



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Τεχνητή Νοημοσύνη στην απεικόνιση PET/CT»

«Artificial Intelligence in PET/CT imaging»

υπό

ZAMPIRA ELENH-MARIA

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασία»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή
Τσούγκος Ιωάννης, Καθηγητής ΤΙ ΠΘ
Γεωργούλιας Παναγιώτης, Καθηγητής ΤΙ ΠΘ
Βαλοτάσιου Βαρβάρα, Επ. Καθηγήτρια ΤΙ ΠΘ

Λάρισα, 2025



Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Φυσικές Αρχές Βιοϊατρικής Απεικόνισης και Ακτινοπροστασίας» του τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ήταν ιδιαίτερα καθοριστική η συμβολή των καθηγητών μας στα γνωστικά αντικείμενα που παρακολουθήσαμε σαν τμήμα, στους οποίους οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή Ιωάννη Τσούγκο, καθώς και την καθηγήτρια Δήμητρα Τσιβάκα για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μας προσέφεραν με το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους που με βοήθησαν με τις συμβουλές τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, οφείλω να εκφράσω εξίσου τις ευχαριστίες μου στους γονείς, συγγενείς και φίλους που μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν όλα τα χρόνια της προσωπικής μου εξέλιξης.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη	7
1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence): Εννοιολογική προσέγγιση/ορισμοί.....	7
1.2 Ιστορική αναδρομή και βασικές εφαρμογές	8
1.3 Η μηχανική μάθηση και η βαθιά μάθηση	9
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογίες και τεχνικές της Τεχνητής Νοημοσύνης	14
2.1 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης.....	14
2.1.1 Εφαρμογές των αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης	15
2.2 Νευρωνικά Δίκτυα και Εμβάθυνση της Μάθησης	16
2.2.1 Φυσικά Νευρωνικά Δίκτυα.....	16
2.2.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks).....	17
2.2.3 Οι βασικές αρχές των νευρωνικών δικτύων	18
2.2.4 Εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	19
2.3 Επεξεργασία των δεδομένων και βελτιστοποίηση.....	20
2.3.1 Επεξεργασία δεδομένων στη μηχανική μάθηση.....	20
2.3.2 Βελτιστοποίηση στη Μηχανική Μάθηση.....	22
2.3.3 Προκλήσεις στην επεξεργασία και βελτιστοποίηση δεδομένων	23
Κεφάλαιο 3. Αναπτυσσόμενες τάσεις και εξελίξεις της τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική και ηθικά ζητήματα.....	24
3.1 Εφαρμογές της Τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική	24
3.1.1 Η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός των βλαβών.....	24
3.1.2 Η τμηματοποίηση των βλαβών και των μαλακών ιστών	25
3.1.3 Η βελτιστοποίηση και η πρόβλεψη της δόσης	26
3.1.4 Λοιπές εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική.....	26
3.2 Ζητήματα ηθικής και κοινωνικές προκλήσεις.....	28
Κεφάλαιο 4. Τεχνητή Νοημοσύνη και η σχέση της με την απεικόνιση PET/CT	30
4.1 Εισαγωγή στην απεικόνιση PET/ CT: Σύντομη ιστορική ανασκόπηση.....	30
4.1.1 Βασικές Αρχές	31
4.1.2 Οργανολογία συστήματος PET/CT	32
4.2 Κλινικές εφαρμογές.....	33
4.3 Ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/ CT	35
4.3.1 Νέοι αλγόριθμοι ανακατασκευής εικόνας	35
4.3.2 Ποσοτικοποίηση και ανίχνευση παθολογιών	36

4.3.3 Προγνωστικά μοντέλα και θεραπεία	38
4.3.4 Διαχείριση ραδιοφαρμάκων και ροή εργασίας	39
4.4 Τεχνικές και οικονομικές παράμετροι	40
4.4.1 Μείωση κόστους και βελτιστοποίηση δόσης	41
4.4.2 Βελτιωμένη διαγνωστική ακρίβεια και έγκαιρη ανίχνευση	41
4.5 Προκλήσεις και περιορισμοί	42
Κεφάλαιο 5. Μελλοντικές προοπτικές της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/CT	43
Συμπεράσματα	45
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	47

Περίληψη

Είναι γεγονός ότι η τεχνητή νοημοσύνη στον τομέα της Ιατρικής ήρθε για να μείνει. Μια ‘άφιξη’ που σχεδιάζεται εδώ και αρκετά χρόνια, ώστε να συνεισφέρει τόσο στην εξέλιξη για ένα γρήγορο και ακριβές διαγνωστικό αποτέλεσμα, όσο και στη βελτιστοποίηση της θεραπείας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον ρόλο της τεχνητής νοημοσύνης (ΑΙ) στην απεικόνιση PET/CT και τα θετικά αποτελέσματα που μπορεί να φέρει.

Η απεικόνιση PET/CT αποτελεί βασικό εργαλείο στην ανίχνευση και παρακολούθηση ασθενειών, ιδιαίτερα στον τομέα της ογκολογίας. Η χρήση προηγμένων αλγορίθμων επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας εικόνας, την ακριβέστερη ανάλυση δεδομένων και τη διευκόλυνση στη ροή εργασίας.

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της απεικόνισης PET/CT, οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, καθώς και οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης που συμβάλλουν στην ακριβέστερη διάγνωση και στη μείωση των σφαλμάτων. Επιπλέον, συζητούνται οι εφαρμογές αυτών των τεχνικών στην κλινική πράξη, οι προκλήσεις που προκύπτουν και οι μελλοντικές προοπτικές.

Η ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών ΑΙ γενικότερα στην ιατρική απεικόνιση ενισχύει την αποτελεσματικότητα των διαγνώσεων και των θεραπευτικών χειρισμών. Παρόλο που υπάρχουν τεχνικές και ηθικές προκλήσεις, η εξέλιξη των μεθόδων αυτών αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία της απεικόνισης PET/CT στην κλινική πράξη.

Υλικά και μέθοδοι

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας είναι βιβλιογραφική. Οι πληροφορίες αντλήθηκαν κυρίως από επιστημονικά άρθρα και ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων.

Abstract

It is a fact that artificial intelligence in the field of Medicine is here to stay. This "arrival" has been planned for several years to contribute both to the advancement of fast and accurate diagnostic results and to the optimization of treatment.

This thesis examines the role of artificial intelligence (AI) in PET/CT imaging and the positive outcomes it can bring. PET/CT imaging is a fundamental tool in detecting and monitoring diseases, particularly in oncology. The use of advanced algorithms enables the enhancement of image quality, more precise data analysis, and improves the workflow efficiency.

Additionally, the fundamental principles of PET/CT imaging, image processing techniques, and AI methods that contribute to more accurate diagnoses and error reduction are presented. Furthermore, the applications of these techniques in clinical practice, the emerging challenges and future prospects are discussed.

The integration of modern AI technologies into medical imaging generally enhances the effectiveness of diagnoses and therapeutic procedures. Although technical and ethical challenges exist, the advancement of these methods is expected to significantly improve the accuracy and reliability of PET/CT imaging in clinical practice.

Materials and Methods

The research conducted for this thesis is literature-based. The information was primarily gathered from scientific articles and electronic databases.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη

1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence): Εννοιολογική προσέγγιση/ορισμοί

Με μια γενική προσέγγιση, ο όρος «τεχνητή νοημοσύνη» αναφέρεται στην ικανότητα μιας μηχανής να αναπαράγει ανθρώπινες γνωστικές λειτουργίες, όπως η μάθηση, η δημιουργικότητα ή ο σχεδιασμός. Πιο συγκεκριμένα με βάση αυτό, η τεχνητή νοημοσύνη καθιστά τις μηχανές ικανές να «κατανοούν» το περιβάλλον τους, να προχωρούν στην επίλυση προβλημάτων και γενικότερα να δρουν με στόχο την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου.^[1]

Όσον αφορά τον ορισμό της τεχνητής νοημοσύνης, υπάρχει ένα μεγάλο σύνολο προτάσεων που αποκαλύπτουν τις διαφορετικές αντιλήψεις πάνω στο ζήτημα του ορισμού της. Μια σημαντική πτυχή είναι αυτή που αφορά την ίδια την έννοια της λέξης «νοημοσύνη». Καθώς η νοημοσύνη δε συνδέεται αποκλειστικά με τη διαδικασία επίλυσης προβλημάτων, πολλοί είναι εκείνοι που εξακολουθούν να πιστεύουν πως αν και τα σημερινά συνηθισμένα συστήματα υπολογιστών μπορούν να λύσουν πολλά προβλήματα, ο τρόπος με τον οποίο το κάνουν είναι άκαμπος, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να θεωρηθεί πως έχουν νοημοσύνη.^[2]

Εντούτοις, παρά τις διαφορετικές προσεγγίσεις οι περισσότεροι ορισμοί της τεχνητής νοημοσύνης βασίζονται συχνά σε ομοιότητες μεταξύ της τεχνητής νοημοσύνης και της φυσικής/ανθρώπινης νοημοσύνης. Στο πλαίσιο αυτό ένας ορισμός που δίνεται αναφέρει πως ως τεχνητή νοημοσύνη ορίζεται ως μια τεχνολογία, η οποία είναι «παρόμοια» με τη φυσική νοημοσύνη.^[3] Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές στους τρόπους με τους οποίους η φυσική νοημοσύνη και η τεχνητή νοημοσύνη θεωρούνται παρόμοιες. Οι πρώτοι ορισμοί της τεχνητής νοημοσύνης αναφέρονται σε δομικές ομοιότητες της τεχνητής και της φυσικής νοημοσύνης. Οι ορισμοί υπό το πρίσμα αυτό, αναφέρουν πως η τεχνητή νοημοσύνη είναι δομημένη όπως ο εγκέφαλος ενός φυσικού ευφυούς όντος. Επίσης, οι ορισμοί αυτής της κατηγορίας αναφέρονται σε ομοιότητες συμπεριφοράς της τεχνητής νοημοσύνης και της φυσικής νοημοσύνης, δηλαδή *η τεχνητή νοημοσύνη συμπεριφέρεται σαν φυσικό ευφύες ον*.

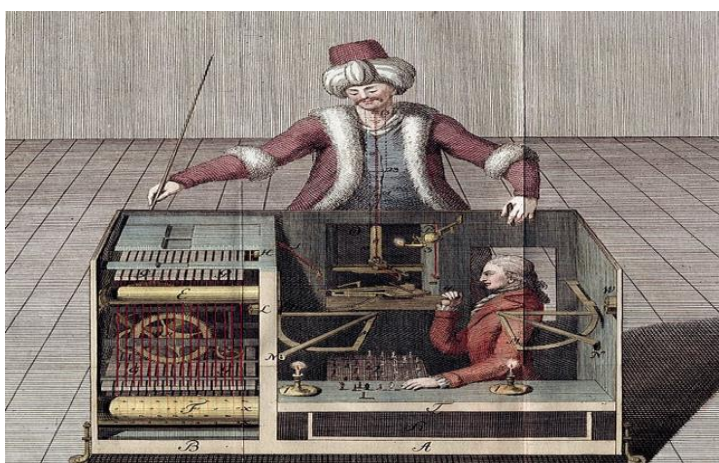
Στη βάση πιο πρόσφατων ορισμών, ως τεχνητή νοημοσύνη ορίζεται η επιστήμη και η τεχνολογία της δημιουργίας ευφύων μηχανών, κυρίως ευφύων προγραμμάτων

ηλεκτρονικών υπολογιστών. Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι με τον όρο «ευφυία» νοείται η ικανότητα ενός συστήματος να αντιλαμβάνεται, να συλλογίζεται, αλλά και προχωρά στην επίλυση προβλημάτων με τρόπο όμοιο της ανθρώπινης σκέψης.^[4]

1.2 Ιστορική αναδρομή και βασικές εφαρμογές

Οι απαρχές της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να αναζητηθούν στην αρχαία ελληνική φιλοσοφία. Τον 4^ο αιώνα π.Χ. ο Αριστοτέλης ανέπτυξε το σύστημα της τυπικής λογικής, η οποία απετέλεσε το θεμέλιο για την εξέλιξη της μαθηματικής λογικής και τους αλγορίθμους. Αιώνες μετά ο Ρενέ Ντεκάρτ διατύπωσε την ιδέα για μηχανές, οι οποίες στο μέλλον θα είχαν την ικανότητα να μιμηθούν την ανθρώπινη σκέψη.

Στο πλαίσιο της βιομηχανικής επανάστασης, η τότε τεχνολογική πρόοδος οδήγησε στην κατασκευή μηχανών, οι οποίες αναπαριστούσαν εν μέρει κάποιες γνωστικές ικανότητες.



Εικόνα 1. Αυτόματος παίκτης σκακιού (The Turk) 1770, πηγή: chess.com

Η τεχνητή νοημοσύνη, όπως είναι γνωστή σήμερα, έχει τις ρίζες της στη δεκαετία του 1950. Ειδικότερα, το 1956 στο πλαίσιο του επιστημονικού συνεδρίου που διεξήχθη στο Dartmouth College στις Η.Π.Α. ακούγεται για πρώτη φορά ο όρος «τεχνητή νοημοσύνη». Εκεί διατυπώθηκαν φιλόδοξοι στόχοι σχετικά με τη δημιουργία μηχανών, οι οποίες θα ήταν ικανές να μιμηθούν την ανθρώπινη νοημοσύνη. Στα μέσα του 1960, οι ερευνητές κάνουν τα πρώτα βήματα στη δημιουργία συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης.^[5] Παράδειγμα εδώ αποτελεί το πρόγραμμα General Problem Solver (GPS), το οποίο επιχειρούσε να επιλύσει προβλήματα, χρησιμοποιώντας γενικές

αλγοριθμικές στρατηγικές. Τη δεκαετία του 1980 και παράλληλα με την ανάπτυξη των expert systems, αναπτύχθηκαν προγράμματα, όπως το MYCIN, το οποίο είχε ως στόχο να παρέχει διαγνωστικές λύσεις σε εξειδικευμένα προβλήματα.

Στη σύγχρονη εποχή, και ειδικότερα κατά τη δεκαετία του 2010, η επανάσταση της βαθιάς μάθησης και της μηχανικής μάθησης φέρνουν την τεχνητή νοημοσύνη για άλλη μια φορά στο προσκήνιο. Την ίδια περίοδο η εξέλιξη στις τεχνικές των νευρωνικών δικτύων δίνουν μια περαιτέρω ώθηση και βοηθούν στη βελτίωση εφαρμογών, όπως η επεξεργασία της εικόνας και της γλώσσας. Το 2016 η νίκη του προγράμματος AlphaGo της DeepMind ενάντια στον πρωταθλητή του Go, Lee Sedol, αποτέλεσε ορόσημο για τις ικανότητες των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης να υπερβούν τις επιδόσεις των ανθρώπων σε σύνθετες και πολύπλοκες εργασίες. Από το 2016 έως σήμερα, ο κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης αναπτύσσεται και εξελίσσεται προσφέροντας νέες δυνατότητες στην επιστήμη και την κοινωνία.^[6]

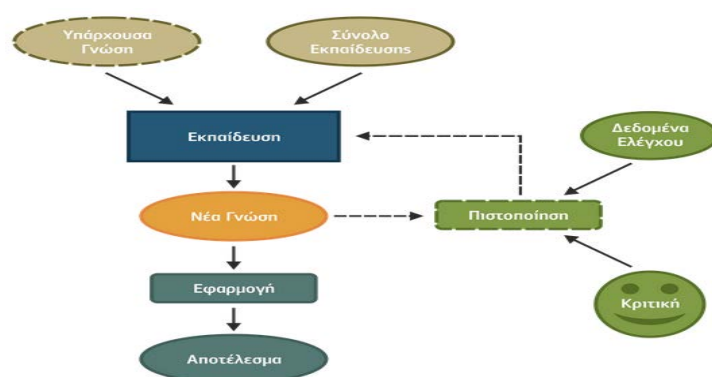
1.3 Η Μηχανική και η Βαθιά μάθηση

Οι δύο σημαντικότεροι πυλώνες της τεχνητής νοημοσύνης είναι η μηχανική μάθηση και η υποκατηγορία αυτής, η βαθιά μάθηση. Παρακάτω ακολουθεί περεταίρω ανάλυση των δύο αυτών τεχνικών.

Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Η μηχανική μάθηση συνιστά ένα υποπεδίο της επιστήμης της πληροφορικής. Στην περίπτωση του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, η μηχανική μάθηση ασχολείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων και στατιστικών μοντέλων, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα στους υπολογιστές να εκτελούν συγκεκριμένα καθήκοντα, χωρίς να απαιτείται ρητή προγραμματιστική παρέμβαση.^[7] Ως μηχανική μάθηση ορίζεται η μελέτη υπολογιστικών μεθόδων για την απόκτηση νέας γνώσης, νέων δεξιοτήτων και νέων τρόπων οργάνωσης της ήδη υπάρχουσας γνώσης.^[8] Νωρίτερα, στα τέλη της δεκαετίας του 1950, σαν μηχανική μάθηση ορίζεται ένα πεδίο μελέτης, το οποίο παρέχει στους υπολογιστές την ικανότητα να μαθαίνουν, δίχως να έχουν προγραμματιστεί.^[9]

Ειδικότερα, η μηχανική μάθηση είναι αυτή που διερευνά τη μελέτη και την κατασκευή αλγορίθμων, οι οποίοι μπορούν να μαθαίνουν από τα δεδομένα και να προχωρούν σε προβλέψεις σχετικά με αυτά. Έτσι, οι αλγόριθμοι στο πλαίσιο της μηχανικής μάθησης δεν υπαγορεύουν στον υπολογιστή τι να κάνει, αλλά στην ουσία κατασκευάζουν μοντέλα από πειραματικά δεδομένα, με στόχο να κάνουν προβλέψεις και να εξάγουν αποφάσεις, οι οποίες εκφράζονται ως αποτέλεσμα.



Εικόνα 2. Η διαδικασία της μηχανικής μάθησης πηγή: kallipos.gr

Οι εργασίες της μηχανικής μάθησης κατά βάση ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τη φύση του εκπαιδευτικού σήματος ή ανάλογα την ανατροφοδότηση (feedback) που είναι διαθέσιμη σε ένα σύστημα εκμάθησης. Οι κατηγορίες αυτές παρατίθενται αναλυτικά ακολούθως:

Επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised Learning)

Στην περίπτωση της επιβλεπόμενης μάθησης οι αλγόριθμοι επαγωγικής μάθησης (Inductive Learning Algorithms) εκπαιδεύονται με τη χρήση ετικετών (labels), όπου τα δεδομένα εισόδου είναι συνδεδεμένα με γνωστικές εξόδους. Το εκάστοτε σύστημα πρέπει να μάθει με επαγωγικό τρόπο μια συνάρτηση, η οποία ονομάζεται συνάρτηση-στόχος, η οποία αποτελεί την έκφραση του μοντέλου που περιγράφει τα δεδομένα.

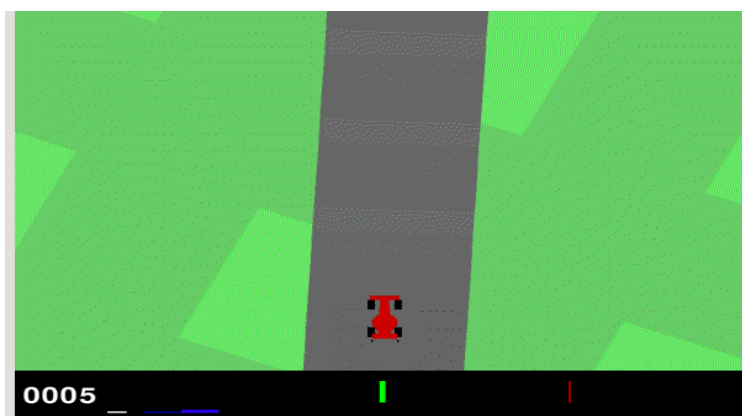
Μη επιβλεπόμενη μάθηση (Unsupervised Learning)

Κατά τη μη επιβλεπόμενη μάθηση οι υπολογιστές εξερευνούν τα δεδομένα, προκειμένου να ανιχνεύσουν μοτίβα χωρίς τη χρήση ετικετών. Πιο συγκεκριμένα, το

σύστημα έχει ως στόχο να ανακαλύψει συσχετίσεις και ομάδες από δεδομένα, έχοντας βασιστεί μόνο στις ιδιότητές τους. Το αποτέλεσμα εδώ είναι η παραγωγή προτύπων, κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μέρος των δεδομένων.

Ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning)

Στην ενισχυτική μάθηση οι αλγόριθμοι βελτιστοποιούν της συμπεριφορά τους μέσα από μια διαδικασία αλληλεπίδρασης με ένα περιβάλλον. Η λειτουργία της ενισχυτικής μάθησης έχει ως εξής: Ο φορέας λήψης αποφάσεων (agent-πράκτορας) αλληλεπιδρά διαρκώς με το περιβάλλον και προχωράει στην επιλογή ενεργειών (actions). Το περιβάλλον αντιδρά εμφανίζοντας νέες καταστάσεις στον πράκτορα. Ταυτόχρονα, το περιβάλλον παρέχει αριθμητικές τιμές, τις οποίες ο πράκτορας προσπαθεί να μεγιστοποιήσει. Έτσι, ο πράκτορας επιτυγχάνει τους στόχους που έχει θέσει, προκειμένου να μεγιστοποιήσει τις αριθμητικές τιμές.^[10]



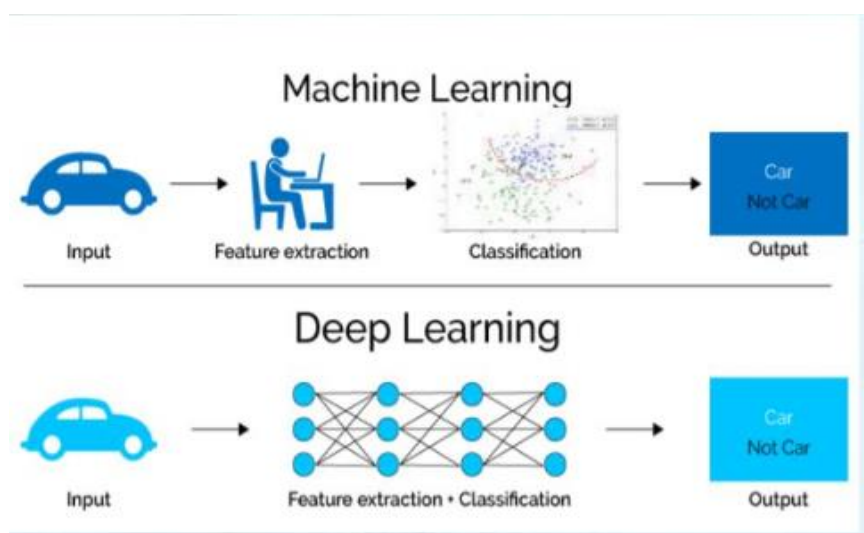
Εικόνα 3. Ενισχυτική μάθηση: Το περιβάλλον εδώ είναι ο γκρι δρόμος που κινείται το κόκκινο αυτοκίνητο (πράκτορας). Δίνονται συνεχώς ερεθίσματα από το περιβάλλον, ώστε το αυτοκίνητο να φτάσει γρήγορα στο τέρμα. πηγή: 2science.gr

Βαθιά Μάθηση (Deep Learning)

Η βαθιά μάθηση αποτελεί εξέλιξη της μηχανικής μάθησης. Αξιοποιεί και χρησιμοποιεί κυρίως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για να αναλύσει και να ερμηνεύσει μεγάλα και πολύπλοκα δεδομένα. Η βαθιά μάθηση βασίζεται κυρίως σε αλγόριθμους, οι οποίοι επιτρέπουν την αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών από τα δεδομένα, χωρίς να παρεμβαίνει ανθρώπινη δύναμη σε αυτή τη διαδικασία. Τα νευρωνικά

δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιεί η βαθιά μάθηση είναι εμπνευσμένα από τη λειτουργία και τη δομή του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται κυρίως από στρώσεις νευρώνων (layers) και έχουν την ικανότητα να επεξεργάζονται δεδομένα με τη βοήθεια συγκεκριμένων συνδέσεων.^[11]

Οι βασικότεροι τύποι νευρωνικών δικτύων είναι τα Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks-CNNs), τα Επαναλαμβανόμενα Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks-RNNs) και οι Μετασχηματιστές (Transformers). Οι κύριες εφαρμογές της βαθιάς μάθησης εμφανίζονται στον τομέα της Ιατρικής για την ανάλυση ιατρικών εικόνων, στα συστήματα αυτόματης πλοήγησης, όπου παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης των πεζών και την ανάλυση του περιβάλλοντος που κινείται το όχημα, καθώς και στην ανίχνευση ύποπτων συναλλαγών στον χρηματοπιστωτικό τομέα.^[12]

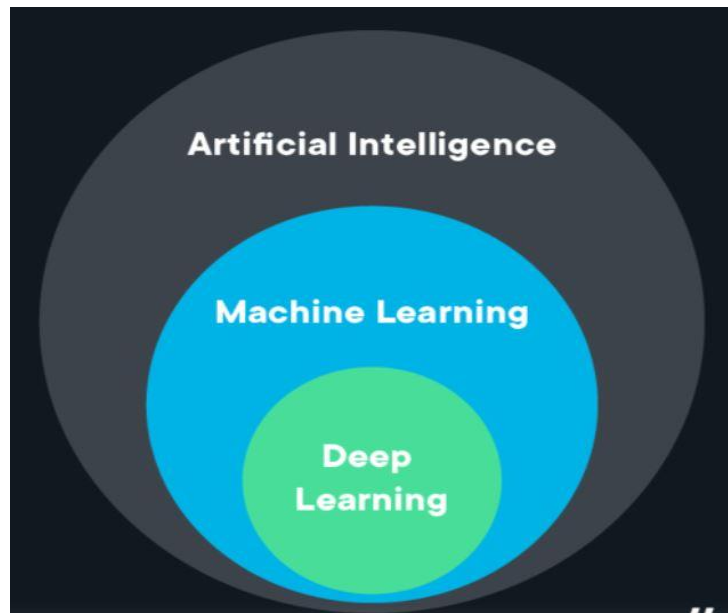


Εικόνα 4. Η λειτουργία της μηχανικής και της βαθιάς Μάθησης, πηγή: upatras.gr

Σύγκριση Μηχανικής και Βαθιάς μάθησης

Συνοπτικά, συγκρίνοντας τα δύο είδη μάθησης, παρατηρείται πως η μηχανική μάθηση αποτελεί μια διαδικασία, η οποία εκτελείται βήμα-βήμα, ενώ η βαθιά μάθηση συνιστά μια εξ' ολοκλήρου αυτόματη διαδικασία. Επιπλέον, στην περίπτωση της μηχανικής μάθησης η εξαγωγή των χαρακτηριστικών γίνεται από ανθρώπινο παράγοντα, ενώ στο πλαίσιο της βαθιάς μάθησης τα ίδια τα δεδομένα εκπαιδεύουν τους τεχνητούς

νευρώνες. Τέλος, για τη λειτουργία της μηχανικής μάθησης απαιτούνται λιγότερα δεδομένα συγκριτικά με τη βαθιά μάθηση που απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων για να λειτουργήσει αποτελεσματικά.^[13]



*Εικόνα 5. Η μηχανική και η βαθιά μάθηση ως υποσύνολα της τεχνητής νοημοσύνης,
πηγή: flatironschool.com*

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογίες και τεχνικές της Τεχνητής Νοημοσύνης

2.1 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

Η μηχανική μάθηση επικεντρώνεται κυρίως στην ανάπτυξη αλγορίθμων, καθώς και σε μεθόδους, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στους υπολογιστές να εκπαιδεύονται μέσω των δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώνουν τις επιδόσεις τους, χωρίς να έχουν την ανάγκη άμεσου προγραμματισμού.

Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στην έννοια των αλγορίθμων, με τον όρο αλγόριθμος νοείται μια ακολουθία εντολών, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να επιλύουν συγκεκριμένα προβλήματα ή να εκτελούν μια εργασία. Συνοπτικά, τα κύρια χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου είναι η προσδιοριστικότητα, ο πεπερασμένος αριθμός βημάτων, οι είσοδοι, οι έξοδοι και η αποτελεσματικότητα.^[14] Προχωρώντας στους αλγορίθμους, αυτοί κατηγοριοποιούνται με βάση τις εφαρμογές τους στα αντίστοιχα πεδία της μηχανικής μάθησης.

Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι της επιβλεπόμενης μάθησης εκπαιδεύονται, μέσα από τη χρήση δεδομένων, τα οποία περιλαμβάνουν την είσοδο και την αντίστοιχη έξοδο των δεδομένων. Ακολούθως, οι αλγόριθμοι της μη επιβλεπόμενης μάθησης χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ετικέτες στα δεδομένα. Στόχος αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων είναι να ανακαλυφθούν δομές ή μοτίβα μέσα στα δεδομένα.^[15]

Κατόπιν, οι αλγόριθμοι της ενισχυτικής μάθησης είναι εκείνοι που βασίζονται σε έναν πράκτορα, ο οποίος αλληλοεπιδράει με ένα περιβάλλον και «μαθαίνει» μέσα από ανταμοιβές ή τιμωρίες. Εν συνεχεία, οι αλγόριθμοι ημι-επιβλεπόμενης μάθησης είναι αλγόριθμοι, που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.

Τέλος, οι αλγόριθμοι της μάθησης με μεταφορά, έχουν ως στόχο τη μεταφορά γνώσης από τον έναν τομέα στον άλλον, με αποτέλεσμα να μειώνουν την ανάγκη για μεγάλο όγκο δεδομένων στον νέο τομέα.^[16]

2.1.1 Εφαρμογές των αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της καινοτομίας και της αποτελεσματικότητας σχεδόν σε κάθε κλάδο, καθιστώντας τους ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης τεχνολογίας. Παρακάτω ακολουθούν μερικές από τις πολυάριθμες εφαρμογές των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Μια από αυτές είναι η αναγνώριση εικόνας και η υπολογιστική όραση. Στο πεδίο αυτό οι αλγόριθμοι εξυπηρετούν στην ανίχνευση αντικειμένων και την ταξινόμηση εικόνων. Για παράδειγμα, στην ιατρική απεικόνιση χρησιμοποιούνται για ανίχνευση βλαβών. Ένα ακόμα παράδειγμα της κατηγορίας αυτής είναι οι αλγόριθμοι που εργάζονται στα συστήματα αναγνώρισης προσώπων, όπως για το ξεκλείδωμα των κινητών και η αναγνώριση της ομιλίας.^[17] Σε αυτό το πεδίο οι αλγόριθμοι εξυπηρετούν σε εφαρμογές μετατροπής φωνής σε κείμενο. Παράλληλα, μια ακόμα εφαρμογή τους είναι στη μετάφραση προφορικού λόγου σε πραγματικό χρόνο, αλλά και η χρήση τους ως εικονικοί βοηθοί που ανταποκρίνονται σε φωνητικές εντολές, όπως στην περίπτωση του *Amazon Echo*.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το εύρος των εφαρμογών τους, ακολουθεί η χρήση τους στον τομέα της υγείας. Εδώ παραδείγματα αποτελούν η προγνωστική διάγνωση (π.χ. προσδιορισμός ασθενειών με βάση δεδομένα ασθενών), η ανακάλυψη φαρμάκων, η εξατομικευμένη ιατρική και τέλος, η παρακολούθηση της υγείας των ασθενών με τη χρήση φορητών συσκευών. Επιπλέον, στον χρηματοπιστωτικό τομέα -ειδικότερα στις χρηματοοικονομικές υπηρεσίες- οι αλγόριθμοι εξυπηρετούν στην ανίχνευση απάτης στις συναλλαγές, την βαθμολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας και την αξιολόγηση κινδύνου για δάνεια. Στο πεδίο αυτό συγκαταλέγονται και οι αλγοριθμικές συναλλαγές για τη βελτιστοποίηση των επενδυτικών στρατηγικών.^[18]

Επιπροσθέτως, μερικές ακόμα εφαρμογές των αλγορίθμων είναι στο πεδίο των εφοδιαστικών αλυσίδων και στα logistics, όπου προβλέπουν τη ζήτηση και βοηθούν στη διαχείριση των αποθεμάτων και τη βελτιστοποίηση της διαδρομής για παραδόσεις. Ακόμη, η εφαρμογή τους εντοπίζεται και στο περιβάλλον του κυβερνοχώρου, όπου εδώ οι αλγόριθμοι εργάζονται για την ανίχνευση και την πρόληψη εισβολών, καθώς και για τον εντοπισμό προσπαθειών ηλεκτρονικού ψαρέματος (phishing) και κακόβουλων λογισμικών.^[19]

Παράλληλα, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται και στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, όπου χρησιμεύουν στην εποπτεία περιεχομένου, π.χ. για το αυτόματο φιλτράρισμα ακατάλληλου περιεχομένου, για τον εντοπισμό ψευδών ειδήσεων και παραπληροφόρησης, αλλά και για την κατανόηση της συμπεριφοράς των χρηστών για στοχευμένη παράδοση περιεχομένου.^[20]

2.2 Νευρωνικά Δίκτυα και Εμβάθυνση της Μάθησης

Η μελέτη των νευρωνικών δικτύων βρίσκεται εδώ και πολύ καιρό στο σταυροδρόμι της βιολογίας και της υπολογιστικής επιστήμης. Ακολουθώντας, θα αναλυθεί η σχέση ανάμεσα στα φυσικά νευρωνικά δίκτυα και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, καθώς και η σημασία και τα χαρακτηριστικά τους.

2.2.1 Φυσικά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα φυσικά νευρωνικά δίκτυα συνιστούν περίπλοκα συστήματα νευρώνων σε βιολογικούς οργανισμούς. Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα η επιστήμη είχε ανακαλύψει πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από νευρώνες. Ως προς τη δομή τους τα φυσικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από διασυνδεδεμένους νευρώνες, οι οποίοι επικοινωνούν μέσω συναπτικών δεσμών.^[21] Έχει υπολογιστεί πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος περιέχει περίπου 10 δις. νευρώνες, οι οποίοι είναι ταξινομημένοι σε ομάδες. Κάθε μια από αυτές τις ομάδες αποτελεί ένα φυσικό νευρωνικό δίκτυο. Ως εκ τούτου, ο εγκέφαλος περιέχει εκατοντάδες δίκτυα νευρώνων και το κάθε ένα από αυτά περιέχει χιλιάδες συνδεδεμένους μεταξύ τους νευρώνες. Ο μέσος αριθμός των συνδέσεων αυτών ανά νευρώνα υπολογίζεται σε 1000 έως 10.000.^[22]



Εικόνα 6. Φυσικός νευρώνας, πηγή sofokleousin.gr

Τα συστήματα των φυσικών νευρωνικών δικτύων επεξεργάζονται πληροφορίες μέσα από έναν συνδυασμό ηλεκτρικής και χημικής σηματοδότησης, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη διεξαγωγή πολύπλοκων εργασιών, όπως η αισθητηριακή αντίληψη, ο κινητικός συντονισμός και η μάθηση. Τα κεντρικά χαρακτηριστικά των φυσικών νευρωνικών δικτύων περιλαμβάνουν:

α) την πλαστικότητα, δηλαδή την ικανότητα προσαρμογής και επανασυνδέσεων με βάση την εμπειρία,

β) τη μη γραμμική δυναμική, η οποία αφορά την επεξεργασία σημάτων σε πολύπλοκα μοτίβα, τα οποία χρησιμεύουν στη δημιουργία σημαντικών εξόδων, και

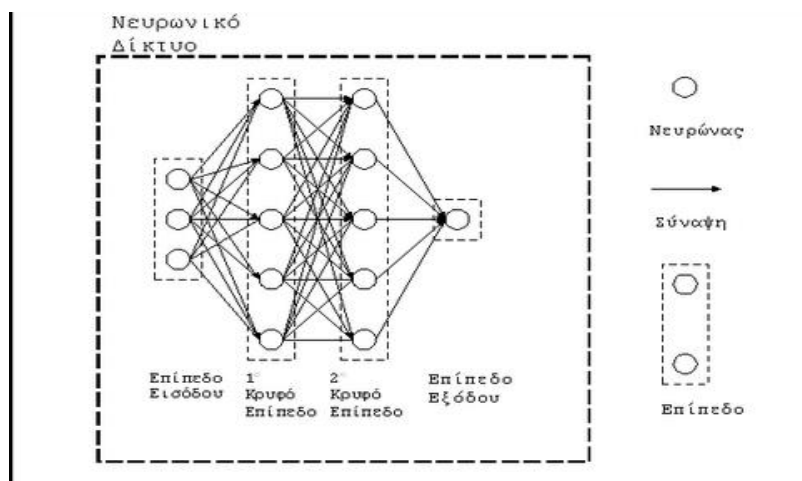
γ) τον παραλληλισμό που αποτελεί την ταυτόχρονη επεξεργασία σε πολλαπλές οδούς.^[23]

2.2.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)

Ο όρος «νευρωνικό δίκτυο» χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν αριθμό διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων, τα οποία είναι εμπνευσμένα από το αντίστοιχο βιολογικό μοντέλο. Με λίγα λόγια, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα προσπαθούν να μιμηθούν τον τρόπο συμπεριφοράς των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συνιστούν υπολογιστικά μοντέλα σχεδιασμένα να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργικότητα των βιολογικών ομολόγων τους. Αυτή η σχέση δεν είναι απλώς μεταφορική. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι υπολογιστικά μοντέλα εμπνευσμένα από την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία των φυσικών νευρωνικών δικτύων και έχουν ως στόχο να μιμηθούν τις δυνατότητες μάθησης, προσαρμογής και επεξεργασίας των φυσικών νευρωνικών δικτύων με εφαρμογές που καλύπτουν την τεχνητή νοημοσύνη, τη γνωστική επιστήμη και τη νευροεπιστήμη.^[24] Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) Τα δυναμικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, στον οποίον τα διανύσματα εξόδου περιγράφονται από πολύπλοκες εξισώσεις όμοιων ή διαφορετικών μεταξύ τους εξισώσεων, και

β) τα στατικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, όπου η έξοδος του κάθε νευρώνα συνιστά μια απλή και συγκεκριμένη συνάρτηση μόνο του διανύσματος εισόδου.^[25]



Εικόνα 7. Απεικόνιση τεχνητού νευρωνικού δικτύου, πηγή: slideplayer.gr

Ο σχεδιασμός ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνει τους τεχνητούς νευρώνες (κόμβους), οι οποίοι αποτελούν απλοποιημένες αναπαραστάσεις βιολογικών νευρώνων, τα επίπεδα και τις συνδέσεις, τα οποία μοντελοποιούνται μετά από συναπτικούς συνδέσμους στον εγκέφαλο και αποτελούνται από στρώματα εισόδου κρυφά στρώματα και στρώματα εξόδου, τους αλγόριθμους μάθησης που περιλαμβάνουν συγκεκριμένους μηχανισμούς, όπως η ανάστροφη διάδοση και η κάθοδος κλίσης και μιμούνται τις διαδικασίες μάθησης των βιολογικών συστημάτων.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στην αναγνώριση προτύπων, τη λήψη αποφάσεων και τα καθήκοντα πρόβλεψης, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να γενικεύουν από δεδομένα.^[26] Τα νευρωνικά δίκτυα, καθώς και η βαθιά μάθηση συνιστούν βασικές τεχνολογίες στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, τροφοδοτώντας πολλές εφαρμογές από την αναγνώριση εικόνας έως την επεξεργασία φυσικής γλώσσας.^[27]

2.2.3 Οι βασικές αρχές των νευρωνικών δικτύων

Στον πυρήνα τους, τα νευρωνικά δίκτυα είναι υπολογιστικά μοντέλα σχεδιασμένα να αναγνωρίζουν μοτίβα. Αποτελούνται από διασυνδεδεμένα στρώματα κόμβων, που

συχνά αναφέρονται ως τεχνητοί νευρώνες. Κάθε κόμβος επεξεργάζεται δεδομένα εισόδου, εφαρμόζει ένα βάρος σε αυτά, αθροίζει τα αποτελέσματα και τα περνάει μέσω μιας λειτουργίας ενεργοποίησης. Αυτή η διαδικασία καθορίζει την έξοδο του κόμβου, η οποία χρησιμεύει ως είσοδος για το επόμενο επίπεδο. Η αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου, περιλαμβάνει συνήθως:

1. **Επίπεδο εισόδου:** Αυτό το επίπεδο λαμβάνει την εισαγωγή ανεπεξέργαστων δεδομένων, όπως εικόνες, κείμενο ή αριθμητικά δεδομένα.
2. **Κρυφά επίπεδα:** Εκτελούν υπολογισμούς στα δεδομένα εισόδου. Το βάθος και ο αριθμός αυτών των επιπέδων καθορίζουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου.
3. **Επίπεδο εξόδου:** Παρέχει την τελική πρόβλεψη ή ταξινόμηση.^[28]

Η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνει την προσαρμογή των βαρών και των προκαταλήψεων των κόμβων για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στις προβλέψεις. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω μιας τεχνικής που ονομάζεται *backpropagation*, σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η προσομοίωση φυσικών νευρωνικών δικτύων με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα περιλαμβάνει την αναπαραγωγή δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών, όπως η πλαστικότητα των συνάψεων.^[29]

2.2.4 Εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Μερικά από τα βασικά πεδία, εφαρμογής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι αρχικά το πεδίο της Νευροεπιστήμης, όπου η κατανόηση της λειτουργίας και της δυσλειτουργίας του εγκεφάλου πραγματοποιείται, ελέγχοντας υποθέσεις μέσω προσομοιώσεων. Επίσης, στον τομέα της Γνωστικής Επιστήμης, όπου υπάρχει διερεύνηση της μάθησης, της μνήμης και των διαδικασιών λήψης αποφάσεων.^[30] Τέλος, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή στο πλαίσιο της τεχνητής νοημοσύνης, όπου εδώ παρατηρείται η δημιουργία ισχυρών, προσαρμόσιμων συστημάτων για εργασίες, όπως η αναγνώριση ομιλίας και η αυτόνομη οδήγηση.

Συνοψίζοντας από τα προηγούμενα, εξάγεται το συμπέρασμα πως η προσομοίωση των φυσικών νευρωνικών δικτύων με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα γεφυρώνει τη βιολογία και την υπολογιστική επιστήμη, προσφέροντας βαθιά γνώση και στους δύο τομείς. Παράλληλα, είναι σημαντικό να τονιστεί πως οι τρέχουσες εξελίξεις και η

συνεχιζόμενη έρευνα σε βιολογικά εμπνευσμένα μοντέλα υπόσχεται όλο και πιο ακριβείς προσομοιώσεις και μετασχηματιστικές εφαρμογές.

2.3 Επεξεργασία των δεδομένων και βελτιστοποίηση

Στην επεξεργασία δεδομένων περιλαμβάνεται η μετατροπή τους από μια δεδομένη μορφή σε μια πολύ πιο εύχρηστη και επιθυμητή μορφή. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, μαθηματική μοντελοποίηση και στατιστικές γνώσεις, όλη αυτή η διαδικασία μπορεί να αυτοματοποιηθεί.^[31] Στη συνέχεια, η έννοια της βελτιστοποίησης συνιστά μια διαδικασία κατά την οποία εκπαιδεύουμε το μοντέλο επαναληπτικά που φέρει ως αποτέλεσμα μια μέγιστη και ελάχιστη αξιολόγηση συνάρτησης. Η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά φαινόμενα στη μηχανική μάθηση, ώστε να υπάρχουν καλύτερα και ποιοτικότερα αποτελέσματα.^[32]

Η επεξεργασία δεδομένων αποτελούν θεμελιώδη συστατικά της μηχανικής μάθησης. Επηρεάζουν άμεσα την απόδοση, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μοντέλων, καθώς καθορίζουν την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και πόσο αποτελεσματικά εκπαιδεύονται τα μοντέλα. Η επεξεργασία δεδομένων περιλαμβάνει μια σειρά προπαρασκευαστικών βημάτων για τον καθαρισμό, τη μετατροπή και την οργάνωση ανεπεξέργαστων δεδομένων σε μορφές κατάλληλες για μοντέλα μηχανικής μάθησης. Η βελτιστοποίηση, από την άλλη πλευρά, αναφέρεται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την τελειοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και τη βελτίωση της προγνωστικής απόδοσης.^[33]

2.3.1 Επεξεργασία δεδομένων στη μηχανική μάθηση

Τα δεδομένα αποτελούν το θεμέλιο της μηχανικής μάθησης και η ποιότητά τους επηρεάζει άμεσα την επιτυχία ενός μοντέλου. Η επεξεργασία δεδομένων, συνιστά μια θεμελιώδη διαδικασία, η οποία διασφαλίζει ότι τα ανεπεξέργαστα δεδομένα μετατρέπονται σε χρησιμοποιήσιμη μορφή. Αυτό προκύπτει με την αφαίρεση μη σχετικών ή επιβλαβών στοιχείων. Τα βασικά βήματα επεξεργασίας δεδομένων περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Συλλογή δεδομένων

Η διαδικασία αυτή ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως βάσεις δεδομένων. Η συλλογή δεδομένων πρέπει να γίνεται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται το γεγονός πως τα δεδομένα είναι αντιπροσωπευτικά του πραγματικού προβλήματος που μοντελοποιείται. Τα δεδομένα κακής προέλευσης μπορούν να οδηγήσουν σε μεροληπτικά μοντέλα.^[34]

2. Καθαρισμός δεδομένων

Στο δεύτερο βήμα, τα ανεπεξέργαστα δεδομένα συχνά περιέχουν θόρυβο ή τιμές που λείπουν ή ασυνέπειες. Προκειμένου τα δεδομένα να καθαριστούν, υπάρχουν οι ακόλουθες τεχνικές:

- i. **Χειρισμός τιμών που λείπουν:** Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει χρήση μεθόδων όπως ο καταλογισμός (μέσος όρος, διάμεσος κλπ.) ή η διαγραφή.
- ii. **Ανίχνευση ακραίων τιμών:** Ουσιαστικά, η τεχνική αυτή είναι ο προσδιορισμός και η αντιμετώπιση ακραίων τιμών μέσω της χρήσης διάφορων μεθόδων. Ένα παράδειγμα αφορά την αντιμετώπιση θορύβου, όπου τίθενται σε εφαρμογή τεχνικές εξομάλυνσης ή μηχανισμοί φιλτραρίσματος για να αφαιρεθούν τα μη σχετικά δεδομένα.^[35]

3. Μετασχηματισμός δεδομένων

Εδώ πραγματοποιείται η μετατροπή ανεπεξέργαστων δεδομένων σε φόρμες, οι οποίες είναι συμβατές με αλγόριθμους μηχανικής μάθησης. Οι τεχνικές μετασχηματισμού περιλαμβάνουν την κανονικοποίηση και την τυποποίηση, όπου διασφαλίζεται πως τα αριθμητικά χαρακτηριστικά εμπίπτουν σε συγκρίσιμα εύρη.^[36] Έπειτα, ακολουθεί η κωδικοποίηση δεδομένων. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη μετατροπή μεταβλητών σε αριθμητικές αναπαραστάσεις, όπως κωδικοποίηση μίας θερμοκρασίας ή κωδικοποίηση ετικετών. Τέλος, έρχεται η τεχνική Feature Engineering, η οποία αποτελείται από τη δημιουργία νέων δυνατοτήτων ή τον συνδυασμό των υπάρχόντων δυνατοτήτων για τη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου.^[37]

4. Μείωση διαστάσεων

Τα σύνολα δεδομένων υψηλών διαστάσεων μπορούν να οδηγήσουν σε υπολογιστική αναποτελεσματικότητα και υπερπροσαρμογή. Έτσι, οι τεχνικές μείωσης διαστάσεων, όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών, εφαρμόζονται για να μειώσουν τον χώρο των χαρακτηριστικών, διατηρώντας παράλληλα τις βασικές πληροφορίες.

5. Αύξηση δεδομένων

Στο πλαίσιο της αύξησης δεδομένων τα περιορισμένα σύνολα δεδομένων, καθώς και τεχνικές όπως η περιστροφή, η αναστροφή ή η κλιμάκωση μπορούν να αυξήσουν τεχνητά το μέγεθος των συνόλων δεδομένων, ειδικά σε εφαρμογές, όπως είναι η επεξεργασία εικόνας.

2.3.2 Βελτιστοποίηση στη Μηχανική Μάθηση

Η βελτιστοποίηση στη μηχανική μάθηση αναφέρεται στην προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα. Πιο συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει την εύρεση της βέλτιστης διαμόρφωσης των προκαταλήψεων απέναντι σε ένα μοντέλο. Η βέλτιστη διαμόρφωση καθοδηγείται και συνοδεύεται από τη συνάρτηση κόστους ή απώλειας.^[38] Εξηγώντας περαιτέρω, η συνάρτηση κόστους είναι αυτή που ποσοτικοποιεί τη διαφορά ανάμεσα στις προβλεπόμενες και τις πραγματικές τιμές. Επιπλέον, παρέχει ένα κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης του εκάστοτε μοντέλου.^[39]

Μια ακόμη παράμετρος βελτιστοποίησης ονομάζεται κάθοδος κλίσης. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ο αλγόριθμος Gradient Descent, ο οποίος αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης της μηχανικής μάθησης. Ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει τις παραμέτρους επαναληπτικά, υπολογίζοντας την κλίση της συνάρτησης κόστους.^[40]

Έχει καταστεί σαφές ότι η επεξεργασία δεδομένων και η βελτιστοποίηση είναι άρρηκτα συνδεδεμένες στη μηχανική μάθηση, αφού τα καλώς προσαρμοσμένα δεδομένα εξασφαλίζουν ομαλότερες διαδικασίες βελτιστοποίησης και οδηγούν στην μείωση του κινδύνου υπερβολικής ή υποτοποθέτησης των δεδομένων. Για παράδειγμα,

η αφαίρεση θορύβου κατά την προεπεξεργασία εξασφαλίζει ακριβέστερους υπολογισμούς κλίσης κατά τη βελτιστοποίηση.

2.3.3 Προκλήσεις στην επεξεργασία και βελτιστοποίηση δεδομένων

Με τη βελτίωση των δεδομένων μέσα από την επεξεργασία και τη βελτιστοποίηση προκύπτουν σημαντικές προκλήσεις. Ένα παράδειγμα είναι η επεκτασιμότητα, καθώς ο αποτελεσματικός χειρισμός μεγάλων συνόλων δεδομένων απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους.

Μια ακόμη πρόκληση είναι η μεροληψία. Ειδικότερα, στην περίπτωση που υπάρξει ακατάλληλη προεπεξεργασία, μπορεί να δημιουργηθούν προκαταλήψεις, οι οποίες ίσως με τη σειρά τους οδηγήσουν σε άδικες ή αναξιόπιστες προβλέψεις.^[41]

Άλλη επιπλέον πρόκληση που μπορεί να προκύπτει, αφορά τη σύγκλιση του αλγόριθμου. Δηλαδή, όταν ο αλγόριθμος μετά από επαναλήψεις, φτάνει σε μια σταθερή λύση. Τα σύνθετα προβλήματα της βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσουν σε αργή σύγκλιση ή ακόμα και σε μη βέλτιστες λύσεις.

Τέλος, πρόκληση αποτελεί και η ικανότητα ερμηνείας αποτελεσμάτων, καθώς η βελτιστοποίηση να μεν μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια του μοντέλου, όμως επηρεάζει την ακριβή ερμηνεία, καθιστώντας δύσκολη την εξήγηση των αποτελεσμάτων.^[42]

Κεφάλαιο 3. Αναπτυσσόμενες τάσεις και εξελίξεις της τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική και ηθικά ζητήματα

3.1 Εφαρμογές της Τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική

Είναι προφανές ότι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης στον τομέα της Ιατρικής είναι καθοριστική. Μέσω της αξιοποίησης της μηχανικής μάθησης, την επεξεργασία φυσικής γλώσσας και την υπολογιστική όραση, η τεχνητή νοημοσύνη ενισχύει τη διαγνωστική ακρίβεια, εξατομικεύει τους θεραπευτικούς χειρισμούς, βελτιστοποιεί την ανακάλυψη φαρμάκων και βελτιώνει τα συστήματα διαχείρισης της υγειονομικής περίθαλψης.

Η διαγνωστική ακρίβεια αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για την αντιμετώπιση των νόσων και τη θεραπεία των ασθενών. Στο πλαίσιο αυτό, οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι αποτελούν ιδιαίτερα μοντέλα βαθιάς μάθησης, αναπτύσσονται για τη βελτίωση της διαγνωστικής ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα, τα εργαλεία απεικόνισης, όπως η αξονική τομογραφία (CT) και η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (MRI), φαίνεται πως επωφελούνται σημαντικά από τα συστήματα αναγνώρισης εικόνας που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη. Παρακάτω αναλύονται μερικές από τις εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης.

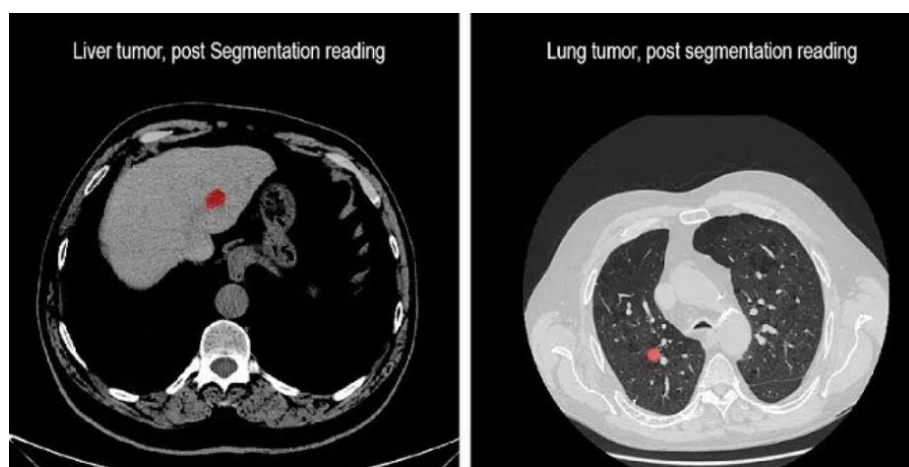
3.1.1 Η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός των βλαβών

Περιλαμβάνεται ο εντοπισμός περιοχών που μπορεί να αντιστοιχούν σε μη φυσιολογικά ευρήματα. Το σύστημα και σε αυτές τις περιπτώσεις εκπαιδεύεται μέσω μεγάλου όγκου εικόνων, πάνω στις οποίες είναι σχεδιασμένες και σχολιασμένες οι παθολογικές περιοχές. Οι εικόνες αυτές μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές, κλινικές έρευνες και βάσεις δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα CNNs και συνήθως μερικά από τα βήματα που ακολουθούνται για την εντόπιση μιας βλάβης είναι η προεπεξεργασία των δεδομένων εισόδου, π.χ. αφαιρώντας τμήματα της εικόνας μη σχετικά με τη βλάβη, η αναγνώριση θέσεων στην εικόνα που είναι παρόμοιες με θέσεις βλαβών (θέση, σχήμα κ.ά.) και η εξαγωγή τους και τελικά, η ταξινόμηση των εικόνων σε παθολογικές ή μη παθολογικές. Εικονικοί φαινότυποι και ιστοπαθολογικά δεδομένα έχουν εισαχθεί, επίσης, στο μοντέλο εκπαίδευσης του συστήματος, με αποτέλεσμα να

έχει τη δυνατότητα να χαρακτηρίσει υπό επίβλεψη μια βλάβη.^[43] Αυτή η διαδικασία δίνει σαφώς την ευχέρεια για βελτίωση στη ροή εργασίας, αφού ο εντοπισμός μιας βλάβης και ο χαρακτηρισμός της μπορεί να πάρει μεγάλο χρόνο στον εκάστοτε ακτινολόγο ή ειδικό.

3.1.2 Η τμηματοποίηση των βλαβών και των μαλακών ιστών

Παίζει πρωταρχικό ρόλο τόσο στη διάγνωση, όσο και στην ακτινοθεραπεία. Περιλαμβάνει τον αυτόματο σχεδιασμό των ορίων μιας βλάβης (ή όγκου-στόχου) ή ενός υγιούς μαλακού ιστού (ή Organ At Risk-OAR) με σκοπό να προσδιοριστεί ο όγκος τους και η αξιολόγησή τους με την πάροδο του χρόνου. Ακόμη, δίνει πιο ακριβείς ποσοτικές μετρήσεις (π.χ. SUVs ή δείκτες σε SPECT μυοκαρδίου), αφού γίνεται και πιο ακριβής η τμηματοποίηση των δομών. Εδώ τα CNNs λειτουργούν για την επισήμανση βλαβών σε επίπεδο pixel. Αξιοποιείται η αρχιτεκτονική U-Net για την εκπαίδευση του δικτύου, η οποία αποτελείται από μια δομή κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή, επιτρέποντας στο δίκτυο να καταγράφει γενικά και πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά της εικόνας. Ο κωδικοποιητής εξάγει χαρακτηριστικά από τις εικόνες εισόδου και ο αποκωδικοποιητής δημιουργεί μάσκες τμηματοποίησης σε επίπεδο pixel. Το σύστημα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης μπορεί να προβλέπει έναν χάρτη τμηματοποίησης, όπου κάθε pixel επισημαίνεται ως παθολογικό ή μη παθολογικό. Στο τέλος, εφαρμόζονται τεχνικές μετεπεξεργασίας, όπου μπορούν να διορθώσουν ή να αφαιρέσουν κάποιο σφάλμα στην τμηματοποίηση.^{[44][45]}



Εικόνα 8. AI τμηματοποίηση βλάβης, πηγή: www.rsipvision.com

3.1.3 Η βελτιστοποίηση και η πρόβλεψη της δόσης

Μέσω της αυτόματης τμηματοποίησης των όγκων-στόχων και των υγιών ιστών/οργάνων μπορεί να προσαρμοστεί εξίσου και η ληφθείσα δόση στην ακτινοθεραπεία. Λαμβάνονται υπόψη παράμετροι, όπως το σχήμα του όγκου, η θέση και τα χαρακτηριστικά κάθε ασθενούς. Η πρόβλεψη και η βελτιστοποίηση της δόσης γίνεται, επίσης, μέσω της αρχιτεκτονικής U-Net. Αυτή τη φορά το σύστημα είναι εκπαιδευμένο με πλάνα ακτινοθεραπείας σε επίπεδο voxel, όπου σε κάθε voxel αντιστοιχεί και μια συγκεκριμένη δόση. Έτσι, έχοντας τη δυνατότητα το σύστημα να αναγνωρίζει πού αντιστοιχεί κάθε voxel, αλλά και τι δόση έχει λάβει, μπορεί να προσαρμόσει και να προβλέψει ανάλογα τη δόση που θα πρέπει να λάβει ο κάθε ασθενής ξεχωριστά σύμφωνα με τα ατομικά χαρακτηριστικά του.^{[46][47]}

Άλλο ένα παράδειγμα βελτιστοποίησης και πρόβλεψης της δόσης είναι αυτό της θεραπείας με ¹⁷⁷Lu. Μετά τη χορήγηση του ¹⁷⁷Lu, η απεικόνιση σε γ-κάμερα μπορεί να δώσει δεδομένα για την κατανομή του ραδιοφαρμάκου και τον υπολογισμό της δόσης. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των ορίων της βλάβης και ενός υγιούς ιστού. Ένα εκπαιδευμένο CNN θα μπορούσε να δώσει αυτόματους υπολογισμούς δόσης βάσει των παραπάνω δεδομένων για τους επόμενους κύκλους χορήγησης του ¹⁷⁷Lu.^[48]

3.1.4 Λοιπές εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική

Η τεχνητή νοημοσύνη εφαρμόζεται και παρέχει σημαντικά αποτελέσματα στην παθολογία για την ανάλυση δειγμάτων ιστών. Τα ψηφιακά συστήματα παθολογίας που χρησιμοποιούν ΑΙ μπορούν να εντοπίσουν μοτίβα ενδεικτικά ασθενειών, βοηθώντας έτσι τους παθολογοανατόμους να κάνουν ακριβέστερες και ταχύτερες διαγνώσεις.^[49]

Ένα ακόμα ιατρικό πεδίο, στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνητή νοημοσύνη, είναι αυτό της εξατομικευμένης ιατρικής. Η ελπιδοφόρα αυτή εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης, παρέχει τη δυνατότητα, να προσαρμόζει τις θεραπείες σε μεμονωμένους ασθενείς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από την ανάλυση γενετικών δεδομένων, ηλεκτρονικών αρχείων υγείας, αλλά και μέσω της ανάλυσης διάφορων παραγόντων του τρόπου ζωής των ασθενών. Έτσι, μέσω αυτή της ανάλυσης η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να

προβλέψει με ποιον τρόπο ο ασθενής θα ανταποκριθεί καλύτερα σε μια συγκεκριμένη θεραπεία. Η συγκεκριμένη αυτή προσέγγιση – ιατρική ακριβείας – είναι ιδιαίτερος σημαντική στην ογκολογία, καθώς εκεί τα εργαλεία της τεχνητής νοημοσύνης αναλύουν γενετικές μεταλλάξεις για να προτείνουν στοχευμένες θεραπείες, βελτιώνοντας τα αποτελέσματά τους.^[50]

Ακολούθως, η τεχνητή νοημοσύνη συμβάλλει σημαντικά και στην φαρμακολογία. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστό πως η ανακάλυψη φαρμάκων συνιστά μια δύσκολη, μακρά, αλλά και δαπανηρή διαδικασία. Μέσω της τεχνητής νοημοσύνης επιταχύνεται η διαδικασία της ανακάλυψης φαρμάκων με την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανοί υποψήφιοι-ασθενείς που δεν ανταποκρίνονται στα ήδη υπάρχοντα φαρμακευτικά σκευάσματα. Η τεχνητή νοημοσύνη βοηθά, επίσης, στην αναπροσαρμογή των ήδη υπαρχόντων φαρμάκων, τα οποία προορίζονται για νέες θεραπευτικές χρήσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των αντιικών φαρμάκων, όπου οι αλγόριθμοι εντόπισαν ως πιθανή θεραπεία κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19.^[51]

Ο κλάδος της υγείας διανύει μια περίοδο σημαντικών μετασχηματισμών. Οι αιτίες που οδηγούν σε αυτό είναι το αυξανόμενο συνολικό κόστος της υγειονομικής περίθαλψης, καθώς και η αυξανόμενη έλλειψη εμπειρογνομόνων στον συγκεκριμένο τομέα. Ως αποτέλεσμα, ο κλάδος επιδιώκει να εφαρμόσει νέες λύσεις και διαδικασίες που βασίζονται σε νέες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη. Η τεχνητή νοημοσύνη έχει εφαρμοστεί στη διαχείριση και τη λειτουργία της υγειονομικής περίθαλψης, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι λειτουργίες των νοσοκομείων, προβλέποντας τα ποσοστά εισαγωγής ασθενών, τη διαχείριση πόρων και τη μείωση των χρόνων αναμονής. Οι εικονικοί βοηθοί υγείας και τα chatbots διευκολύνουν την εμπλοκή των ασθενών, παρέχοντας ιατρικές συμβουλές, προγραμματισμό των ραντεβού, αλλά και υπενθυμίσεις φαρμάκων.^[52] Παράλληλα, οι προγνωστικές αναλύσεις από την εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να εντοπίσουν ασθενείς, οι οποίοι διατρέχουν σοβαρό κίνδυνο, μετατρέποντας ακολούθως τις προληπτικές παρεμβάσεις σε άμεσες ή να προβλέψουν την πιθανότητα επανεισαγωγής ή επιπλοκών σε ασθενείς χρόνιων παθήσεων.^[53]

3.2 Ζητήματα ηθικής και κοινωνικές προκλήσεις

Η σημασία της αντιμετώπισης δεοντολογικών και κοινωνικών ζητημάτων στις εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική βρίσκεται στο επίκεντρο της δημιουργίας ενός τοπίου που δεν θα είναι μόνο τεχνολογικά προηγμένο, αλλά και ηθικά υγιές. Με την προσεκτική πλοήγηση σε αυτές τις εκτιμήσεις, ο κλάδος της υγειονομικής περίθαλψης μπορεί να αξιοποιήσει τη μετασχηματιστική δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης, διατηρώντας παράλληλα τις αξίες της φροντίδας με επίκεντρο τον άνθρωπο, της δικαιοσύνης και της κοινωνικής ευημερίας.^[54] Αυτό απαιτεί συνεργατικές προσπάθειες από επαγγελματίες υγείας, υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και ηθικολόγους για τη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών που προωθούν την υπεύθυνη και ηθική ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στις πρακτικές υγειονομικής περίθαλψης.^[55]

Ένας πρώτος κίνδυνος αφορά την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των αλγορίθμων. Είναι αυτονόητο ότι για να υπάρχουν σωστά αποτελέσματα, θα πρέπει να υπάρχουν ακριβή δεδομένα. Ωστόσο, η συλλογή αυτών των δεδομένων μπορεί να γίνει αρκετά δύσκολη. Στα δεδομένα αυτά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πληθυσμιακή ποικιλομορφία, τα διάφορα απεικονιστικά συστήματα, καθώς και τα κλινικά πρωτόκολλα που μπορεί να διαφέρουν από σύστημα σε σύστημα, αλλά και από τις διαφορετικές απαιτήσεις που μπορεί να έχει ο κάθε ειδικός. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ποικιλία σε εικόνες και κλινικές περιπτώσεις, αλλά και οι διαγνώσεις και οι σχολιασμοί πάνω σε αυτά τα δεδομένα θα πρέπει να συνάδουν μεταξύ τους. Είναι εύκολο να δημιουργηθούν μεροληψίες στο σύστημα, αν η εκπαίδευσή του είναι μονόπλευρη. Το παραμικρό ελάττωμα στην ποιότητα των δεδομένων μπορεί να προκαλέσει σοβαρό πρόβλημα στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης.^{[56][57][58]}

Επιπροσθέτως, ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει τους περιορισμούς του συστήματος. Όταν το σύστημα δείχνει ακριβές, υπάρχει ο κίνδυνος του εφησυχασμού, με αποτέλεσμα οι διαγνώσεις να βασίζονται στη μηχανική μάθηση και όχι στην κριτική και τις γνώσεις του χρήστη. Αυτό το γεγονός είναι τρομακτικό σε περίπτωση λάθους διάγνωσης και μετέπειτα λανθασμένου θεραπευτικού χειρισμού. Εδώ τίθεται και το μεγάλο ζήτημα της ρίψης ευθυνών μεταξύ ανθρώπων και υπολογιστικών συστημάτων.^[59]

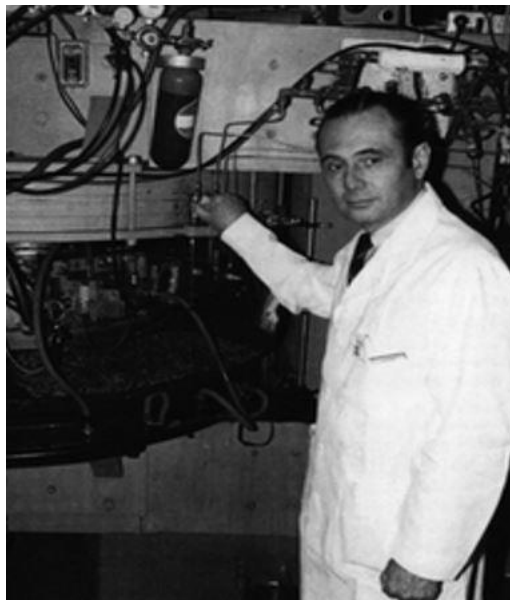
Ένα ακόμη σχετικό ζήτημα αφορά τη θέση των επαγγελματιών. Σίγουρα οι ειδικότητες που εμπλέκονται με τη διάγνωση και τη θεραπεία του ασθενούς δεν μπορούν να αντικατασταθούν πλήρως από την τεχνητή νοημοσύνη. Ωστόσο, η αυτοματοποίηση πολλών παραμέτρων που αφορούν τους παραπάνω τομείς μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την κρίση του ειδικού. Για αυτό το λόγο, ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει καλά το σύστημα που χειρίζεται και ταυτόχρονα εκπαιδεύει.^[60]

Εξίσου σημαντική είναι και η προστασία των δεδομένων. Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης χωρίς την ανθρώπινη επίβλεψη διεγείρει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των δεδομένων. Το 2016 οι Stites και Pianykh ανακάλυψαν από τον παγκόσμιο ιστό ότι 2.774 DICOM servers ήταν απροστάτευτοι απέναντι σε κακόβουλα λογισμικά ή hackers. Ένα τέτοιο γεγονός είναι εξαιρετικά σοβαρό, αφού θα μπορούσε να οδηγήσει σε διέρρευση, παραποίηση ή και καταστροφή των δεδομένων.^[61]

Κεφάλαιο 4. Τεχνητή Νοημοσύνη και η σχέση της με την απεικόνιση PET/CT

4.1 Εισαγωγή στην απεικόνιση PET/ CT: Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

Ο Michel Ter-Pogossian ήταν ένας από τους πρωτοπόρους στην ανάπτυξη της τεχνολογίας PET. Τη δεκαετία του 1970, συνεργάστηκε με τον David Kuhl και τον Michael E. Phelps για την ανάπτυξη της πρώτης συσκευής PET που χρησιμοποιούσε την τεχνολογία εκπομπής ποζιτρονίων για την απεικόνιση της ροής του αίματος και άλλων λειτουργικών διαδικασιών.



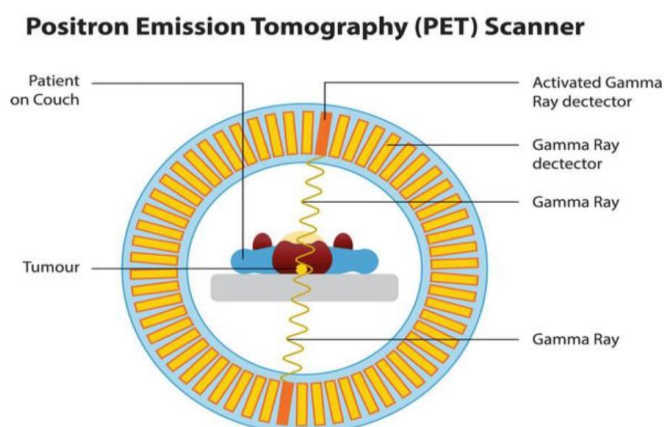
Εικόνα 9. Michel Ter-Pogossian, πηγή: en.wikipedia.org

Ο συνδυασμός σαρωτών PET και CT προτάθηκε για πρώτη φορά το 1991 από τον Raymond Raylman στη διδακτορική του διατριβή. Τα πρώτα συστήματα PET/CT κατασκευάστηκαν από τον David Townsend και τον Ronald Nutt. Το πρώτο PET/CT για κλινική αξιολόγηση χρηματοδοτήθηκε από το National Cancer Institute και εγκαταστάθηκε το 1998 στο Ιατρικό Κέντρο του Πανεπιστημίου του Πίτσμπουργκ. Το πρώτο εμπορικό σύστημα έφτασε στην αγορά το 2001 και μέχρι το 2004 είχαν εγκατασταθεί παγκοσμίως πάνω από 400 συστήματα.

4.1.1 Βασικές Αρχές

Η βασική φυσική αρχή του PET είναι η ανίχνευση των γ-φωτονίων από τον ίδιο τον εξεταζόμενο. Μετά την εκπομπή ενός χαμηλής ενέργειας ποζιτρονίου από τον πυρήνα και την σύντομη πορεία του στην ύλη, το ποζιτρόνιο χάνει την κινητική του ενέργεια και τελικά αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της εξαΰλωσης των δύο σωματιδίων, λόγω σύγκρουσης ύλης-αντιύλης, δημιουργώντας δύο αντιδιαμετρικά κατευθυνόμενες ακτίνες γ υπό γωνία 180° με ενέργεια $0,511\text{MeV}$ η καθεμία.

Ένα σύστημα PET αποτελείται από πολλούς ανιχνευτές, δεκάδες έως εκατοντάδες, τοποθετημένους σε κυκλική ή πολυγωνική διάταξη γύρω από τον ασθενή. Η γ-ακτινοβολία εξαΰλωσης αλληλεπιδρά με τους κρυστάλλους των ανιχνευτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά και προκαλεί τη γένεση σπινθηρισμών. Οι σπινθηρισμοί με τη βοήθεια των φωτοπολλαπλασιαστών ή ειδικών φωτοδιόδων μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ευθύνεται για τη δημιουργία της ψηφιακής εικόνας.



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχής του PET. Τα φωτόνια των δύο γ ακτίνων εξαΰλωσης προσπίπτουν στους αντιδιαμετρικά τοποθετημένους ανιχνευτές, πηγή: intechopen.com

Πληθώρα ερευνών οδήγησαν στην εξέλιξη της τεχνολογίας του PET φέρνοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία υβριδικών συστημάτων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο τομογράφος PET/CT συνδυάζει τη λήψη μοριακής πληροφορίας από το PET και μορφολογικής από το CT. Το υβριδικό αυτό σύστημα διαθέτει πολυτομικό ελικοειδή αξονικό τομογράφο μαζί με τελευταίας τεχνολογίας τομογράφο ποζιτρονίων, κάτι που επιφέρει ταχύτερη και ακριβέστερη απεικόνιση του εξεταζόμενου. Μετά τη χορήγηση

ραδιοφαρμάκου ο εξεταζόμενος υποβάλλεται σε χαμηλής δόσης CT και διαδοχικά σε απεικόνιση PET.

Με τη μέθοδο της σύντηξης (fusion) των εικόνων, δηλαδή της μεταβολικής και της ανατομικής εικόνας, επιτυγχάνεται η επιπροβολή αυτών των δύο. Έτσι, δημιουργείται μια εικόνα με δύο τύπους πληροφοριών, στην οποία φαίνεται το μέγεθος, η δραστηριότητα και η ανάπτυξη μιας παθολογίας.



*Εικόνα 11. Σύγχρονο σύστημα PET/CT,
πηγή: www.radiologyassociatesimaging.com*

4.1.2 Οργανολογία συστήματος PET/CT

Το αρχικό μέρος του PET είναι η ανιχνευτική διάταξη, δηλαδή οι σπινθηριστές. Ο σπινθηριστής (ανιχνευτής) είναι η βασική ανιχνευτική μονάδα των ακτίνων γ. Πρέπει να έχουν υψηλή πυκνότητα, μικρή απορρόφηση και υψηλό Z_{eff} , ώστε να απορροφώνται ικανοποιητικά τα φωτόνια των 0,511 MeV. Δεν πρέπει να είναι από εύθραυστο υλικό και η ταχύτητά τους πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη για να αποφευχθούν οι απώλειες νεκρού χρόνου. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι: Οξείδιο του Γερμανικού Βισμούθιου (BGO), Ορθοπυριτικό Λουτέσιο (LSO, LYSO) και Ορθοπυριτικό Γαδολίνιο (GSO). Οι κρύσταλλοι είναι παρατεταγμένοι ο ένας δίπλα στον άλλον σε σχήμα κύκλου, δημιουργώντας έναν δακτύλιο ανιχνευτών. Το οπίσθιο τμήμα τους συνδέεται με φωτοπολλαπλασιαστές, οι οποίοι με τη σειρά τους μετατρέπουν το φως από τους κρυστάλλους σε ηλεκτρικά σήματα που συλλέγονται από το σύστημα συλλογής δεδομένων.

Το σύστημα CT περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη: τη λυχνία ακτίνων X και τον δακτύλιο ανιχνευτών. Η λυχνία ακτίνων X είναι υπεύθυνη για την παραγωγή των ακτίνων X, οι οποίες διαπερνούν το σώμα του εξεταζόμενου. Ο δακτύλιος ανιχνευτών βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά της λυχνίας και έχει ως κύριο ρόλο να ανιχνεύει τις ακτίνες X που έχουν διαπεράσει το σώμα και να μετρά την απορρόφησή τους από διαφορετικούς ιστούς. Κατά τη διάρκεια της εξέτασης, τόσο η λυχνία όσο και ο δακτύλιος ανιχνευτών κινούνται κυκλικά γύρω από το σώμα του εξεταζόμενου, ενώ παράλληλα μετακινείται η εξεταστική τράπεζα, επιτρέποντας την καταγραφή πληροφοριών από πολλές γωνίες. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι οι ανιχνευτές θα συλλέξουν δεδομένα από όλες τις κατευθύνσεις, συμβάλλοντας στην δημιουργία τρισδιάστατων εικόνων.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται και από τα δύο συστήματα μεταφέρονται σε υπολογιστές, όπου συνδυάζονται, επεξεργάζονται και ανασυντίθενται σε εικόνες υψηλής ανάλυσης.

4.2 Κλινικές εφαρμογές

Ενώ η απεικόνιση PET και PET/CT υπήρξαν χρήσιμα ερευνητικά εργαλεία για πολλές δεκαετίες, η πραγματική ανάπτυξή τους σε κλινικές εφαρμογές έχει παρατηρηθεί περίπου την τελευταία δεκαετία. Επί του παρόντος, η κύρια εφαρμογή τους εντοπίζεται στο πεδίο της ογκολογίας, της νευρολογίας και της καρδιολογίας.

Ογκολογία

Η συνδυασμένη χρήση της PET/CT επιτρέπει την ακριβέστερη διαφοροποίηση φυσιολογικών ή μη δομών, την αξιολόγηση της εγγύτητας βλαβών με αγγεία, καθώς και την ανίχνευση κοντινών ή απομακρυσμένων μεταστάσεων, βοηθώντας στη σταδιοποίηση και την εκτίμηση της θεραπευτικής ανταπόκρισης. Η μοριακή απεικόνιση της PET, σε συνδυασμό με την ανατομική ανάλυση της CT, προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως η ταχύτερη διάγνωση και η δυνατότητα καθοδήγησης βιοψιών στις πιο μεταβολικά ενεργές περιοχές των όγκων. Η PET διαδραματίζει, επίσης, ζωτικό ρόλο στη διερεύνηση της αιμάτωσης και του μεταβολισμού των όγκων, καθώς και στην εκτίμηση της διαπερατότητας του Αιματο-Εγκεφαλικού Φραγμού. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή συμβάλλει καθοριστικά στην

ακριβή σχεδίαση πλάνων ακτινοθεραπείας, ενισχύοντας την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της θεραπείας.

Νευρολογία

Και εδώ η απεικόνιση PET/CT διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διάγνωση και διαχείριση νευρολογικών καταστάσεων, όπως η εστιακή επιληψία και η έγκαιρη διάγνωση νευροεκφυλιστικών παθήσεων, ιδιαίτερα της νόσου Alzheimer και διαφόρων παρκινσονικών συνδρόμων. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή συμβάλλει στη διαφορική διάγνωση ανοιών και ενισχύει τη δυνατότητα προεγχειρητικής ανίχνευσης, με τη βοήθεια νέων ραδιοφαρμάκων που επιτρέπουν την πρόωμη διάγνωση και παρακολούθηση των ασθενών με άνοια. Όσον αφορά την επιληψία, η PET, και ειδικότερα το FDG-PET, έχει αποδειχτεί χρήσιμη στον ακριβή εντοπισμό της εστίασης των κρίσεων, γεγονός που κατέχει τεράστια σημασία για την απόφαση για χειρουργική θεραπεία. Επιπλέον, η σάρωση με ^{18}F -DOPA χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση του ντοπαμινεργικού συστήματος και στην παρακολούθηση της νόσου Parkinson, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη διάγνωση και την αξιολόγηση αυτών των παθήσεων.

Καρδιολογία

Η PET χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο της βιωσιμότητας του μυοκαρδίου, κάτι που είναι καθοριστικό για τη σωστή επιλογή των στεφανιαίων ασθενών πριν από επεμβατικούς χειρισμούς, αλλά και για την αξιολόγηση καταστάσεων, όπως η υποψία ενδοκαρδίτιδας ή σαρκοείδωσης με προσβολή μυοκαρδίου. Ο έλεγχος της βιωσιμότητας του μυοκαρδίου, ειδικά σε προχωρημένα στάδια ισχαιμικής καρδιοπάθειας, μπορεί να προβλέψει τη βελτίωση της λειτουργίας της αριστερής κοιλίας μετά από θεραπευτικούς χειρισμούς, τη μελλοντική θνησιμότητα μετά από χειρουργικές επεμβάσεις, πιθανές καρδιακές επιπλοκές και την συνολική επιβίωση του ασθενούς. Ειδικότερα, το FDG-PET είναι χρήσιμο για τον εντοπισμό περιοχών του μυοκαρδίου που θα βελτιωθούν μετά από επαναγγείωση, συγκρίνοντας την περιφερειακή πρόσληψη FDG με την περιφερειακή ροή αίματος, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση των θεραπευτικών χειρισμών.^[62]

4.3 Ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/ CT

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει προσελκύσει πρόσφατα μεγάλη προσοχή για την πιθανή χρήση της στην ιατρική απεικόνιση. Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτίωση και την εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών από ιατρικές εικόνες, δεδομένης της τεράστιας προόδου στον τομέα της πληροφορικής, βρίσκεται στην πρώτη γραμμή αυτών των εξελίξεων. Αυτό οφείλεται στη σύγκλιση παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του αυξανόμενου αριθμού σαρώσεων που εκτελούνται, της διαθεσιμότητας εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης και της μείωσης του κόστους του υλικού που απαιτείται για την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών.^[63] Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν τα σημεία, στα οποία η τεχνητή νοημοσύνη προσφέρει σημαντικά οφέλη στην απεικόνιση PET/ CT.

4.3.1 Νέοι αλγόριθμοι ανακατασκευής εικόνας

Η ποιότητα των εικόνων PET/CT επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως τα περιορισμένα στατιστικά προσπιπτόντων φωτονίων (εξασθένηση), ο θόρυβος και τα τεχνικά σφάλματα κίνησης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανακατασκευής εικόνας, όπως η φιλτραρισμένη οπισθοπροβολή (Filtered Back Projection) και οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι, παρουσιάζουν περιορισμούς όσον αφορά την καταστολή θορύβου και την υπολογιστική απόδοση.

Η ενσωμάτωση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης στην ανακατασκευή εικόνων PET/CT έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις, συμπεριλαμβανομένης της υψηλότερης ποιότητας εικόνας, της μείωσης του χρόνου σάρωσης και της ελάττωσης της απαιτούμενης δόσης ακτινοβολίας.

Μία από τις βασικές τεχνικές που αξιοποιεί η τεχνητή νοημοσύνη είναι η μείωση του θορύβου εικόνας με χρήση βαθιάς μάθησης και υπερανάλυσης. Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs) εφαρμόζονται για τη μείωση του θορύβου στις εικόνες PET/CT, ενώ τα Generative Adversarial Networks (GANs) έχουν επιδείξει σημαντική ικανότητα στη βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το DeepPET, ένα μοντέλο βασισμένο σε CNNs που βελτιώνει τις εικόνες PET χαμηλής δόσης, ώστε να προσεγγίζουν την ποιότητα σαρώσεων με πλήρεις δόσεις, μειώνοντας την έκθεση των εξεταζόμενων στην ακτινοβολία.^[64]

Μια ακόμη καινοτομία είναι η επαναληπτική ανακατασκευή εικόνων μέσω AI. Οι αλγόριθμοι αυτοί ενσωματώνουν τη βαθιά μάθηση στις επαναληπτικές μεθόδους για τη βελτίωση της διόρθωσης της εξασθένησης και την καταστολή θορύβου. Τα υβριδικά μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης και OSEM (Ordered Subset Expectation Maximization) έχουν αποδείξει σημαντικά πλεονεκτήματα στην ανακατασκευή εικόνων. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών βελτιώνει την ανιχνευσιμότητα βλαβών, επιτρέποντας την πιο ακριβή διάγνωση, ενώ παράλληλα αυξάνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο, καθιστώντας τις εικόνες πιο ευκρινείς και λιγότερο θορυβώδεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου υβριδικού μοντέλου είναι το DeepIterate, το οποίο συνδυάζει την παραδοσιακή OSEM με αλγορίθμους βαθιάς μάθησης. Μέσω αυτού του συνδυασμού, επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση στην αντίθεση της εικόνας, διευκολύνοντας την ανίχνευση μικρών ή χαμηλής αντίθεσης βλαβών. Επιπλέον, το DeepIterate συμβάλλει στη μείωση του υπολογιστικού κόστους, απαιτώντας λιγότερη επεξεργαστική ισχύ για τη δημιουργία των εικόνων.^[65]

Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη εφαρμόζεται και στην άμεση ανακατασκευή εικόνας από ακατέργαστα δεδομένα. Νευρωνικά δίκτυα, όπως το DirectPET, χρησιμοποιούν τεχνικές αυτόματων κωδικοποιητών και μετασχηματιστών για την ανακατασκευή εικόνων απευθείας από δεδομένα ιστογράμματος (γραφική παράσταση κατανομής τιμών), χωρίς την ανάγκη επαναληπτικών υπολογισμών. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη βελτίωση της σαφήνειας και της ποσοτικοποίησης της εικόνας σε σύγκριση με τις κλασικές τεχνικές.^[66]

4.3.2 Ποσοτικοποίηση και ανίχνευση παθολογιών

Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν επικεντρωθεί στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για την ερμηνεία εικόνων PET/CT. Αρχικά, οι Kawakami et al. (2020) εφάρμοσαν ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης -το You Only Look Once Version 2 (YOLOv2)- για την ανίχνευση της φυσιολογικής και μη φυσιολογικής πρόσληψης στο FDG PET. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι η φυσιολογική πρόσληψη στις εικόνες MIP αναγνωρίστηκε γρήγορα και με ακρίβεια. Επίσης, η μη φυσιολογική πρόσληψη που ανιχνεύθηκε από το YOLOv2 ήταν με υψηλότερο ποσοστό κάλυψης από αυτό που εντοπίστηκε χειροκίνητα, κάνοντας την ανάλυση γρηγορότερη και ακριβέστερη σε σχέση με την χειροκίνητη μέθοδο.^[67]

Η μέγιστη τυποποιημένη τιμή πρόσληψης SUVmax είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος για την ερμηνεία εικόνων και την αξιολόγηση βλαβών στις καθημερινές διαγνωστικές αναφορές. Σε μια ακόμη μελέτη, οι Hirata et al. (2020) θέλησαν να ορίσουν ένα ακριβές SUVmax ως αναγνωριστικό για τον εντοπισμό βλαβών. Αν και είναι δύσκολο να εντοπιστούν οι βλάβες, όταν το SUVmax < 2 σε σαρώσεις FDG PET, αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να βοηθήσει στην κατασκευή του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης AI.^[68]

Στο πεδίο της ογκολογίας, η τεχνητή νοημοσύνη έχει χρησιμοποιηθεί για τη διάγνωση, τη διαφορική διάγνωση και τη σταδιοποίηση της νόσου. Στο πλαίσιο αυτό κινήθηκε η μελέτη των Satoh et al. (2019), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ανάλυση υφής σε μια μελέτη για να συγκρίνουν την ικανότητα διάγνωσης του καρκίνου του μαστού μεταξύ της ειδικής PET μαστού υψηλής ανάλυσης (dbPET) και της PET/CT ολόκληρου του σώματος. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τόσο η ανάλυση υφής dbPET με βάση το PET, όσο και η ολόσωμη PET/CT είχαν συγκρίσιμη ισχύ ταξινόμησης για τη διάγνωση του καρκίνου του μαστού.^[69] Ακολούθως, οι Fan et al. (2017) αξιολόγησαν τη σημασία της ανάλυσης υφής στη διαφορική διάγνωση των μεταστάσεων της σπονδυλικής στήλης με FDG PET/CT και έδειξαν πως ο συνδυασμός παραμέτρων μηχανικής μάθησης και υφής ήταν ακριβέστερος από τη χειροκίνητη διάγνωση.^[70] Κατόπιν, οι Lee et al. (2020) διερεύνησαν τη σκοπιμότητα των εικόνων SPECT/CT με βάση τα radiomics στη διαφοροποίηση των οστικών μεταστάσεων από τις καλοήθειες οστικές αλλοιώσεις. Τόσο τα μοντέλα SPECT, όσο και τα μοντέλα SPECT/CT έδειξαν καλύτερη διαγνωστική ακρίβεια από τη χειροκίνητη ταξινόμηση ασθενών που διαγνώστηκαν με μεταστάσεις σπονδυλικής στήλης ή καλοήθειες οστικές αλλοιώσεις, υποδεικνύοντας έναν νέο τρόπο σταδιοποίησης της νόσου και σχεδιασμού θεραπείας.^[71]

Εν συνεχεία και στο πεδίο της νευρολογίας πραγματοποιήθηκαν έρευνες σχετικά με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και πώς αυτή έχει εφαρμοστεί, προκειμένου να ανιχνεύσει, να διακρίνει και να ερευνήσει τους μηχανισμούς που προκαλούν νευροεκφυλιστικές ασθένειες. Έτσι, μέσω της τεχνητής νοημοσύνης οι Xie et al. (2024), αποκάλυψαν ένα μοτίβο αλλαγών στην εναπόθεση β-αμυλοειδούς σε γνωστικά φυσιολογική υγιή γήρανση, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει

τις φυσιολογικές αλλαγές από τις παθοφυσιολογικές αλλαγές και να βοηθήσει στη διερεύνηση του μηχανισμού της νόσου του Alzheimer.^[72]

4.3.3 Προγνωστικά μοντέλα και θεραπεία

Η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων που αντλούν πληροφορίες από εικόνες PET/CT, καθώς και από άλλες κλινικές παραμέτρους, όπως το ιστορικό, οι βιοχημικοί δείκτες και γενετικά δεδομένα, για να εκτιμήσουν την πιθανότητα υποτροπής ή την ανταπόκριση του ασθενούς σε θεραπεία. Ειδικότερα, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα επιτρέπουν την ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, εντοπίζοντας μοτίβα και χαρακτηριστικά στις εικόνες που δεν είναι πάντα εμφανή. Έτσι, μπορούν να εντοπιστούν πρώιμα σημάδια υποτροπής ή μη ανταπόκρισης στη θεραπεία, προσδιορίζοντας περιοχές του όγκου-στόχου που ενδέχεται να απαιτούν διαφορετική διαχείριση.

Για παράδειγμα, πολλές έρευνες έχουν χρησιμοποιήσει δεδομένα από εικόνες FDG-PET για την πρόβλεψη της υποτροπής του καρκίνου. Συνδυάζοντας αυτά τα δεδομένα με άλλες κλινικές πληροφορίες, τα μοντέλα είναι σε θέση να υπολογίσουν την πιθανότητα υποτροπής με μεγάλη ακρίβεια, επιτρέποντας τη λήψη αποφάσεων για θεραπεία νωρίτερα. Η πρόβλεψη της υποτροπής του καρκίνου είναι μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στον τομέα της ιατρικής απεικόνισης. Η δυνατότητα για πρόωπη ανίχνευση της υποτροπής μπορεί να βελτιώσει τις προοπτικές του ασθενούς, καθώς η έγκαιρη θεραπεία μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη πρόγνωση. Η τεχνολογία ΑΙ βοηθάει στην ανίχνευση αυτών των πρώιμων ενδείξεων, χρησιμοποιώντας την ανάλυση της εικόνας PET/CT, καθώς και άλλες παραμέτρους, όπως το μέγεθος του όγκου και την ικανότητα πρόσληψης του ραδιοφαρμάκου, για να υπολογιστεί η πιθανότητα υποτροπής.^[73]

Η εκτίμηση της ανταπόκρισης σε θεραπεία είναι, επίσης, ένας τομέας, στον οποίο η τεχνητή νοημοσύνη και η εικόνα PET/CT συνδυάζονται για να προσφέρουν αξιόπιστες προγνώσεις. Όταν οι όγκοι ανταποκρίνονται σε θεραπεία, συνήθως παρατηρείται μείωση της μεταβολικής δραστηριότητας, κάτι που καταγράφεται στις εικόνες PET. Η

τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να ανιχνεύσει αυτές τις αλλαγές και να βοηθήσει στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια, μειώνοντας την ανάγκη για επαναλαμβανόμενες εξετάσεις.

Η ικανότητα της τεχνητής νοημοσύνης να επεξεργάζεται και να αναλύει δεδομένα από εξετάσεις PET/CT σε συνδυασμό με άλλες κλινικές πληροφορίες είναι εξαιρετικά χρήσιμη και για την παρακολούθηση της ανταπόκρισης στη χημειοθεραπεία και στην ακτινοθεραπεία. Η μελέτη των Li et al. (2019) αναφέρεται στη χρήση των προγνωστικών μοντέλων ΑΙ για την εκτίμηση της ανταπόκρισης σε χημειοθεραπεία, όπου η τεχνητή νοημοσύνη ανέλυσε δεδομένα PET/CT για να προβλέψει την πιθανότητα επιτυχούς ανταπόκρισης στη θεραπεία. Οι αλγόριθμοι, συνδυάζοντας εικόνες PET και κλινικές πληροφορίες, μπορούν να προβλέψουν την απόκριση ενός ασθενούς στις θεραπείες, βοηθώντας στον καλύτερο σχεδιασμό του θεραπευτικού πλάνου. Οι εφαρμογές αυτές όχι μόνο βελτιώνουν τη διαγνωστική ακρίβεια, αλλά και ενισχύουν τη δυνατότητα εξατομικευμένης ιατρικής, με στόχο την πιο ακριβή και αποτελεσματική διαχείριση των ασθενών.^[74]

4.3.4 Διαχείριση ραδιοφαρμάκων και ροή εργασίας

Ένας κρίσιμος τομέας όπου η τεχνητή νοημοσύνη επιδεικνύει σημαντικά οφέλη είναι η διαχείριση ραδιοφαρμάκων, η οποία αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί ακρίβεια, ώστε να διασφαλιστεί η διαγνωστική ποιότητα της απεικόνισης, να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση στην ιοντίζουσα ακτινοβολία και να διατηρηθεί η ασφάλεια των εξεταζόμενων.

Η αποτελεσματική ροή εργασίας στην απεικόνιση PET/CT είναι απαραίτητη για τη διαχείριση μεγάλου όγκου ασθενών, διατηρώντας παράλληλα τη διαγνωστική ποιότητα. Η τεχνητή νοημοσύνη εξορθολογεί τη διαδικασία παρασκευής και χορήγησης ραδιοφαρμάκων μέσω αυτοματοποίησης στην επισημάνση του ιχνηθέτη και του ποιοτικού ελέγχου. Επιπλέον, αναπτύσσονται μοντέλα νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη πιθανών επιπλοκών, όπως η εξαγγείωση ή η καθυστερημένη πρόσληψη ιχνηθετών, επιτρέποντας την έγκαιρη παρέμβαση και βελτιώνοντας τα αποτελέσματα των εξετάσεων.

Οι αλγόριθμοι συμβάλλουν, επίσης, στον ακριβή υπολογισμό της χορηγούμενης δόσης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το βάρος, η ηλικία, το φύλο και η μεταβολική δραστηριότητα, ώστε να εξατομικεύσουν τη χορηγούμενη δόση. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα συστήματα ΑΙ επιτυγχάνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της απαιτούμενης δόσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους.^[75]

Παράλληλα, η αυτοματοποίηση της χορήγησης μέσω συσκευών ΑΙ και ρομποτικών συστημάτων ελαχιστοποιεί τη μεταβλητότητα και τα ανθρώπινα λάθη. Οι έξυπνοι εγχυτές προσαρμόζουν δυναμικά παραμέτρους, όπως ο ρυθμός, ο όγκος και ο χρονισμός της έγχυσης, ενώ παρακολουθούν τη φυσιολογία του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο. Έρευνες έχουν επιβεβαιώσει ότι οι αυτοματοποιημένοι εγχυτές βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας, μειώνοντας τον κίνδυνο υποδοσολογίας ή υπερβολικής δόσης που θα μπορούσε να επηρεάσει τη διαγνωστική ακρίβεια.^[76]

Τέλος, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στη ροή εργασίας μειώνει τον φόρτο εργασίας του προσωπικού και τον συνολικό διαδικαστικό χρόνο, επιτρέποντας στους επαγγελματίες υγείας να επικεντρωθούν στη φροντίδα των ασθενών, καθώς και σε άλλα κρίσιμα καθήκοντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κέντρα με μεγάλο όγκο εργασίας, όπου η βελτιστοποίηση της ροής εργασιών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη συνολική παραγωγικότητα.

Η τεχνητή νοημοσύνη, λοιπόν, αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό εργαλείο που ενισχύει την ασφάλεια των ασθενών, μειώνει τα σφάλματα και βελτιστοποιεί την ποιότητα των εξετάσεων και συνεπώς, κάνει την απεικόνιση PET/CT πιο ακριβή και αποδοτική.

4.4 Τεχνικές και οικονομικές παράμετροι

Η συνεργασία μεταξύ τεχνητής νοημοσύνης και PET/CT, οδηγεί στη βέλτιστη χρήση των οικονομικών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι ΑΙ βελτιστοποιούν τη ροή εργασίας, αυτοματοποιώντας εργασίες ρουτίνας, όπως η ανακατασκευή και η ανάλυση εικόνας. Η αυτοματοποίηση έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος, τον οποίο δαπανούν οι ειδικοί στην ερμηνεία της εικόνας, επιτρέποντάς τους να εστιάσουν σε σημαντικότερες λεπτομέρειες που σχετίζονται με την εξέταση.^[77] Ως αποτέλεσμα, οι

εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερους όγκους ασθενών, χωρίς να διακυβεύεται η διαγνωστική ποιότητα, οδηγώντας την ίδια στιγμή σε αυξημένα έσοδα και καλύτερη χρήση του εξοπλισμού.

4.4.1 Μείωση κόστους και βελτιστοποίηση δόσης

Η τεχνητή νοημοσύνη επέτρεψε την ανάπτυξη τεχνικών που διατηρούν την ποιότητα της εικόνας μειώνοντας, παράλληλα, την απαιτούμενη χορηγούμενη δόση ραδιοφαρμάκων. Πολλές μελέτες πάνω σε αυτό το ζήτημα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι εξετάσεις, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί με PET/CT και έχουν υποστεί επεξεργασία μέσω τεχνητής νοημοσύνης, μπορούν να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα με μείωση κατά 66% της τυπικής δόσης ^{18}F -FDG. Η μείωση της δόσης του ραδιοφαρμάκου, αντιστοιχεί όχι μόνο σε μείωση της δόσης του ασθενούς, αλλά και του κόστους παραγωγής, καθώς, επίσης, και του κόστους που μπορεί να προκύψει από επιπλοκές της εξέτασης.^[78]

4.4.2 Βελτιωμένη διαγνωστική ακρίβεια και έγκαιρη ανίχνευση

Η έγκαιρη διάγνωση συχνά οδηγεί σε λιγότερο επεμβατικές και λιγότερο δαπανηρές θεραπείες, μειώνοντας το συνολικό κόστος υγειονομικής περίθαλψης. Παράλληλα, η ακριβής και έγκαιρη διάγνωση συμβάλλει στη μείωση του κόστους, καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη για πρόσθετες διαγνωστικές διαδικασίες.

Η έκθεση της MedTech Europe αναφέρει πως οι τεχνολογίες που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη, όπως η βελτιωμένη αποδοτικότητα του εργατικού δυναμικού, οι μειωμένες παρουσιάσεις ασθενών και η βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων. Αυτές οι εξελίξεις συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση χρημάτων και στην καλύτερη παροχή υγειονομικής περίθαλψης.

4.5 Προκλήσεις και περιορισμοί

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει αναδείξει τεράστιες δυνατότητες στην απεικόνιση PET/CT, με τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την αποδοτικότητα στις διαγνωστικές διαδικασίες. Παράλληλα, όμως, είναι εξαιρετικά σημαντικό να κατανοηθούν οι περιορισμοί και οι προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά την αξιοπιστία των αλγορίθμων. Η φύση του «μαύρου κουτιού» της τεχνητής νοημοσύνης, ειδικά σε μοντέλα βαθιάς μάθησης, καθιστά δύσκολη την πλήρη κατανόηση και εξήγηση των αποτελεσμάτων, ενώ η ανάγκη για μεγαλύτερη διαφάνεια και εξήγηση παραμένει κρίσιμη.^[79] Οι προκλήσεις αυτές εντείνονται, καθώς η μοντελοποίηση των αλγορίθμων γίνεται όλο και πιο περίπλοκη.

Η διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αλγορίθμων είναι απαραίτητη για την επιτυχή ενσωμάτωσή τους στην απεικόνιση PET/CT. Η σύμπραξη ανθρώπινης τεχνογνωσίας και υπολογιστικών συστημάτων καθιστά δυνατή την επίτευξη εξαιρετικής διαγνωστικής ακρίβειας, ενώ οι συνεχώς εξελισσόμενοι αλγόριθμοι καθιστούν τη διαδικασία πιο αποδοτική και αξιόπιστη. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται αυστηρός έλεγχος της διαφάνειας, της ερμηνευσιμότητας και της αποφυγής προκαταλήψεων στους αλγορίθμους. Η συνεχής εκπαίδευση των συστημάτων ΑΙ διασφαλίζει την προσαρμοστικότητά τους στις αναδυόμενες ιατρικές γνώσεις και την ανάγκη για βελτιωμένη απόδοση στην κλινική πρακτική, καθιστώντας τις ερμηνείες που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη αποτελεσματικές σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον.^[80]

Κεφάλαιο 5. Μελλοντικές προοπτικές της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/CT

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στην Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων έχει φέρει σημαντικές εξελίξεις στον τομέα της ιατρικής απεικόνισης και αναμένεται να επιφέρει νέες επαναστατικές αλλαγές στο μέλλον. Οι δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης να ενισχύσει τη διαγνωστική ακρίβεια, να βελτιώσει την ποιότητα της εικόνας και να διευκολύνει τη ροή εργασίας, καθιστούν την τεχνολογία αυτή απαραίτητο εργαλείο για τους επαγγελματίες υγείας, ενώ παράλληλα ενισχύει τη θεραπευτική αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των ασθενών.

Μια από τις πιο αξιοσημείωτες προοπτικές αφορά την ανακατασκευή της εικόνας. Οι εικόνες συχνά πλήττονται από θόρυβο και περιορισμένη χωρική ανάλυση, γεγονός που επηρεάζει τη διαγνωστική αξία των εξετάσεων. Η τεχνητή νοημοσύνη, και ειδικότερα τα μοντέλα βαθιάς μάθησης, αναπτύσσονται με σκοπό την ενίσχυση της σαφήνειας των εικόνων, μειώνοντας τον θόρυβο και επιτρέποντας τη χρήση χαμηλότερων δόσεων ραδιοφαρμάκου. Αυτή η προσέγγιση μειώνει τη δόση ακτινοβολίας στον ασθενή χωρίς να υπονομεύει την ποιότητα της εικόνας, κάνοντας τη διάγνωση πιο ασφαλή και ακριβή. Ο εντοπισμός και η ανάλυση των μεταβολικών αλλαγών στους ιστούς μέσω αλγορίθμων καθιστά, επίσης, δυνατή την έγκαιρη διάγνωση κακοήθειας, επιταχύνοντας τη θεραπευτική διαδικασία και αυξάνοντας τα ποσοστά επιβίωσης για ασθενείς με καρκίνο.

Επιπλέον, η αυτοματοποίηση της ανάλυσης εικόνας θα εξασφαλίζει γρηγορότερη και πιο ακριβή ανίχνευση βλαβών, καθώς και τη βελτιωμένη τμηματοποίηση και ποσοτικοποίηση των εικόνων. Το ιατρικό προσωπικό θα έχει τη δυνατότητα να εστιάζει σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, ενώ οι χρόνοι αναμονής για τους ασθενείς θα μειώνονται σημαντικά, βελτιώνοντας την απόδοση των ιατρικών τμημάτων και την εξυπηρέτηση των ασθενών.^[81]

Η δυνατότητα της τεχνητής νοημοσύνης να αναλύει μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε συνδυασμό με την πρόοδο στην εξατομικευμένη ιατρική αποτελεί άλλη μία σημαντική πρόκληση και ευκαιρία για το μέλλον. Χρησιμοποιώντας δεδομένα απεικόνισης

PET/CT και την τεχνητή νοημοσύνη, οι επαγγελματίες υγείας θα μπορούν να προβλέπουν την ανταπόκριση των ασθενών στις θεραπείες, προσαρμόζοντας τα θεραπευτικά πλάνα με βάση τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά κάθε ασθενούς. Τα radiomics, τα οποία περιλαμβάνουν την εξαγωγή ποσοτικών χαρακτηριστικών από ιατρικές εικόνες, συνδυασμένα με την τεχνητή νοημοσύνη, επιτρέπουν την ανακάλυψη νέων βιοδεικτών που μπορούν να προβλέψουν την πορεία των ασθενειών και του βαθμού ανταπόκρισης στη θεραπεία.

Περαιτέρω, η σχέση του PET/CT με άλλες μεθόδους απεικόνισης, όπως η μαγνητική τομογραφία (MRI), και η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης σε αυτές τις τεχνολογίες υπόσχονται να προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των νόσων. Η ανάλυση εικόνας σε πραγματικό χρόνο μέσω τεχνητής νοημοσύνης θα επιτρέψει την άμεση λήψη κλινικών αποφάσεων κατά τη διάρκεια της απεικόνισης, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα της θεραπείας και μειώνοντας τον χρόνο αναμονής. Επιπλέον, η ανάπτυξη μοντέλων ΑΙ που προσφέρουν σαφείς εξηγήσεις για τα ευρήματα των απεικονίσεων θα ενισχύσει την εμπιστοσύνη των κλινικών και των ασθενών στη διαδικασία διάγνωσης και θεραπείας.

Όλες αυτές οι εξελίξεις απαιτούν την καθιέρωση ισχυρών ρυθμιστικών πλαισίων και τη θέσπιση τυποποιημένων διαδικασιών για την εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/CT. Αυτό είναι κρίσιμο για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της διαφύλαξης των προσωπικών δεδομένων των ασθενών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια και την ακρίβεια των κλινικών αποφάσεων.^[82]

Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στην ιατρική απεικόνιση, και ιδιαίτερα στην PET/CT, έχει ήδη αρχίσει να μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η διάγνωση και η παρακολούθηση των ασθενών. Οι τεχνικές μηχανικής και βαθιάς μάθησης επιτρέπουν την αυτοματοποίηση κρίσιμων διαδικασιών, τη μείωση του ανθρώπινου σφάλματος και την ακριβέστερη ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνητής νοημοσύνης στην απεικόνιση PET/CT είναι η βελτίωση της διαγνωστικής ακρίβειας. Τα νευρωνικά δίκτυα, όπως τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs), επιτρέπουν την ανίχνευση και ταξινόμηση παθολογικών ευρημάτων με μεγαλύτερη αξιοπιστία συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτή η δυνατότητα συμβάλλει στην έγκαιρη διάγνωση και στην πιο αποτελεσματική αξιολόγηση της πορείας της νόσου, ιδίως σε ασθενείς με ογκολογικές παθήσεις.

Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει τη βελτιστοποίηση και εξατομίκευση των θεραπευτικών προσεγγίσεων. Τα AI-βασισμένα συστήματα μπορούν να προσαρμόσουν τα πρωτόκολλα απεικόνισης, αλλά και ακτινοθεραπείας ανάλογα με τα ατομικά χαρακτηριστικά του κάθε ασθενούς. Αυτό οδηγεί σε πιο στοχευμένες παρεμβάσεις, καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων ιατρικών πόρων και μείωση της περιττής έκθεσης στην ακτινοβολία.

Επιπρόσθετα, οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας εικόνας και στη διόρθωση τεχνικών σφαλμάτων. Η μείωση του θορύβου και των τεχνικών σφαλμάτων στις εικόνες PET/CT επιτρέπει πιο σαφή και ακριβή απεικόνιση, γεγονός που διευκολύνει τη διάγνωση ακόμα και σε δύσκολες περιπτώσεις. Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αντικαταστήσει υπολογιστικά απαιτητικές μεθόδους, επιταχύνοντας την ανάλυση δεδομένων και μειώνοντας τον χρόνο αναμονής των ασθενών.

Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στην Ιατρική γενικότερα συνοδεύεται και από προκλήσεις. Η ποιότητα και η ποικιλομορφία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των αλγορίθμων είναι κρίσιμη, καθώς

ανεπαρκή ή μεροληπτικά δεδομένα μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες διαγνώσεις. Παράλληλα, η διαφάνεια και η ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων της τεχνητής νοημοσύνης παραμένουν ζητήματα προς διερεύνηση, καθώς οι αλγόριθμοι συχνά λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά» χωρίς να είναι εύκολα κατανοητοί από τους επαγγελματίες υγείας.

Εξίσου σημαντικό είναι το ηθικό και νομικό πλαίσιο γύρω από τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης. Η προστασία των δεδομένων των ασθενών, η ασφάλεια των συστημάτων και η ανάγκη για ανθρώπινη εποπτεία στη λήψη αποφάσεων είναι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ανθρώπινη κρίση, η εμπειρία και η συνεργασία παραμένουν ζωτικής σημασίας για την ορθή διάγνωση και θεραπεία.

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίσει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η απεικόνιση PET/CT, οδηγώντας σε ακριβέστερες διαγνώσεις, εξατομικευμένες θεραπείες και βελτιωμένη διαχείριση ασθενών. Παρά τις προκλήσεις, η συνεχιζόμενη έρευνα και η ανάπτυξη νέων τεχνικών αναμένεται να ξεπεράσουν τα εμπόδια, καθιστώντας την τεχνητή νοημοσύνη αναπόσπαστο μέρος της κλινικής ρουτίνας. Με τη σωστή ενσωμάτωση και διαχείριση, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προσφέρει ανεκτίμητα πλεονεκτήματα, όχι μόνο στους επαγγελματίες υγείας, αλλά και στους ίδιους τους ασθενείς, βελτιώνοντας την ποιότητα της ιατρικής φροντίδας και των θεραπευτικών αποτελεσμάτων.

Συμπερασματικά, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη ήρθε για να μείνει, είναι επιτακτική η ανάγκη να υπάρχει διασφάλιση των εξελίξεων και ηθικά πλαίσια. Με την άμεση αντιμετώπιση των ηθικών και νομικών περιορισμών μέσω έρευνας και προσαρμογής στα νέα δεδομένα, μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως το φάσμα πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνητή νοημοσύνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Parliament (2021), Άρθρο «Τι είναι η τεχνητή νοημοσύνη και πως χρησιμοποιείται;»
2. M. Ghosh and A. Thirugnanam, *Introduction to Artificial Intelligence*, Springer Nature Singapore
3. P. Wang (2019), *On defining artificial intelligence*, Journal of Artificial General Intelligence
4. SJ Russell, P. Norvig (2016), *Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.)*, Pearson Education
5. A. Newell (1981), *Reasoning, problem solving and decision processes- the problem space as a fundamental category*, Lawrence Erlbaum Associates
6. D. Silver et al. (2016), *Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search*, Springer Nature
7. A. Chahal, P. Gulia (2019), *Machine learning and deep learning*, Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Publications
8. J.G. Carbonell, (1987), *Introduction: Paradigms for Machine Learning*, Elsevier Science Publishers Ltd.
9. A.L. Samuel, (1959) *Some Studies in Machine Learning. Using the Game of Checkers*, IBM Corp.
10. A. Chahal, P. Gulia (2019), *Machine learning and deep learning*, Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Publications
11. Y. LeCun et al., (2015), *Deep Learning*, Macmillan Publishers Limited
12. E.W.T. Ngai et al. (2011), *The application of data mining techniques in financial fraud detection: A classification framework and an academic review of literature*, Elsevier Science Publishers Ltd.
13. C. Janiesch et al. (2021), *Machine learning and deep learning*, Springer
14. U. Manber (1989), *Introduction to Algorithms: A Creative Approach*, Addison-Wesley Publishing Company
15. T.H. Cormen et al. (2009), *Introduction to Algorithms (3rd ed.)*, The MIT Press.
16. S. Dasgupta et al. (2008), *Algorithms*, McGraw-Hill Education
17. Y. LeCun et al., (2015), *Deep Learning*, Macmillan Publishers Limited
18. M.A. Weiss (2013), *Data Structures and Algorithm Analysis in C++ (4th Edition)*, Pearson Education
19. I. Goodfellow et al. (2016), *Deep Learning*, The MIT Press
20. A. Zhang et al. (2021), *Dive into deep learning*, Cambridge University Press
21. P. Dayan, & L.F. Abbott, (2001), *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*, The MIT Press
22. G. Kreiman et al. (2000), *Imagery neurons in the human brain*, Springer Nature

23. G. Maris (2018), *The Brain and How it Functions*
24. P. Dayan, & L.F. Abbott, (2001), *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*, The MIT Press
25. S. Haykin (2009), *Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition)*, Pearson Education
26. W. Gerstner et al. (2014), *Neuronal Dynamics: From Single Neurons to Networks and Models of Cognition*, Cambridge University Press
27. A. Prieto et al. (2016), *Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges*, Elsevier Science Publishers Ltd.
28. P. Dayan, & L.F. Abbott, (2001), *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*, The MIT Press
29. W. Gerstner et al. (2014), *Neuronal Dynamics: From Single Neurons to Networks and Models of Cognition*, Cambridge University Press
30. O. Abiodun et al. (2018), *State-of-the-art in artificial neural network applications*, Elsevier
31. I. Goodfellow et al. (2016), *Deep Learning*, The MIT Press
32. C.M. Bishop (2006), *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer
33. T. Hastie et al. (2009), *The Elements of Statistical Learning*, Springer
34. K.P. Murphy (2012), *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*, The MIT Press
35. K.P. Murphy (2012), *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*, The MIT Press
36. T. Hastie et al. (2009), *The Elements of Statistical Learning*, Springer
37. T. Hastie et al. (2009), *The Elements of Statistical Learning*, Springer
38. D.P. Kingma & J. Ba (2015), *Adam: A method for stochastic optimization*, International Conference on Learning Representations
39. L. Bottou (2010), *Large-scale machine learning with stochastic gradient descent*, Springer
40. J.H. Friedman (2001), *Greedy function approximation: A gradient boosting machine*, Institute of Mathematical Statistics
41. C.M. Bishop (2006), *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer
42. M.J. Zaki & W. Meira (2020), *Data Mining and Machine Learning: Fundamental Concepts and Algorithms*, Cambridge University Press
43. S. Berkman et al. (2018), *Deep learning in medical imaging and radiation therapy*, Medical Physics
44. G. Swarnendu et al. (2019), *Understanding Deep Learning Techniques for Image Segmentation*, CSUR Volume 52, Issue 4
45. O. Ronneberger et al. (2015), *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*, International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention

46. D. Huang et al. (2021), *The Application and Development of Deep Learning in Radiotherapy: A Systematic Review*, Technology in Cancer Research & Treatment
47. Z. Sun et al. (2022), *A hybrid optimization strategy for deliverable intensity-modulated radiotherapy plan generation using deep learning-based dose prediction*, Medical Physics
48. P. Veit-Haibach & K. Herrmann (2022), *Artificial Intelligence/Machine Learning in Nuclear Medicine and Hybrid Imaging*, Springer
49. G. Campanella et al. (2019), *Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images*, Springer Nature
50. E.J Topol (2019), *High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence*, Springer Nature
51. A. Zhavoronkov et al. (2020), *Potential COVID-2019 therapeutics identified by deep learning and high-throughput virtual screening*, Cambridge University Press
52. L. Bachina & A. Kanagla (2023), *Health revolution: AI-powered patient engagement*, International Journal of Clinical and Biomedical Studies
53. A. Rajkomar et al. (2018), *Machine learning in medicine*, New England Journal of Medicine
54. D. Farhud & Z. Shaghayegh (2021), *Ethical Issues of Artificial Intelligence in Medicine and Healthcare*, Iranian Journal of Public Health
55. B. Varkey (2021), *Principles of Clinical Ethics and Their Application to Practice*, Medical Principles and Practice
56. M. Whitehead et al. (2023), *Making the invisible visible: what can we do about biased AI in medical devices?*, BMJ Publishing Group
57. M.J. Willemink et al. (2020), *Preparing Medical Imaging Data for Machine Learning*, Radiology
58. P. Tschandl (2021), *Risk of Bias and Error From Data Sets Used for Dermatologic Artificial Intelligence*, JAMA Dermatology
59. N. Naik et al. (2022), *Legal and Ethical Consideration in Artificial Intelligence in Healthcare: Who Takes Responsibility?*, Frontiers in Surgery
60. F. Pesapane et al. (2018), *Artificial intelligence in medical imaging: threat or opportunity? Radiologists again at the forefront of innovation in medicine*, Springer Nature
61. L.C. Chu et al. (2020), *The Potential Dangers of Artificial Intelligence for Radiology and Radiologists*, Journal of the American College of Radiology
62. Α. Γώγου (2004), *¹⁸F-FDG PET*, Εκδόσεις Σταμούλη
63. G. Zaharchuk & G. Davidzon (2021), *Artificial Intelligence for Optimization and Interpretation of PET/CT and PET/MR Images*, Elsevier
64. I.D. Apostolopoulos et al. (2022), *Applications of Generative Adversarial Networks (GANs) in Positron Emission Tomography (PET) imaging: A review*, Springer Nature
65. A.J. Reader & B. Pan (2023), *AI for PET image reconstruction*, British Institute of Radiology

66. V. Kandarpa et al. (2021), *DUG-RECON: A Framework for Direct Image Reconstruction Using Convolutional Generative Networks*, Institute of Electrical and Electronics Engineers
67. M. Kawakami et al. (2020), *Development of Combination Methods for Detecting Malignant Uptakes Based on Physiological Uptake Detection Using Object Detection With PET-CT MIP Images*, Frontiers in Medicine
68. K. Hirata et al. (2021), *A Preliminary Study to Use SUVmax of FDG PET-CT as an Identifier of Lesion for Artificial Intelligence*, Frontiers in Medicine
69. Y. Satoh et al. (2019), *Comparison of dedicated breast positron emission tomography and whole-body positron emission tomography/computed tomography images: a common phantom study*, Annals of Nuclear Medicine
70. Y. Fan et al. (2017), *Evaluating early interim fluorine-18 fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography with the SUV_{max-liver}-based interpretation for predicting the outcome in diffuse large B-cell lymphoma*, Taylor & Francis
71. S.J. Lee et al. (2021), *Early-Phase SPECT/CT for Diagnosing Osteomyelitis: A Retrospective Pilot Study*, Korean Society of Radiology
72. Z. Xie et al. (2024), *Can interaction with generative artificial intelligence enhance learning autonomy? A longitudinal study from comparative perspectives of virtual companionship and knowledge acquisition preferences*, Journal of Computer Assisted Learning
73. L. Yuan et al. (2024), *Machine Learning in Diagnosis and Prognosis of Lung Cancer by PET-CT*, Informa UK Limited
74. X. Li et al. (2019), *Prognostic and Predictive Values of Metabolic Parameters of 18F-FDG PET/CT in Patients With Non-Small Cell Lung Cancer Treated With Chemotherapy*, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging
75. Z. Cheng et al. (2021), *Applications of artificial intelligence in nuclear medicine image generation*, Quantitative Imaging in Medicine and Surgery
76. S. Lee et al. (2022), *AI-assisted injectors in PET/CT imaging: Improving accuracy and efficiency*, Journal of Medical Imaging
77. A.J. Reader & B. Pan, (2023), *AI for PET image reconstruction*, British Journal of Radiology
78. K. Katsari et al. (2021), *Artificial intelligence for reduced dose 18F-FDG PET examinations: a real-world deployment through a standardized framework and business case assessment*, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Physics
79. D. Hussain et al. (2024), *Recent Breakthroughs in PET-CT Multimodality Imaging: Innovations and Clinical Impact*, Bioengineering
80. A. McMillan and T. Bradshaw (2021), *AI-based data corrections for attenuation and scatter in PET and SPECT*, PET Clinics
81. A. Zwanenburg (2019), *Radiomics in nuclear medicine: robustness, reproducibility, standardization, and how to avoid data analysis traps and replication crisis*, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging

82. R. Seifert et al. (2021), *Artificial intelligence and machine learning in nuclear medicine: future perspectives*, Seminars in Nuclear Medicine