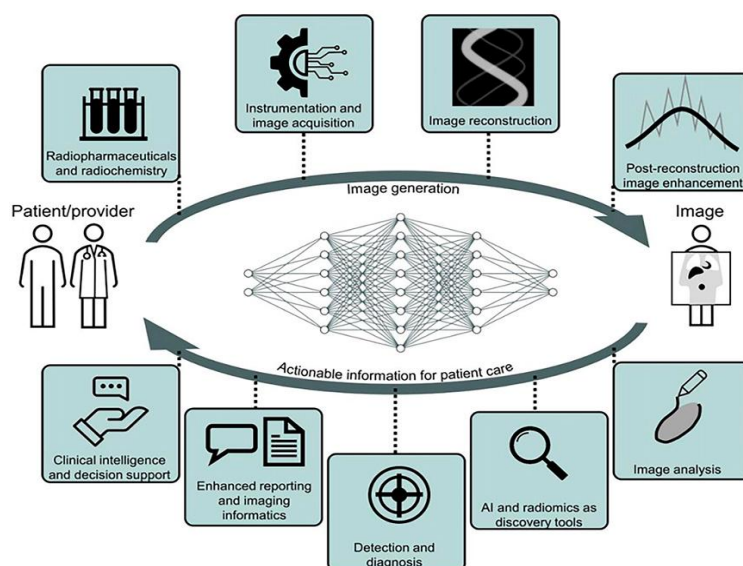
Ορισμένες επαγγελματικές ενώσεις της Πυρηνικής Ιατρικής, όπως η SNMMI¹⁴ κ.α. κατέχουν ηγετικό ρόλο ώστε να διασφαλιστούν και να αξιοποιηθούν καταλλήλως οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης σύμφωνα με τις βασικές αρχές και αξίες της ιατρικής επιστήμης. Χαρακτηριστικό είναι πως το 2020, η SNMMI σχημάτισε μια ομάδα εργασίας τεχνητής νοημοσύνης, συγκεντρώνοντας ειδικούς στην Πυρηνική Ιατρική και την Τεχνητή νοημοσύνη, συμπεριλαμβανομένων φυσικών, επιστημόνων υπολογιστικής απεικόνισης, γιατρών, στατιστικών κ.α [29].

¹⁴ Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging

5.2 Οι ευκαιρίες της σύμπραξης ΤΝ και ΠΙ

Διαγνωστική απεικόνιση

Η Πυρηνική Ιατρική εξελίσσει την ποιότητα εικόνας και προσφέρει ακριβή ποσοτικοποίηση στην εποχή της ιατρικής ακρίβειας. Οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης σχετικά με την εικόνα από τον ασθενή βελτιώνουν τον τρόπο απόκτησης και παράλληλα βελτιώνουν την λήψη αποφάσεων σχετικά με τις παρεμβάσεις στις ασθένειες. Η συνεισφορά της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει ως αποτέλεσμα την βελτιωμένη ανακατασκευή εικόνας από ακατέργαστα δεδομένα, τις διορθώσεις δεδομένων συμπεριλαμβανομένης της εξασθένησης της σκέδασης και την κίνηση. Επίσης, συνεισφέρει στην βελτίωση μιας εικόνας μετά την ανακατασκευή της. Αυτές οι βελτιώσεις θα μπορούσαν να επηρεάσουν την κλινική χρήση της SPECT και της PET. Επιπροσθέτως η απόκτηση πολλαπλών χρονικών σημείων και η PET/MRI μπορούν να βελτιώσουν τη σκοπιμότητα [30].



Εικόνα 14. Οι ευκαιρίες Τεχνητής Νοημοσύνης στον χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής
Πηγή: Arizona State University

Επίσης, ορισμένες επιλογές για την κλινική χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην πρακτική της Πυρηνικής Ιατρικής έχουν εξεταστεί εκτενώς, συμπεριλαμβανομένης της απεικόνισης εγκεφάλου, κεφαλής και τραχήλου, πνευμόνων, καρδιάς, αγγείων, οστών, προστάτη και λεμφώματος. Από την άλλη πλευρά, οι νευροενδοκρινικοί όγκοι, διάφοροι τύποι καρκίνου, μολύνσεις και φλεγμονές, είναι μερικά παραδείγματα πρόσθετων περιοχών που απαιτούν περαιτέρω εξέταση [30].

Αναδυόμενες προσεγγίσεις πυρηνικής απεικόνισης

Αναδύονται επίσης νέες εξελίξεις, όπως η PET ολικού σώματος, η οποία παρουσιάζει μοναδικά δεδομένα και υπολογιστικές προκλήσεις. Μια άλλη δυναμική χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι ο διαχωρισμός πολυκαναλικών δεδομένων από δυναμική απεικόνιση πολλαπλών ισοτόπων PET μιας συνεδρίας. Αυτή η ρεαλιστική πρόοδος θα μπορούσε να είναι πολύτιμη για την εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών φαινοτύπου για την αξιολόγηση της ετερογένειας του όγκου.

Ραδιοφαρμακευτικές Θεραπείες

Υπάρχουν αρκετοί τομείς στους οποίους η Τεχνητή Νοημοσύνη αναμένεται να επηρεάσει τις ραδιοφαρμακευτικές θεραπείες. Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης για τη μοριακή ανακάλυψη έχει διερευνηθεί για την επιλογή των καλύτερα υποσχόμενων οδηγιών για το σχεδιασμό κατάλληλων θερανοστικών για τον εκάστοτε στόχο. Για παράδειγμα, τα μοντέλα μηχανικής μάθησης θα μπορούσαν να διδαχθούν χρησιμοποιώντας παραμέτρους από προηγούμενες επιτυχίες και αποτυχίες της θεραπευτικής (π.χ. συντελεστής κατανομής, σταθερά διαχωρισμού και δυναμικό σύνδεσης) για τον καθορισμό των παραμέτρων που προβλέπουν καλύτερα ένα δεδομένο αποτέλεσμα (π.χ. ειδική δέσμευση, διείσδυση στον αιματοεγκεφαλικό φραγμό και αναλογία όγκου-μυός). Τα νέα μόρια επιτυχίας (π.χ. από τη βιβλιογραφία ή από οθόνες υψηλής απόδοσης) μπορούν στη συνέχεια να χρησιμεύσουν ως σύνολο δοκιμών σε τέτοια μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης για την επιτάχυνση της βελτιστοποίησης της μετατροπής της επιτυχίας σε προβάδισμα. Στη συνέχεια, με αναγνωρισμένα μόρια, η Τεχνητή Νοημοσύνη θα μπορούσε επίσης να προβλέψει τις βέλτιστες πρόδρομες ουσίες σήμανσης και τις διαδρομές σύνθεσης για τη διευκόλυνση της ταχείας και αποτελεσματικής ανάπτυξης θερανοστικών παραγόντων. Με τον καθορισμό παραμέτρων από τα υφιστάμενα συνθετικά σύνολα δεδομένων (π.χ. διαλύτες, πρόσθετα, λειτουργικές ομάδες και μετατοπίσεις πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού), τα μοντέλα μπορούν να εκπαιδευτούν στο να προβλέπουν την ραδιοχημική απόδοση για ένα δεδομένο υπόστρωμα, χρησιμοποιώντας διαφορετικές πρόδρομες ουσίες και ραδιοσυνθετικές μεθόδους. Η υποβολή νέων υποψηφίων κεφαλών ως σετ δοκιμών στα μοντέλα θα επιτρέψει την ταχεία αναγνώριση κατάλληλων πρόδρομων ουσιών και την επισήμανση στρατηγικών για νέα θερανοστικά [31].

Δοσιμετρία ακριβείας

Το πεδίο της ραδιοφαρμακευτικής δοσιμετρίας προχωρά ραγδαία. Μετά τη χορήγηση ραδιοφαρμάκων, η δυναμική και πολύπλοκη φαρμακοκινητική έχει ως αποτέλεσμα την χρονικά μεταβλητή βιοκατανομή. Η αλληλεπίδραση των ιονιζόντων σωματιδίων που προέρχονται από τον ενέσιμο παράγοντα και τον φυσιολογικό ιστό έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεση ενέργειας. Η ποσοτικοποίηση αυτής της αποτιθέμενης ενέργειας και το βιολογικό της αποτέλεσμα είναι η ουσία της δοσιμετρίας, με δυνατότητα σύνδεσης της εναποτιθέμενης ενέργειας με τη βιολογική επίδρασή της σε ασθενείς και φυσιολογικούς ιστούς. Στην δοσιμετρία, η SPECT χρησιμεύει ως συσκευή ποσοτικής μέτρησης μετά την θεραπεία. Η πρόκληση είναι η δυσκολία των ασθενών να παραμείνουν επίπεδοι και ακίνητοι στο τραπέζι σάρωσης για τον απαιτούμενο χρόνο. Οι μέθοδοι ανακατασκευής ή βελτίωσης εικόνας που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη μπορούν να μειώσουν τον απαιτούμενο χρόνο σάρωσης της SPECT για τους ασθενείς, διατηρώντας ή ενισχύοντας την ακρίβεια της ποσοτικοποίησης και ενεργοποιώντας την διόρθωση εξασθένησης στην SPECT [31].

Πολλαπλά στάδια της δοσιμετρίας μπορούν ενδεχομένως να ενισχυθούν με μεθόδους Τεχνητής Νοημοσύνης, συμπεριλαμβανομένης της καταγραφής εικόνων πολλαπλών τρόπων και πολλαπλών χρονικών σημείων, της τμηματοποίησης οργάνων και όγκων, της προσαρμογής καμπύλης χρονικής δραστηριότητας, της εκτίμησης της χρονικά ενσωματωμένης δραστηριότητας, της μετατροπής της χρονικά

ενσωματωμένης δραστηριότητας σε απορροφούμενη δόση, της σύνδεσης της δοσιμετρίας μακροκλίμακας με τη δοσιμετρία μικροκλίμακας και της κατάληξης σε ολοκληρωμένο προφίλ δόσης ασθενούς [31].

Προγνωστική δοσιμετρία

Τα υφιστάμενα μοντέλα μπορούν να εκτελούν δοσιμετρία πριν ή μετά τη θεραπεία. Αντίθετα τα εξατομικευμένα RPT απαιτούν προγνωστική δοσιμετρία για τη βέλτιστη συνταγογράφηση της δόσης, στην οποία μπορεί να διαδραματίσει ρόλο η Τεχνητή Νοημοσύνη. Οι σαρώσεις προθεραπείας της PET (στατικές ή δυναμικές) θα μπορούσαν να μοντελοποιήσουν ραδιοφάρμακα και απορροφημένες δόσεις σε όγκους και φυσιολογικά όργανα. Επιπλέον, είναι δυνατή η επιπλέον χρήση ενδοθεραπευτικών σαρώσεων για να προβλεφθούν καλύτερα και να προσαρμόσουν τις δόσεις σε επερχόμενους κύκλους.

Συνολικά, το μέλλον της Τεχνητής Νοημοσύνης περιλαμβάνει ακριβή και ταχεία αξιολόγηση των διαφορετικών προσεγγίσεων RPT (διαφοροποίηση της εγχυμένης δόσης, του ρυθμού ραδιενέργειας κ.α.) χρησιμοποιώντας την έννοια του θερανοστικού ψηφιακού διδύμου. Το θερανοστικό ψηφιακό δίδυμο, μπορεί να βοηθήσει τους γιατρούς της Πυρηνικής Ιατρικής σε πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Γενικότερα η Τεχνητή Νοημοσύνη επιτρέπει τον πειραματισμό (στον ψηφιακό κόσμο) με διαφορετικά σενάρια θεραπείας, βελτιστοποιώντας έτσι τις παρεχόμενες θεραπείες. Επίσης, μπορεί να επηρεάσει τις λειτουργίες της Πυρηνικής Ιατρικής όπως: α) τον προγραμματισμό των ασθενών και την χρήση των απαιτούμενων πόρων, β) την προγνωστική συντήρηση των συσκευών προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα απροσδόκητα διαστήματα διακοπής λειτουργίας και γ) την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων μέτρησης ποιοτικού ελέγχου για την ανακάλυψη κρυμμένων μοτίβων που υποδεικνύουν δυνατότητες βελτίωσης. Ακόμη, μπορεί να συνεισφέρει στην παρακολούθηση της απόδοσης των συσκευών σε πραγματικό χρόνο για την καταγραφή σφαλμάτων και τον εντοπισμό παρεκκλίσεων. Αυτές οι διαδικασίες θα κάνουν τις πρακτικές της Πυρηνικής Ιατρικής ασφαλέστερες, περισσότερο αξιόπιστες και πολυτιμότερες [31].

Με την σειρά της η διαλογή επειγόντων ευρημάτων και η επαύξηση των χρονοβόρων εργασιών θα μπορούσε να βελτιώσει την ανάκαμψη του χρόνου αναφοράς για τις πιο κρίσιμες περιπτώσεις και να αυξήσει την αποτελεσματικότητα των γιατρών της Πυρηνικής Ιατρικής, επιτρέποντας τους να παρέχουν πιο αποτελεσματική ιατρική φροντίδα. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης που συμπορεύονται με την Πυρηνική Ιατρική είναι βιώσιμα μέσω της ανάπτυξης υφιστάμενων κωδίκων διαδικαστικής ορολογίας και μέσω της ανάθεσης κατάλληλων σχετικών μονάδων αξίας για τα τεχνικά και επαγγελματικά εξαρτήματα. Είναι επίσης πιθανή η αυξημένη αποτελεσματικότητα στην ερμηνεία να επιτρέψει στην Τεχνητή Νοημοσύνη να αναπτυχθεί σε κλινικές ροές εργασιών με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο[31].

5.3 Το οικοσύστημα της Τεχνητής Νοημοσύνης

Πραγματοποίηση των ευκαιριών και πλαισίωση των προκλήσεων

Αν και τα πρώτα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης της Πυρηνικής Ιατρικής έχουν ήδη αναδυθεί, παραμένουν πολλές οι ευκαιρίες στις οποίες η συνεχής διάδοση της τεχνολογίας της, θα μπορούσε να ενισχύσει την ακρίβεια της φροντίδας των ασθενών και την αποτελεσματικότητα της πρακτικής. Το περιβάλλον στο οποίο προκύπτει η ανάπτυξη, η αξιολόγηση, η υλοποίηση και η διάδοση της Τεχνητής Νοημοσύνης δημιουργεί την ανάγκη για ένα βιώσιμο οικοσύστημα που θα επιτρέπει την πρόοδο, και θα μετριάξει της ανησυχίες των ενδιαφερομένων [32].

Επιπροσθέτως, ο συνολικός κύκλος ζωής των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης, από τη σύλληψη έως την οικειοποίηση των δεδομένων εκπαίδευσης, την ανάπτυξη μοντέλων και την κατασκευή πρωτοτύπων, την δοκιμή παραγωγής, την επικύρωση και την αξιολόγηση, την υλοποίηση και εγκατάσταση και την επιτήρηση μετά την ανάπτυξη, πραγματοποιείται σε ένα πλαίσιο που ονομάζουμε οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης. Ένα κατάλληλο οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να συμβάλλει στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης μέσω του κύκλου ζωής τους και της στενής συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερομένων [32].

5.4 Προκλήσεις ανάπτυξης, επικύρωσης και εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική

Ανάπτυξη εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης και ιατρικών συσκευών. Πέντε προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα επιμελημένων δεδομένων, τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου, τη μέτρηση και επικοινωνία της αβεβαιότητας, τον προσδιορισμό των κλινικά σημαντικών περιπτώσεων χρήσης και τη βελτίωση των προσεγγίσεων της ομαδικής επιστήμης [32].

Αξιολόγηση (Επαλήθευση απόδοσης). Οι θεωρίες σχετικά με την κατάλληλη αξιολόγηση του λογισμικού Τεχνητής Νοημοσύνης είναι ευρείες και αποτελούν ενεργό πεδίο των σύγχρονων ερευνών. Η καθιέρωση σαφών κατευθυντήριων γραμμών για το προφίλ απόδοσης παραμένουν ωστόσο μια πρόκληση. Οι πιο επίκαιρες μελέτες επαλήθευσης αξιολογούν τις μεθόδους Τεχνητής Νοημοσύνης με βάση μετρήσεις που δεν γνωρίζουν την απόδοση των κλινικών εργασιών. Παρόλο που η αξιολόγηση αυτή μπορεί να βοηθήσει να καταδειχθεί ότι είναι πολλά υποσχόμενη, υπάρχει σημαντική ανάγκη για περαιτέρω δοκιμές σε συγκεκριμένες κλινικές εργασίες πριν από την εφαρμογή των αλγορίθμων. Για παράδειγμα, η σκιαγράφηση του τρόπου αστοχίας είναι από τις πιο σημαντικές προκλήσεις [33].

Δεοντολογικές, κανονιστικές και νομικές ασάφειες. Οι σημαντικότερες δεοντολογικές ανησυχίες περιλαμβάνουν τη συγκατάθεση κατόπιν ενημέρωσης για τη χρήση δεδομένων, την αναπαραγωγή της ιστορικής μεροληψίας και αδικίας που ενσωματώνονται στα δεδομένα εκπαίδευσης, τις ακούσιες συνέπειες του οργανισμού συσκευών Τεχνητής Νοημοσύνης, την εγγενή αδιαφάνεια ορισμένων αλγορίθμων, τις ανησυχίες σχετικά με τον αντίκτυπο της Τεχνητής Νοημοσύνης στις ανισότητες της υγειονομικής περίθαλψης και την αξιοπιστία. Τέλος, η τεχνητή νοημοσύνη στην Πυρηνική Ιατρική έχει περιορισμένο νομικό προηγούμενο [32].

Εφαρμογή κλινικών λύσεων τεχνητής νοημοσύνης και παρακολούθηση μετά την εγκατάσταση. Η έλλειψη μιας πλατφόρμας τεχνητής νοημοσύνης που να ενσωματώνει εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στη ροή εργασιών της Πυρηνικής Ιατρικής είναι μία από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις της εφαρμογής. Τα εμπόδια διάδοσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ατομικό επίπεδο (πάροχοι υγειονομικής περίθαλψης), σε θεσμικό επίπεδο (κουλτούρα οργανισμού) και σε κοινωνικό επίπεδο. Η ανάπτυξη δεν αποτελεί το τέλος της διαδικασίας υλοποίησης [32].

5.5 Εμπιστοσύνη και Αξιοπιστία

Στην Ιατρική, η εμπιστοσύνη αποτελεί τον θεμέλιο λίθο. Απαιτούνται επιτυχείς λύσεις στις προαναφερθείσες προκλήσεις, όπου και πάλι δεν θα κριθούν επαρκείς για τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης στην Ιατρική. Καλά αναπτυγμένες και επικυρωμένες συσκευές Τεχνητής Νοημοσύνης με υποστηρικτικό ρυθμιστικό πλαίσιο, κατάλληλη αποκατάσταση και επιτυχή πρωτογενή εφαρμογή μπορεί να αποτύχουν εάν οι γιατροί, οι ασθενείς και η κοινωνία χάσουν την εμπιστοσύνη τους λόγω της έλλειψης διαφάνειας και άλλων κρίσιμων στοιχείων αξιοπιστίας, όπως η αντιληπτή απροσεξία στις ανισότητες του πεδίου της υγείας ή στη φυλετική διάκριση. Με βάση μια πρόσφατη έρευνα, διαπιστώθηκε σημαντική δυσπιστία μεταξύ των παρόχων υγειονομικής περίθαλψης αναφορικά με τα συστήματα Τεχνητής νοημοσύνης και τη βιομηχανία της Τεχνητής νοημοσύνης, συνειδητοποιώντας ωστόσο τη σημασία και τα οφέλη αυτής της νέας τεχνολογίας. Οι ερωτηθέντες της έρευνας τόνισαν επίσης τη σημασία της ηθικής χρήσης και την ανάγκη για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ιατρών στα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης, μεταξύ άλλων παραγόντων. Συνεπώς υπάρχει ανάγκη για μια ολοκληρωμένη ανάλυση του οικοσυστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης για να καθοριστούν και για να αποσαφηνιστούν τα βασικά στοιχεία αξιοπιστίας προκειμένου να αξιοποιηθούν τα οφέλη της Τεχνητής Νοημοσύνης στην κλινική πρακτική της Πυρηνικής Ιατρικής [34].

Εφόσον, η ασφάλεια, η ευημερία και τα δικαιώματα των ασθενών μας διακυβεύονται, οι επιστήμονες της Τεχνητής Νοημοσύνης και της Πυρηνικής Ιατρικής θα πρέπει να δεσμευτούν να στηρίξουν αρχές που είναι ανθεκτικές στο μέλλον και φιλικές προς την καινοτομία. Η προθυμία των ιατρών και των ασθενών να βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο εργαλείο ενώ έρχονται αντιμέτωποι με μια επικίνδυνη κατάσταση αποτελεί το μέτρο της αξιοπιστίας του εν λόγω εργαλείου. Στην περίπτωση των συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης, αυτή η προθυμία βασίζεται σε ένα σύνολο συγκεκριμένων πεποιθήσεων σχετικά με την αξιοπιστία, την προβλεψιμότητα και την ευρωστία του εργαλείου, όπως επίσης και στην αξιοπιστία

των διαδικασιών που εμπλέκονται στον κύκλο ζωής του συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης (ανάπτυξη, αξιολόγηση/επικύρωση, υλοποίηση και χρήση) [33].

Ένα αξιόπιστο ιατρικό σύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης εξαρτάται από την αξιοπιστία του ίδιου του συστήματος καθώς και από την αξιοπιστία όλων των ανθρώπων και των διαδικασιών που αποτελούν μέρος του κύκλου ζωής του συστήματος. Τα αξιόπιστα ιατρικά συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν κοινωνική και επαγγελματική δέσμευση στο ηθικό πλαίσιο της Τεχνητής Νοημοσύνης. Αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνει τέσσερις αρχές που έχουν τις ρίζες τους στα θεμέλια της ιατρικής ηθικής: α) τον σεβασμό της αυτονομίας των ασθενών και των ιατρών, β) την πρόληψη της βλάβης, γ) την μεγιστοποίηση της ευημερίας των ασθενών και της κοινωνίας και δ) την δικαιοσύνη. Οι αρχές αυτές πρέπει να τηρούνται σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης [35].

5.6 Τα βασικά στοιχεία ενός αξιόπιστου συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης

Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να ενισχύουν τους γιατρούς και τους ασθενείς, επιτρέποντάς τους να λαμβάνουν καλύτερα ενημερωμένες αποφάσεις και ενισχύοντας την αυτονομία τους. Επομένως, θα πρέπει να εξεταστούν οι επιπτώσεις των αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης στην ανθρώπινη ανεξαρτησία. Θα πρέπει να είναι σαφές στους ασθενείς και τους γιατρούς ο βαθμός στον οποίο η Τεχνητή Νοημοσύνη εμπλέκεται στη φροντίδα των ασθενών και ο βαθμός εποπτείας από τους γιατρούς. Προς αυτήν την κατεύθυνση, θα πρέπει να υπάρχουν έλεγχοι για την αποφυγή της μεροληψίας της αυτοματοποίησης, η οποία είναι η τάση των ανθρώπων να εκτιμούν και να βασίζονται υπερβολικά στις παρατηρήσεις και τις αναλύσεις των υπολογιστών σε σχέση εκείνες των ανθρώπων. Επίσης, πρέπει να υπάρχει επαρκής εποπτεία της λήψης αποφάσεων με Τεχνητή Νοημοσύνη, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός ανθρώπου εντός του κυκλώματος και έναν άνθρωπο στη διοίκηση. Τα συστήματα που εμπλέκονται σε εργασίες υψηλότερου κινδύνου (π.χ., εκείνες που οδηγούν την κλινική διαχείριση και διάγνωση ή θεραπεία ασθενείας) πρέπει να παρακολουθούνται στενά από ανεξάρτητη επαγγελματική πιστοποίηση, ανάλογης των επαγγελματιών του ιατρικού κλάδου [36].

Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης πρέπει να λειτουργούν με αξιόπιστο τρόπο (επάρκεια, ακρίβεια, αξιοπιστία και αναπαραγωγιμότητα). Οι επιδόσεις αυτές θα πρέπει να είναι ανθεκτικές στο εύρος των κλινικών περιστάσεων που σχετίζονται με τη συνταγογραφούμενη χρήση τους. Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να μεταβιβάζουν ένα βαθμό βεβαιότητας για τα αποτελέσματά τους (βαθμολογία εμπιστοσύνης) και να διαθέτουν μηχανισμό παρακολούθησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων τους στο πλαίσιο ενός προγράμματος συνεχούς διασφάλισης ποιότητας. Οι τρόποι αστοχίας του αλγορίθμου πρέπει να είναι καλά χαρακτηρισμένοι, τεκμηριωμένοι και κατανοητοί από τους χρήστες. Επιπροσθέτως, τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια πάνω από τις άλλες σχεδιαστικές εκτιμήσεις (π.χ. πιθανά κέρδη σε αποδοτικότητα, οικονομία, απόδοση). Όταν συμβαίνουν ανεπιθύμητα συμβάντα, οι μηχανισμοί θα πρέπει να είναι σε θέση να διασφαλίσουν την λογοδοσία και την αποκατάσταση. Οι πάροχοι πρέπει να είναι υπεύθυνοι για τους ισχυρισμούς που

διατυπώνονται για τα συστήματα τους. Αντίστοιχα, οι γιατροί πρέπει να είναι υπεύθυνοι για τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης εφαρμόζονται και χρησιμοποιούνται στη φροντίδα των ασθενών. Η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της αιτίας μιας αποτυχίας σε ένα σύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης είναι σημαντική. Πρέπει να παρέχεται προστασία σε άτομα ή ομάδες που αναφέρουν εύλογες ανησυχίες σύμφωνα με τις αρχές της διαχείρισης κινδύνων. Ομοίως, τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης πρέπει να περιλαμβάνουν μηχανισμούς για την ελαχιστοποίηση των βλαβών, καθώς και για την πρόληψη όποτε είναι δυνατόν, ενώ οφείλουν να συμμορφώνονται με όλα τα απαιτούμενα πρότυπα κυβερνοασφάλειας. Θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση των τρωτών σημείων, όπως η παραποίηση των δεδομένων. Επομένως, καλό θα ήταν να παρέχονται διαβεβαιώσεις για τον μετριασμό των πιθανών τρωτών σημείων και την αποφυγή κακής χρήσης, ακατάλληλης χρήσης ή κακόβουλης χρήσης [37].

Ωστόσο, τα εργαλεία που προσφέρει η Τεχνητή Νοημοσύνη μπορούν να είναι ιδιαίτερα επαναληπτικά και προσαρμοστικά, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε συνεχή βελτίωση. Το σχέδιο περιλαμβάνει τύπους αναμενόμενων τροποποιήσεων. Πρέπει να υπάρχει μία σαφής και καλά τεκμηριωμένη μεθοδολογία (αλγόριθμος αλλαγής πρωτοκόλλου) για την αξιολόγηση της ευρωστίας και της ασφάλειας του ενημερωμένου συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης. Το πρωτόκολλο αλλαγής αλγορίθμου θα πρέπει να περιλαμβάνει κατευθυντήριες γραμμές για την διαχείριση δεδομένων, την επανεκπαίδευση, την αξιολόγηση της απόδοσης, και τις διαδικασίες ενημέρωσης. Γενικότερα λοιπόν οι προμηθευτές πρέπει να διατηρούν μια κουλτούρα ποιότητας και οργανωτικής αριστείας [35].

Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να επηρεαστούν από τις δυσλειτουργίες των δεδομένων εισόδου (ελλιπή δεδομένα κ.α.), από διάφορες ανεπάρκειες στο σχεδιασμό αλγορίθμων ή από μη βέλτιστες στρατηγικές αξιολόγησης ή παρακολούθησης των επιδόσεων. Τα ζητήματα αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε προκαταλήψεις και να προκαλέσουν βλάβη στους ασθενείς. Θα πρέπει να καταργηθούν οι διακρίσεις από συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης στη φάση της ανάπτυξης, όταν αυτό είναι δυνατόν. Η απόδοση του συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να αξιολογείται σε ένα ευρύ φάσμα ασθενειών και σε ασθενείς με συγκεκριμένη πάθηση ανεξάρτητα από εξωτερικά προσωπικά χαρακτηριστικά. Καμία συγκεκριμένη ομάδα ασθενών δεν θα πρέπει να αποκλείεται συστηματικά από την ανάπτυξη συσκευών Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι ασθενείς που υποεκπροσωπούνται ή έχουν σπάνιες ασθένειες δεν πρέπει να αποκλείονται από την ανάπτυξη ή την αξιολόγηση ενός συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης, αν και τέτοια σύνολα δεδομένων θα είναι αραιά και πιθανότατα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση των μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης που αναπτύχθηκαν μόνο σε μεγαλύτερους πληθυσμούς. Με την σειρά τους, οι κατάλληλες δοκιμές επικύρωσης σε τυποποιημένα σύνολα που ενσωματώνουν την ποικιλομορφία των ασθενών, συμπεριλαμβανομένων των σπάνιων ή ασυνήθιστων παρουσιάσεων της νόσου, θεωρούνται κρίσιμες για την αξιολόγηση της παρουσίας μεροληψίας στα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από τα δεδομένα εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να είναι επικεντρωμένα στον χρήστη και να αναπτύσσονται με επίγνωση των πρακτικών περιορισμών του περιβάλλοντος εργασίας των ιατρών. Τα χαρακτηριστικά προσβασιμότητας θα πρέπει να παρέχονται και στα άτομα με αναπηρία στο βαθμό που είναι απαραίτητο σύμφωνα με τις αρχές του καθολικού σχεδιασμού [38].

Σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης, όλοι οι ενδιαφερόμενοι που μπορεί να επηρεαστούν άμεσα ή έμμεσα θα πρέπει να συμμετέχουν ενεργά για να συνεισφέρουν, να συμβουλευθούν και να επιβλέψουν τους προγραμματιστές αλλά και τη βιομηχανία γενικότερα. Η συμμετοχή των ασθενών, των ιατρών και όλων των σχετικών παρόχων των συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης, των φορέων πληρωμής, των ρυθμιστικών φορέων και των επαγγελματικών εταιρειών είναι επιτακτική. Αυτή η χωρίς αποκλεισμούς διαφάνεια είναι απαραίτητη για ένα αξιόπιστο οικοσύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης. Χρειάζεται τακτική κλινική ανατροφοδότηση για την καθιέρωση μακροπρόθεσμων μηχανισμών ενεργής συμμετοχής [39].

Από την άλλη πλευρά, θα πρέπει να ανακοινώνεται δημόσια ο τρόπος με τον οποίο ένα σύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης επικυρώνεται για τον επισημασμένο ισχυρισμό (σκοπός, κριτήρια και περιορισμοί), περιγράφοντας την κλινική εργασία για την οποία αξιολογήθηκε ο αλγόριθμος, τον πληθυσμό που χρησιμοποιήθηκε για την επικύρωση, τα πρωτόκολλα απόκτησης, ανακατασκευής και ανάλυσης της εικόνας και τον δείκτη αξίας που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση. Πρέπει να υφίσταται κατάλληλο εκπαιδευτικό υλικό και δηλώσεις αποποίησης ευθύνης για τους επαγγελματίες της υγείας σχετικά με τον τρόπο επαρκούς χρήσης του συστήματος. Επίσης, θα πρέπει να είναι σαφές ποιες πληροφορίες κοινοποιούνται από το σύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης και ποιες πληροφορίες κοινοποιούνται από τους επαγγελματίες της υγείας. Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να ενσωματώνουν μηχανισμούς για την καταγραφή και την επανεξέταση των δεδομένων του μοντέλου Τεχνητής Νοημοσύνης ή των κανόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία συγκεκριμένων αποτελεσμάτων (δυνατότητα ελέγχου και ιχνηλασιμότητα). Η επίδραση των δεδομένων εισόδου στην έξοδο του συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να μεταφέρεται με τρόπο ώστε η σχέση τους να είναι κατανοητή από τους γιατρούς και ιδανικά από τους ασθενείς (επεξηγηματικότητα), ώστε να υπάρχει μηχανισμός κριτικής αξιολόγησης και αμφισβήτησης των αποτελεσμάτων του συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης [40].

Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η έκθεση στην Τεχνητή Νοημοσύνη θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τις κοινωνικές σχέσεις και την προσκόλληση εντός του συστήματος υγειονομικής περίθαλψης. Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να εφαρμόζονται με τρόπο που ενισχύει τη σχέση ιατρού-ασθενούς. Επίσης, δεν πρέπει να παρεμβαίνουν στην ανθρώπινη σκέψη ή να επιδεινώνουν τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις. Ο κοινωνικός και περιβαλλοντικός αντίκτυπος ενός εργαλείου Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα. Οι εργαζόμενοι στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης που επηρεάζονται από την εφαρμογή συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να έχουν την ευκαιρία να παρέχουν σχόλια και να συμβάλλουν στο εκάστοτε σχέδιο. Επιπροσθέτως, οι επαγγελματικές ενώσεις και τα προγράμματα κατάρτισης θα πρέπει να λαμβάνουν μέτρα για να διασφαλίσουν ότι τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης δεν έχουν ως αποτέλεσμα την αποπροσαρμογή των επαγγελματιών [41].

Όσον αφορά το κομμάτι της ιδιωτικότητας θα λέγαμε ότι τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης θα πρέπει να διαθέτουν κατάλληλες διαδικασίες για τη διατήρηση της ασφάλειας και του απορρήτου των δεδομένων των ασθενών. Η ποσότητα των

προσωπικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει δήλωση σχετικά με τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του απορρήτου βάσει σχεδιασμού, όπως η κρυπτογράφηση, η συγκέντρωση και η ανωνυμοποίηση. Τα συστήματα θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τα πρότυπα και τα πρωτόκολλα για τη διαχείριση των δεδομένων [42].

5.7 Οι περιορισμοί των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης

Παρόλο που η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην υγειονομική περίθαλψη προσφέρει τεράστιες δυνατότητες, πρέπει επίσης να αναγνωριστούν οι περιορισμοί της. Ένα γνωστό πρόβλημα είναι η ερμηνεία των μοντέλων. Παρόλο που η συμβολική Τεχνητή Νοημοσύνη ή τα απλά μοντέλα μηχανικής μάθησης, εξακολουθούν να γίνονται πλήρως κατανοητά από τους ανθρώπους, η ερμηνεία τους γίνεται όλο και πιο δύσκολη με πιο προηγμένες τεχνικές και είναι πλέον αδύνατη με πολλά μοντέλα βαθιάς μάθησης. Έτσι λοιπόν, η κατάσταση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε απροσδόκητα αποτελέσματα και συμπεριφορές [35].

Το ζήτημα αυτό ισχύει και για άλλες διαδικασίες στην Ιατρική, στις οποίες οι ακριβείς μηχανισμοί δράσης είναι συχνά ελάχιστα κατανοητοί (π.χ. φαρμακοθεραπεία). Για αυτόν τον λόγο, το κατά πόσον η προγνωστική Τεχνητή Νοημοσύνη είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για αποφάσεις μεγάλης εμβέλειας, αν ο ακριβής τρόπος δράσης είναι ασαφής παραμένει αδιευκρίνιστο. Ωστόσο, σε περιπτώσεις στις οποίες η Τεχνητή Νοημοσύνη ενεργεί ως βοηθός που παρέχει υποδείξεις ή παράγει αποτελέσματα που μπορούν να αναπαραχθούν από ανθρώπους ή να επαληθευτούν οπτικά (π.χ. με ογκομέτρηση), η έλλειψη ερμηνείας των υποκείμενων μοντέλων μπορεί να μην αποτελεί εμπόδιο για την κλινική εφαρμογή. Σε άλλες περιπτώσεις, ιδίως στην αναγνώριση και ερμηνεία εικόνων, ορισμένες τεχνικές (όπως οι χάρτες ενεργοποίησης) μπορούν να παρέχουν υψηλού επιπέδου οπτική εικόνα της εσωτερικής λειτουργίας των ANN. Για αυτούς τους λόγους το πρόβλημα της ερμηνείας αποτελεί αντικείμενο εντατικών ερευνών και διαφόρων πρωτοβουλιών, αν και δεν είναι σαφές κατά πόσον αυτές θα μπορέσουν να συμβαδίσουν με την ταχεία πρόοδο της ανάπτυξης όλο και πιο πολύπλοκων αρχιτεκτονικών ANN [39].

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι πολλές εφαρμογές μηχανικής μάθησης παρέχουν πάντα ένα αποτέλεσμα σε μια είσοδο, αλλά δεν μπορούν να παρέχουν ένα μέτρο βεβαιότητας της πρόβλεψής τους. Έτσι, ένας ανθρώπινος χειριστής συχνά δεν μπορεί να αποφασίσει αν θα πρέπει να εμπιστευτεί το αποτέλεσμα του λογισμικού που βασίζεται σε Τεχνητή Νοημοσύνη ή όχι. Ωστόσο, η εκπαίδευση των συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης με μεροληπτικά δεδομένα θα κάνει τα μοντέλα που προκύπτουν να παράγουν επίσης μεροληπτικές προβλέψεις (Will, 2018). Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό επειδή πολλοί χρήστες αντιλαμβάνονται τα συστήματα αυτά ως αναλυτικά ορθά και αμερόληπτα και, ως εκ τούτου, τείνουν να μην αμφισβητούν τις προβλέψεις τους. Ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την Τεχνητή Νοημοσύνη στην υγειονομική περίθαλψη είναι η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες δομημένων και σχολιασμένων δεδομένων σχετικών με την εποπτευόμενη μάθηση. Επομένως, πολλές μελέτες εργάζονται με μικρά σύνολα δεδομένων, τα οποία συνοδεύονται από υπερ-προσαρμογή, κακή γενικευσιμότητα και αναπαραγωγιμότητα. Ως εκ τούτου, απαιτείται αυξημένη συνεργασία και τυποποίηση

για τη δημιουργία μεγάλων μηχανογραφικά αναγνώσιμων συνόλων δεδομένων που αντικατοπτρίζουν τη μεταβλητότητα σε πραγματικούς πληθυσμούς και έχουν όσο το δυνατόν λιγότερη μεροληψία [43].

Κεφάλαιο 6^ο: Επίλογος

Κεφάλαιο 6^ο: Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Στον τομέα της ιατρικής, και ιδίως της ιατρικής απεικόνισης, η διαφημιστική εκστρατεία των τελευταίων ετών σχετικά με την Τεχνητή Νοημοσύνη είχε σημαντικό αντίκτυπο. Αν και τα νέα στον ημερήσιο τύπο και στις ιατρικές δημοσιεύσεις σχετικά με τις νέες δυνατότητες και τα επιτεύγματα της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι σχεδόν καθημερινές, για πολλούς ο όρος και η λειτουργία της Τεχνητής Νοημοσύνης παραμένουν ένα «άγνωστο μονοπάτι», οδηγώντας σε υπερβολικές προσδοκίες από τη μία πλευρά και σε αβάσιμους δισταγμούς από την άλλη. Οι άνθρωποι ήδη αλληλοεπιδρούν με την Τεχνητή Νοημοσύνη με διάφορους τρόπους στην καθημερινή ζωή, για παράδειγμα: α) στα smartphones, β) στο αυτοκίνητο ή γ) κατά την πλοήγηση στο διαδίκτυο, τις περισσότερες φορές όμως χωρίς να το συνειδητοποιούν [41].

Η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν ήρθε για να κάνει τους ακτινολόγους ή τους ειδικούς της Πυρηνικής Ιατρικής παρωχημένους ως ιατρικούς επιστήμονες στο άμεσο μέλλον. Από τη σκοπιά τους λοιπόν, η εξέλιξη αυτή, αντί να εκλαμβάνεται ως απειλή, πρέπει να θεωρηθεί ως μια ευκαιρία για να διαδραματίσει πρωτοποριακό ρόλο στον τομέα της υγείας και να συνεισφέρει ενεργά στην διαδικασία μετασχηματισμού τόσο της Πυρηνικής Ιατρικής, όσο και της Ιατρικής γενικότερα. Ξεκάθαρα λοιπόν υπάρχουν τεράστιες και συναρπαστικές ευκαιρίες για την Τεχνητή Νοημοσύνη προκειμένου να ωφελήσει την πρακτική της Πυρηνικής ιατρικής. Από την άλλη πλευρά όμως, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει και μπορούν να αντιμετωπιστούν. Καθώς οι τρέχουσες προκλήσεις αντιμετωπίζονται και εμφανίζονται νέες λύσεις από την πλευρά της Τεχνητής Νοημοσύνης, η Πυρηνική Ιατρική Κοινότητα έχει την ευθύνη προκειμένου να διασφαλίσει την αξιοπιστία των εργαλείων. Επομένως, όλοι μπορούμε να επωφεληθούμε από τις προσπάθειες για διασφάλιση της εφαρμογής και της χρήσης των αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης [44].

Στο σήμερα θα μπορούσαμε να πούμε πως υπάρχουν ορισμένα επίπεδα διευκόλυνσης που μπορούν να υποστηρίξουν και να επιτρέψουν ένα κατάλληλο περιβάλλον για μια αξιόπιστη Τεχνητή Νοημοσύνη. Η κοινότητα της Πυρηνικής Ιατρικής πρέπει να καθορίσει κατευθυντήριες γραμμές, για την προώθηση της φυσικής ανάπτυξης μιας αξιόπιστης Τεχνητής Νοημοσύνης. Επιπλέον, μπορούμε να δημιουργήσουμε αξιόπιστη Τεχνητή Νοημοσύνη μέσω ενεργής δέσμευσης και επικοινωνιακών δράσεων. Επιπροσθέτως, μέσω της ενθάρρυνσης της δημιουργίας αξιόπιστης Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική, θα μειωθεί η ανισότητα στην υγεία, θα επιτευχθεί η αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος υγείας και θα συμβάλει θετικά στη συνολική βελτίωση των συστημάτων υγείας της κοινωνίας χρησιμοποιώντας εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης στην πρακτική της Πυρηνικής Ιατρικής [45].

6.2 Οι μελλοντικές προοπτικές της Πυρηνικής Ιατρικής

Πληθώρα δημοσιεύσεων σχετικά με το θέμα της Τεχνητής Νοημοσύνης στην Πυρηνική Ιατρική ασχολείται με τις διαδικασίες αυτοματοποίησης. Είτε πρόκειται για τη μέτρηση (ποσοτικοποίηση και τμηματοποίηση) των παθολογιών, είτε για την ανίχνευση των παθολογιών, είτε ακόμη και για την αυτοματοποιημένη διάγνωση, η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν είναι απαραίτητο να ξεπερνάει την ανθρώπινη παρουσία για να λειτουργεί προς το κοινό καλό. Όμως, είναι προφανές πως η Τεχνητή Νοημοσύνη είναι ήδη καλύτερη από τους ανθρώπους σε ορισμένους τομείς, και αυτή η εξέλιξη είναι συνέπεια της τεχνολογικής προόδου. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν ορισμένες απόψεις όπως αυτή του Geoffrey Hinton, αναμφίβολα ενός από τους πιο γνωστούς ειδικούς σε θέματα Τεχνητής Νοημοσύνης, όπου αναφέρει πως: «*Οι άνθρωποι πρέπει να σταματήσουν να εκπαιδεύουν ακτινολόγους τώρα!*», καθώς δεν είναι απαραίτητη η παρουσία τους. Αν και οι περισσότερες έρευνες καταρρίπτουν τον φόβο της αντικατάστασης των ανθρώπων από τα συστήματα της Τεχνητής Νοημοσύνης, το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν θα έχει αντίκτυπο στην Ιατρική και δη στο πεδίο της Πυρηνικής [46].

Στο εγγύς μέλλον, η αυτοματοποίηση εργασιών έντασης, οι οποίες δεν θεωρούνται απαιτητικές από γνωστικής άποψης, όπως η κατάτμηση εικόνων ή η εύρεση προηγούμενων εξετάσεων σε διαφορετικά αποθετήρια απεικόνισης, θα είναι διαθέσιμη για κλινική εφαρμογή (BBC NEWS, 2015). Επομένως, η αλλαγή αυτή δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως απειλή αλλά ως ευκαιρία για την περαιτέρω ανάπτυξη της Πυρηνικής Ιατρικής. Στην πραγματικότητα, είναι επιτακτική ανάγκη για τον κλάδο της Πυρηνικής Ιατρικής να αναπτυχθεί στα πλαίσια που θα της προσφέρει στο μέλλον η Τεχνητή Νοημοσύνη. Η αυξανόμενη χρήση μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων στην Πυρηνική Ιατρική θα δημιουργήσει την ανάγκη για νέες δεξιότητες, όπως η επιστήμη των κλινικών δεδομένων, η επιστήμη των υπολογιστών και η μηχανική μάθηση, ιδίως στους διαγνωστικούς κλάδους. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να θέσουν δυσδιάκριτα όρια μεταξύ των διαγνωστικών κλάδων, διότι η εστίαση θα γίνεται όλο και λιγότερο στην ανίχνευση και στην ταξινόμηση μεμονωμένων ευρημάτων και περισσότερο στη συνολική ανάλυση και ερμηνεία όλων των διαθέσιμων δεδομένων για έναν ασθενή [41].

Εν τούτοις, όσοι ανήκουν στον χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής και της Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να είναι βέβαιοι πως η ιατρική απεικόνιση τους προσφέρει ένα λαμπρό μέλλον. Για αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να κατανοήσουν ότι αυτό το μέλλον είναι ανοιχτό μόνο σε εκείνους που είναι πρόθυμοι να αποκτήσουν ικανότητες όπως αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Χωρίς την εκπαίδευση και την απαραίτητη εμπειρογνομοσύνη μεταξύ των ιατρών, η υγειονομική περίθαλψη ακριβείας, η εξατομικευμένη ιατρική και η υπερδιαγνωστική είναι απίθανο να γίνουν κλινική πραγματικότητα. Εν κατακλείδι, οι άνθρωποι στον χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής δεν θα αντικατασταθούν από την Τεχνητή Νοημοσύνη, όμως το πιθανότερο είναι πως όσοι επιλέξουν να αποστασιοποιηθούν από την Τεχνητή Νοημοσύνη θα αντικατασταθούν από άλλους που θα την «αγκαλιάσουν» [47].

Αναφορές-Πηγές

- [1] IAEA. (2017, Απριλίου 01). Nuclear Medicine for Diagnosis and Treatment. *IAEA FACTSHEET*, σ. 1.
- [2] Badawi, R. (2001, Οκτωβρίου 10). Nuclear Medicine. *Physics Education*, σσ. 452-459
- [3] NIH. (2016). *National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering*. Ανάκτηση Σεπτεμβρίου 11, 2023, από <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/nuclear-medicine>
- [4] WHO. (2023). *World Health Organization*. Ανάκτηση Σεπτεμβρίου 11, 2023, από https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health?gclid=Cj0KcQjw9fqBhDSARIsAHlcQYTd5vVFpPn09qLSMj9Tc6mrecgRgTWBP4sps5Rpxu0e9IU-MCqVLxkaAtJyEALw_wcB
- [5] Pryma, D. (2014). *Radiation Detectors—Ionization Detectors*. Οξφόρδη: Oxford University. doi:<https://doi.org/10.1093/med/9780199918034.003.0004>
- [6] NIH. (2011). *Nuclear probes and intraoperative gamma cameras*. Ανάκτηση Σεπτεμβρίου 21, 2023, από <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21440694/>
- [7] Agustin, C. (2013, Οκτωβρίου 02). Single photon emission computed tomography (SPECT)/computed tomography (CT): an introduction. *Journal of Medical Radiation Sciences*, σσ. 60-61.
- [8] Maier, A., Steidl, S., Christlein, V., & Hornegger, J. (2018). *Medical Imaging Systems*. Ελβετία: Springer.
- [9] NIH. (2022, Ιούνιος 01). *National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering*. Ανάκτηση από National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering: <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/computed-tomography-ct>
- [10] Ζαχαρόπουλος, Γ. (2020, Ιούλιος 20). *υγεία*. Ανάκτηση από υγεία: <https://www.hygeia.gr/to-systima-yvridikis-apeikonisis-gia-ton-karkino-toy-prostati-fusion-imaging/>
- [11] Einat, E.-S., Zohar, K., & Bar-Shalom, R. (2009, Ιανουαρίου 15). *Hybrid Imaging (SPECT/CT and PET/CT)—Improving the Diagnostic Accuracy of Functional/Metabolic and Anatomic Imaging*. Λονδίνο: Elsevier.
- [12] Bockisch, A., Freudenberg, L., Schmidt, D., & Kuwert, T. (2009). *Hybrid Imaging by SPECT/CT and PET/CT: Proven Outcomes in Cancer Imaging*. Λονδίνο: Elsevier.
- [13] Bailey, D., Humm, J., Todd-Pokropek, A., & Van Aswegen, A. (2014). *Nuclear Medicine Physics*. Βιέννη: IAEA.
- [14] Teneo. (2023, Οκτωβρίου 09). *Teneo*. Ανάκτηση από Teneo: <https://www.teneo.ai/blog/homage-to-john-mccarthy-the-father-of-artificial-intelligence-ai>
- [15] Basu, K., Ritwik, S., & Basu, T. (2020, Οκτωβρίου 05). Artificial Intelligence: How is It Changing Medical Sciences and Its Future? *Indian Journal of Dermatology*, σ. 1.
- [16] McKinney SM, S. M.-V.-B. (2020). *International evaluation of an AI system for breast cancer screening*. Λονδίνο: Nature.
- [17] An Tang, R. T.-C. (2018, Μαΐου 18). Canadian Association of Radiologists White Paper on Artificial Intelligence in Radiology. *Sage Journal*, σσ. 120-135.

- [18] Decuyper, M., Maebe, J., Van Holen, R., & Vandenberghe, S. (2021, Δεκεμβρίου 2021). Artificial intelligence with deep learning in nuclear medicine and radiology. *EJNMMI*, σσ. 1-46.
- [19] Castiglioni, I., Rundo, L., Codari, M., Di Leo, G., Interlenghi, M., Gallivanone, F., . . . Sardanelli, F. (2021, Μαρτίου 01). AI applications to medical images: From machine learning to deep learning. *European Journal of Medical Physics*, σσ. 9-24.
- [20] Visvikis, D., Lambin, P., & Beuschaus Mauridsen, K. (2022, Απριλίου 03). Application of artificial intelligence in nuclear medicine and molecular imaging: a review of current status and future perspectives for clinical translation. *European Journal of Nuclear Medicine*, σσ. 4452-4463.
- [21] Cheng, Z., Wen, J., Huang, G., & Yan, J. (2020, Σεπτεμβρίου 20). Applications of artificial intelligence in nuclear medicine image. Στο Z. Cheng, J. Wen, G. Huang, & J. Yan, *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery* (σσ. 2793-2813). Πεκίνο: Beijing Institute of Technology.
- [22] Torres-Velazquez, M., Chen W-J, Li, X., & McMillan, A. (2021). *Application*. IEEE.
- [23] Gong, K., Guan, J., Liu C-C, & Qi, J. (2019). *PET image denoising using a deep*. IEEE.
- [24] Tzu-An Song, S. R. (2021, Μαΐου 01). PET Image Super-Resolution Using Generative Adversarial Networks. *Neural Network*, σσ. 1-21. doi:10.1016/j.neunet.2020.01.029
- [25] Mathieu Hatt, B. L. (2018, Φεβρουαρίου 01). The first MICCAI challenge on PET tumor segmentation. *Med Image Anal*, σσ. 1-40. doi:10.1016/j.media.2017.12.007
- [26] Guo Z, L. X. (2019). *Deep learning-based image segmentation on multimodal medical imaging*. IEEE.
- [27] Jiwa, M., Millet, S., Meng, X., & Hewitt, V. (2012, 07 12). *JMIR*. Ανάκτηση από JMIR: <https://www.jmir.org/2012/4/e100/>
- [28] Bradsaw, T., Boellard, R., & Dutta, J. (2022, Απριλίου 16). *Journal of Nuclear Medicine*. Ανάκτηση από Journal of Nuclear Medicine: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34740952/>
- [29] Morris, A., Saboury, B., Burkett, B., Gao, J., & Siegel, E. (2018). Reinventing Radiology: big data and the future of medical imaging. *Journal of Thoracic Imaging*, 4-16.
- [30] Gong, K., Kim, K., Cui, J., Wu, D., & Li, Q. (2021, Οκτωβρίου 10). The evolution of image reconstruction in Pet: from filtered back-projection to artificial intelligence. *PET CLINICS*, σσ. 533-542.
- [31] Ataenia, B., & Heidari, P. (2021). Artificial intelligence and the future of diagnostic and therapeutic radiopharmaceutical development: in silico smart molecular design. *PET Clinics*, 513-523.
- [32] Vinuesa, R., Azizpour, H., & Leite, I. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the sustainable development goals. *Nature Journal*, 1-10.
- [33] Hasani, N., Morris, M., & Rhamin, A. (2021). Trustworthy artificial intelligence in medical imaging. *PET Clinic*, 1-12.
- [34] Arabi, H., AkhavanAllaf, A., Sannat, A., Shiri, I., & Zaidi, H. (2021, Ιανουαρίου 03). The promise of artificial intelligence and deep learning in PET and SPECT imaging. *Physica Medica*, σσ. 122-137.
- [35] Saboury, B., Morris, M., & Siegel, E. (2021). *Future directions in artificial intelligence*. Καρόλίνα: Radio Clinic North Am.

- [36] Felix Nensa, A. D. (2020, Ιουνίου 23). Artificial Intelligence in Nuclear Medicine. *The Journal of Nuclear Medicine*, σσ. 29-35. doi:10.2967/jnumed.118.220590
- [37] D., G. (2020, Ιουνίου 23). *DARPA*. Ανάκτηση από DARPA: <https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence>
- [38] Caliskan , A., Bryson , J., & Narayanan, A. (2017, Απριλίου 14). *Science*. Ανάκτηση από Science: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aal4230>
- [39] Davenport, T., & Dreyer, T. (2018, Μαρτίου 27). *HBR*. Ανάκτηση από HBR: <https://hbr.org/2018/03/ai-will-change-radiology-but-it-wont-replace-radiologists>
- [40] Αντωνίνο, Κ. (2022). *Emergency Live*. Ανάκτηση Σεπτεμβρίου 12, 2023, από <https://www.emergency-live.com/el/health-and-safety/single-photon-emission-computed-tomography-spect-what-it-is-and-when-to-perform-it/>
- [41] BBC NEWS. (2015, Σεπτεμβρίου 11). *BBC NEWS*. Ανάκτηση από BBC NEWS: <https://www.bbc.com/news/technology-34066941>
- [42] Will, K. (2018, Ιανουαρίου 09). *Google and Others Are Building AI Systems That Doubt Themselves*. Ανάκτηση από Mit Technology: <https://www.technologyreview.com/2018/01/09/146337/google-and-others-are-building-ai-systems-that-doubt-themselves/>
- [43] Guobao Wang, A. R. (2020, Νοεμβρίου 01). PET Parametric Imaging: Past, Present, and Future. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Science*, σσ. 1-29. doi:10.1109/trpms.2020.3025086
- [44] IAEA. (2023). *Diagnostic Radiology Physics: a Handbook for Teachers and Students* (IAEA εκδ.). IAEA.
- [45] Liew, C. (2018, Μαρτίου 14). The future of radiology augmented with Artificial Intelligence: A strategy for success. *European Journal of Radiology*, σσ. 1-5.
- [46] Pinochet, P., Eude, F., Becker, S., Shah, V., Sibille, L., Toledano , M., . . . Decazes, P. (2021, Φεβρουαρίου 21). Evaluation of an Automatic Classification Algorithm Using Convolutional Neural Networks in Oncologic Positron Emission Tomography. *Frontiers in Medicine*, σσ. 1-9. doi:10.3389/fmed.2021.628179