Η Τεχνητή Νοημοσύνη στην Καρδιολογία: Σύγχρονες Εξελίξεις και Προοπτικές

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν. ΧΡΥΣΟΣ

τ. Συντονιστής Διευθυντής Καρδιολογικού Τμήματος
Γενικού Παναρκαδικού Νοσοκομείου Τρίπολης

Λέξεις ευρετηρίου
Τεχνητή Νοημοσύνη, Μηχανική Μάθηση, Βαθιά Μάθηση, Καρδιολογία, Ηλεκτροκαρδιογράφημα, Καρδιακή Απεικόνιση, Πρόγνωση Κινδύνου.

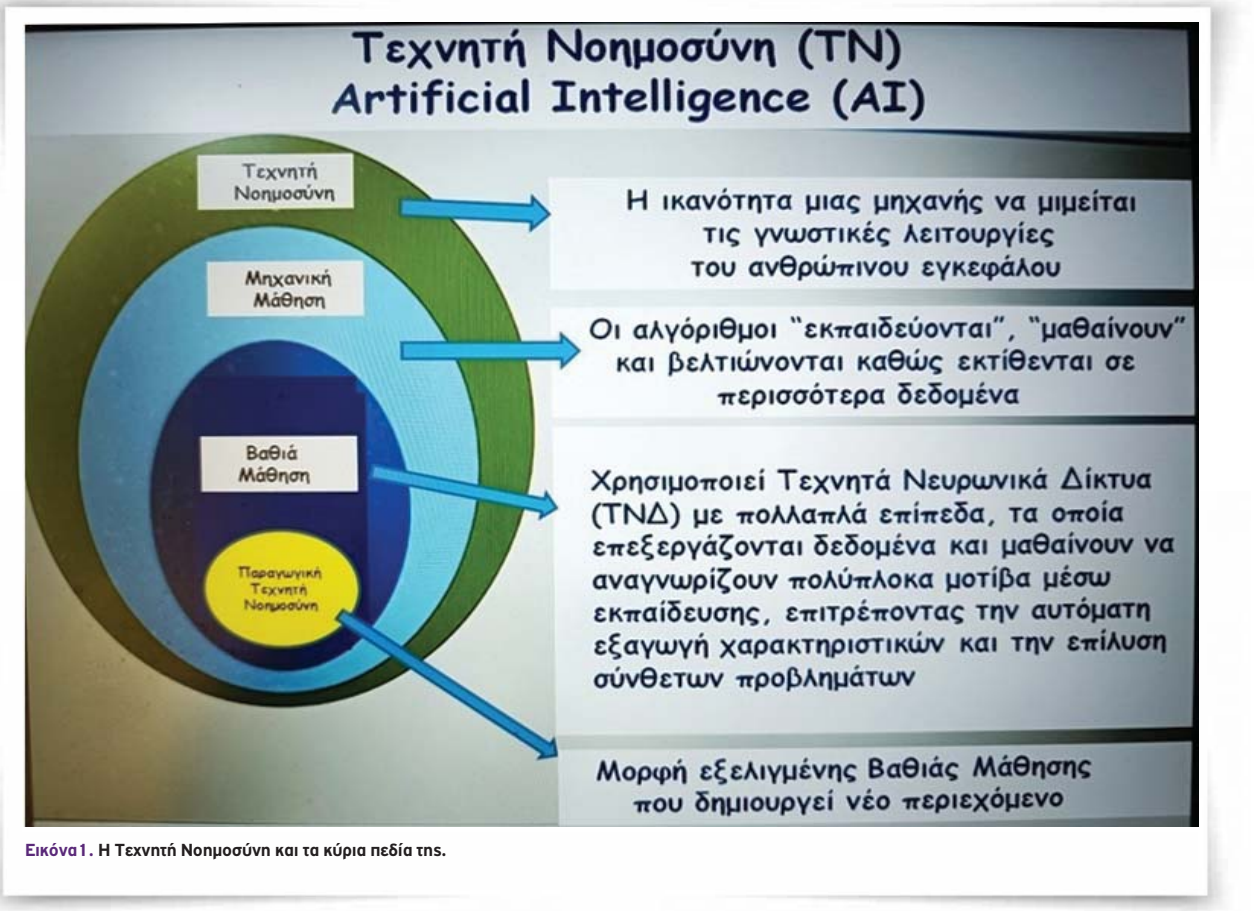
Επικοινωνία
Δημήτριος Χρυσός
τ. Συντονιστής Διευθυντής Καρδιολογικού Τμήματος
Γενικού Παναρκαδικού Νοσοκομείου Τρίπολης
Ματρόζου 12-Κουκάκι, Τ.Κ. 117-41, Αθήνα
e-mail: dimchrissos@yahoo.gr

1. Εισαγωγή

Η καρδιαγγειακή νόσος είναι η κύρια αιτία θνησιμότητας και νοσηρότητας παγκοσμίως. Η διάγνωση και η θεραπεία της καρδιαγγειακής νόσου βασίζονται σε δεδομένα που λαμβάνονται σε διάφορες μορφές, όπως το ιστορικό ασθενούς, η φυσική εξέταση, τα εργαστηριακά ευρήματα, οι επεμβατικές και μη επεμβατικές τεχνικές απεικόνισης.

Στην τρέχουσα εποχή της πληροφορίας, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής και επεξεργασίας εκτενών δεδομένων για κάθε άτομο. Αυτός ο όγκος πληροφοριών μπορεί δυνητικά να προάγει την ακρίβεια της διάγνωσης και της θεραπείας. Ωστόσο, αυτή η εκθετική αύξηση των διαθέσιμων πληροφοριών ξεπερνά τις ανθρώπινες αναλυτικές ικανότητες. Αυτό είχε ως συνέπεια την αντικειμενική δυσκολία του ανθρώπου στην ανάλυση του όγκου των δεδομένων και στην αναζήτηση νέων γνώσεων σε εύλογο χρόνο. Υπολογίζεται ότι έχει αξιοποιηθεί λιγότερο από το 5% των διαθέσιμων δεδομένων.[1] Για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού, χρησιμοποιείται η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ, Artificial Intelligence - AI), της οποίας η ταχύτητα επεξεργασίας μιας εργασίας και η υπολογιστική ισχύς της είναι ασύγκριτα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ανθρώπου.

Η Τεχνητή Νοημοσύνη είναι κλάδος της πληροφορικής επιστήμης και ασχολείται με τη σχεδίαση και την κατασκευή ευφυών υπολογιστικών συστημάτων, που μπορούν να μιμηθούν τις γνωστικές λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου. Περιλαμβάνει δύο κύριους κλάδους: τη Μηχανική Μάθηση (ΜΜ, Machine Learning - ML) και τη Βαθιά Μάθηση (ΒΜ, Deep Learning - DL). Η ΜΜ συγκροτείται από αλγορίθμους, που "εκπαιδεύον-



Εικόνα 1. Η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα κύρια πεδία της.

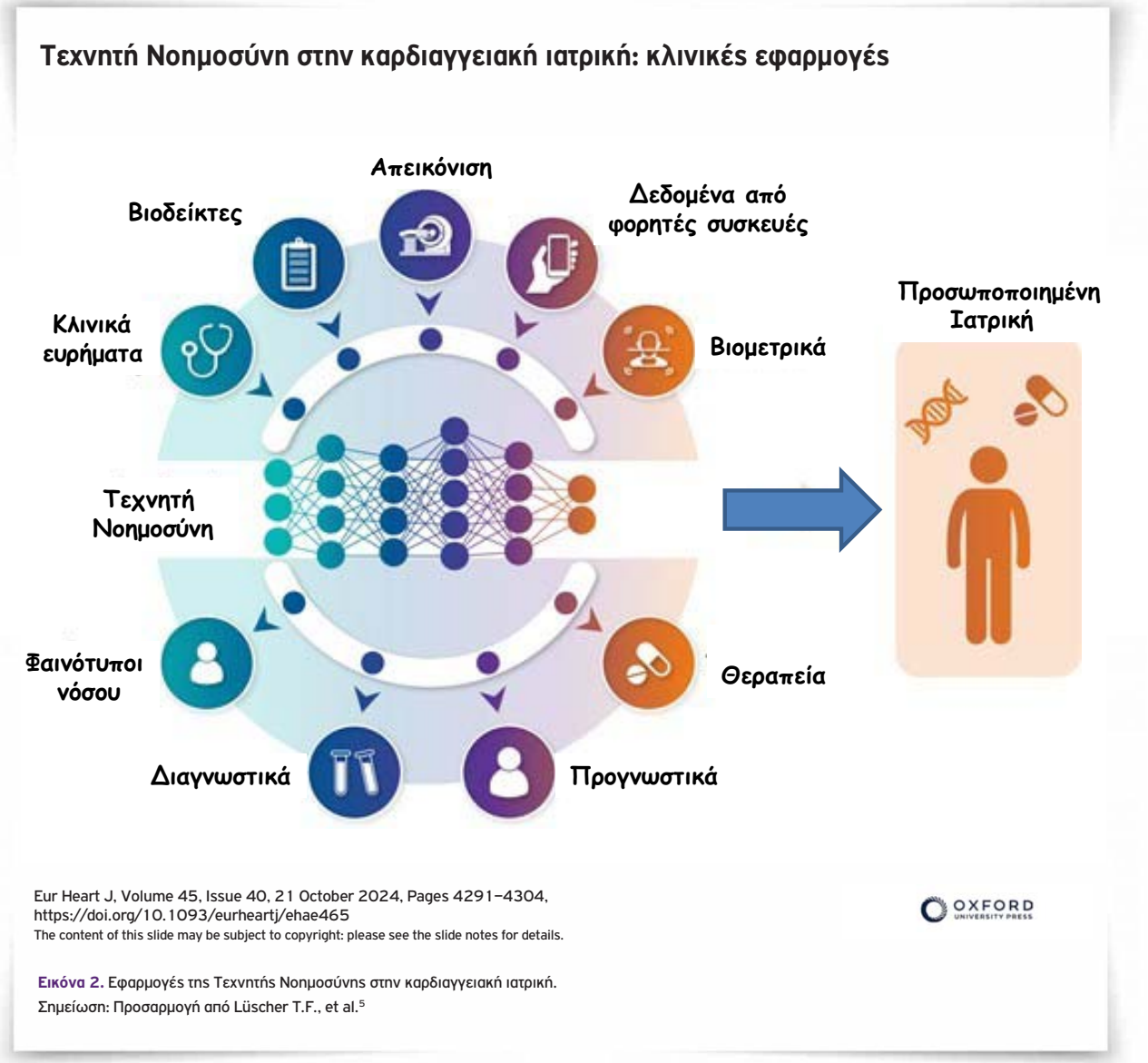
ται", "μαθαίνουν" και βελτιώνονται καθώς εκτίθενται σε περισσότερα δεδομένα. Η ΜΜ μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις κατηγορίες: την εποπτευόμενη, τη μη εποπτευόμενη, με βάση την παρουσία ή την απουσία εξωτερικής εποπτείας κατά την εκπαίδευση, και την ενισχυτική μάθηση.[2] Οι αλγόριθμοι της ενισχυτικής μάθησης μαθαίνουν συμπεριφορές μέσα από δοκιμή και σφάλμα, έχοντας ως δεδομένα μόνο τις πληροφορίες εισόδου και ένα αποτέλεσμα προς βελτιστοποίηση.[3] Η ΒΜ, ως εξειδικευμένος κλάδος της ΜΜ, χρησιμοποιεί πολυεπίπεδα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) για να εκπαιδεύσει ένα μοντέλο. Τα ΤΝΔ είναι δομημένα σε πολλαπλά επίπεδα για την αποκωδικοποίηση ακατέργαστων δεδομένων και τη δημιουργία νέων χαρακτηριστικών υψηλότερου επιπέδου. Στην αιχμή αυτής της εξέλιξης βρίσκεται η Παραγωγική ΤΝ (Generative AI), ένα επαναστατικό στάδιο εξέλιξης της παραδοσιακής ΤΝ, η οποία με τη χρήση της ΒΜ έχει την ικανότητα να «δημιουργεί» εντελώς νέο, πρωτότυπο περιεχόμενο (κείμενο, εικόνες, κώδικα, ήχο, βίντεο) ανταποκρινόμενη σε απλές εντολές (prompts). **(Εικόνα 1).**

Στο πεδίο της καρδιολογίας, η Παραγωγική ΤΝ ανοίγει νέους ορίζοντες, επιτρέποντας τη δημιουργία συνθετικών ιατρικών δεδομένων για την εκπαίδευση αλγορίθμων, τη σύνταξη αυτοματοποιημένων ιατρικών αναφορών και την προσομοίωση πολύπλοκων αιμοδυναμικών σεναρίων.

2. Η εποχή των δεδομένων

Τις τελευταίες δεκαετίες, ένας ολοένα αυξανόμενος όγκος δεδομένων συλλέγεται στην ιατρική, και ειδικότερα στην καρδιολογία. Αυτά τα τεράστια σύνολα δεδομένων απαιτούν νέα αναλυτικά εργαλεία, όπως αλγόριθμους ΤΝ/ΜΜ (AI/ML), για τη χρήση τους στη διάγνωση, την πρόγνωση και τη διαχείριση ασθενών.

Η ΤΝ και η ΜΜ μπορούν να παρέχουν βοήθεια στους κλινικούς ιατρούς μέσω της λήψης



Εικόνα 2. Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στην καρδιαγγειακή ιατρική.
Σημείωση: Προσαρμογή από Lüscher T.F., et al.[5]

και της ολοκληρωμένης προετοιμασίας του ιστορικού των ασθενών, της ανάλυσης προσώπου και φωνής, καθώς και της αξιολόγησης άλλων κλινικών χαρακτηριστικών, ενσωματώνοντας παράλληλα εργαστηριακά αποτελέσματα, βιοδείκτες και δεδομένα από την απεικόνιση. Η χρήση Συστημάτων Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων με Τεχνητή Νοημοσύνη - (Artificial Intelligence - Clinical Decision Support System, AI-CDSS) συμβάλλει στην υποστήριξη των ιατρών για τη λήψη κλινικών αποφάσεων (διάγνωση) διαφόρων παθήσεων.[4,5] Επιπλέον, η ΤΝ/ΜΜ μπορεί να παρέχει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση κινδύνου ως βάση της βέλτιστης οξείας και χρόνιας φροντίδας. Η κλινική χρησιμότητα των αλγορίθμων ΤΝ/ΜΜ θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά, να επικυρώνεται με σύνολα δεδομένων επιβεβαίωσης πριν από την κλινική χρήση και να επαναξιολογείται επανειλημμένα καθώς αλλάζουν οι φαινότυποι των ασθενών **(Εικόνα 2)**.

3. Τεχνητή Νοημοσύνη στην καρδιολογία: Κλινικές εφαρμογές

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ), μέσω της εξαγωγής πληροφοριών από σύνθετες βάσεις δεδο-

μένων με τη χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων, έχει ενσωματωθεί πλήρως στον ιατρικό τομέα. Οι τεχνικές ΤΝ έχουν δείξει τη δυνατότητα να επιταχύνουν την πρόοδο της διάγνωσης και της θεραπείας καρδιαγγειακών παθήσεων (ΚΑΠ), οι οποίες περιλαμβάνουν τη στεφανιαία νόσο, την καρδιακή ανεπάρκεια, κολπική μαρμαρυγή, βαλβιδική καρδιοπάθεια (ΒΚΠ), μυοκαρδιοπάθειες και συγγενείς καρδιοπάθειες. Σε κλινικό επίπεδο, η ΤΝ έχει επιδείξει υψηλή αποτελεσματικότητα στην ανίχνευση των ΚΑΠ, ενισχύοντας την αξιοπιστία των διαγνωστικών εργαλείων, τη διαστρωμάτωση κινδύνου, την κατηγοριοποίηση των παθήσεων, καθώς και την πρόβλεψη της έκβασης των ασθενών.[2]

4. ΤΝ και ιστορικό

Η ΤΝ έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά τη διαδικασία λήψης του ιατρικού ιστορικού, επιτρέποντας μια πιο ακριβή και αποτελεσματική διάγνωση. Η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (ΕΦΓ, Natural Language Processing – NLP), ένας βασικός κλάδος της ΤΝ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του κειμένου ή της φωνής των απαντήσεων ενός ασθενούς κατά τη διάρκεια της συνέντευξης για το ιατρικό του ιστορικό. Ένα πρόσφατο ορόσημο στην εξέλιξη της ΕΦΓ αποτελεί η ανάπτυξη των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (ΜΓΜ, Large Language Models – LLMs), τα οποία οδήγησαν στη δημιουργία εξελιγμένων συστημάτων διαλόγου (chatbots). Αυτά τα chatbots, όπως το ChatGPT και το DeepSeek, αποτελούν εφαρμογές λογισμικού που υποστηρίζονται από ΤΝ, έχοντας την ικανότητα να κατανοούν την ανθρώπινη γλώσσα και να απαντούν με φυσικότητα. Ένα από τα πιο προηγμένα διαθέσιμα chatbot AI είναι το GPT-4 (Generative Pretrained Transformer-4, Παραγωγικός Προεκπαιδευμένος Μετασχηματιστής-4) που διαθέτει τη δυνατότητα να αποτυπώνει τις συνομιλίες ασθενή - ιατρού και να τις μεταγράφει σε ολοκληρωμένες κλινικές σημειώσεις.[6,7] Αυτό μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία λήψης σημειώσεων επειδή ο ιατρός μπορεί να εξετάσει, να αναθεωρήσει και να προσθέσει σε αυτές τις μεταγραφές ό,τι απαιτείται στο μέλλον.[8]

5. ΤΝ και ακρόαση

Είναι γνωστό ότι η ακρόαση της καρδιάς στερείται ευαισθησίας (έως 43%), όσο και ειδικότητας (έως 69%) για τη διάγνωση βαλβιδικής καρδιακής νόσου.[9] Αντίθετα, η ΤΝ μπορεί να εντοπίσει παθολογικά ευρήματα με υψηλή ακρίβεια. Ενδεικτικά, ένας εκπαιδευμένος αλγόριθμος που ανέλυσε όλα τα καταγραμμένα καρδιακά ακροαστικά δεδομένα του Johns Hopkins Hospital ανίχνευσε παιδιατρικά φυσήματα με ακρίβεια επιπέδου καρδιολόγου. Η ευαισθησία και η ειδικότητά του έφθασαν το 93% και 81% αντίστοιχα, με συνολική διαγνωστική ακρίβεια 88%.[10]

Η ενσωμάτωση της ΤΝ σε ασύρματα ψηφιακά στηθοσκόπια βελτιώνει τη διαγνωστική απόδοση και αντισταθμίζει τους περιορισμούς της παραδοσιακής ακρόασης, επιτρέποντας την ανίχνευση τόσο καρδιακών όσο και πνευμονικών ήχων. Σε περιπτώσεις βαλβιδικών καρδιοπαθειών (ΒΚΠ) και συγγενών καρδιοπαθειών η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων ΤΝ επέτυχε την εντόπιση και την ορθή ταξινόμηση των παθήσεων με διαγνωστική ακρίβεια που αγγίζει το περίπου στο 99%.[11] Τα ψηφιακά στηθοσκόπια με ΤΝ βελτιώνουν σημαντικά την ανίχνευση ΒΚΠ στο σημείο φροντίδας συγκριτικά με την αναλογική ακρόαση μόνο (ευαισθησία 92,3% έναντι 46,2%, $p = 0.01$ και ειδικότητα 86,9% έναντι 95,6%, $p < 0,001$). Η τεχνολογία αυτή αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την έγκαιρη διάγνωση και παρέμβαση σε περιβάλλον πρωτοβάθμιας περίθαλψης.[12]

Στο πεδίο της παιδιατρικής, εισήχθη πρόσφατα η ψηφιακή πλατφόρμα StethAid, η οποία συνδυάζει την ακρόαση με ΤΝ και την τηλεϊατρική. Η πλατφόρμα αποτελείται από ένα ασύρματο ψηφιακό στηθοσκόπιο, εφαρμογές για φορητές συσκευές, προσαρμοσμένες πύλες επικοινωνίας ασθενούς - παρόχου υγείας και αλγόριθμους Βαθιάς Μάθησης. Διαθέτει ένα σύστημα υποστήριξης κλινικών αποφάσεων βασισμένο σε αλγορίθμους ΒΜ που επιτρέπει στους παρόχους πρωτοβάθμιας περίθαλψης να αναγνωρίζουν με ακρίβεια το αθώο φύσημα Still στα παιδιά (ευαισθησία 91,9% και ειδικότητα 92,6%) και το συριγμό (ευαισθησία 83,7% και ειδικότητα 84,4%).[13]

Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή επεκτείνεται και στην ανίχνευση της καρδιακής ανεπάρκειας. Ένα σύστημα βαθιάς μάθησης, που εφαρμόζεται σε ένα ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) μονής απαγωγής που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια μιας τυπικής εξέτασης με ψηφιακό στηθοσκόπιο με ΗΚΓ, μπορεί να ανιχνεύσει κλάσμα εξώθησης αριστερής κοιλίας (ΚΕ, LVEF) ίσο ή μικρότερο του 40% ή χαμηλότερο σε ασθενείς που εξετάζονται στο σημείο φροντίδας (Point of Care) για έλεγχο καρδιακής ανεπάρκειας.[14] Επίσης, ένα μοντέλο συνελικτικού νευρωνικού δικτύου (Convolutional Neural Network - CNN) χρησιμοποιώντας εισόδους ηλεκτροκαρδιογραφήματος μονής απαγωγής (ΗΚΓ) και φωνοκαρδιογραφήματος (PCG) που καταγράφηκαν από ψηφιακό στηθοσκόπιο, επέτυχε την αυτοματοποιημένη έγκαιρη ανίχνευση ατόμων με δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας και ΚΕ (LVEF) ≤40% (με δείκτες AUC*= 0,83 για το ΗΚΓ και AUC*= 0,855 για τον συνδυασμό ΗΚΓ+PCG αντίστοιχα). Αυτή η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία της καρδιακής ανεπάρκειας, βελτιώνοντας σημαντικά την έκβαση των ασθενών αυτών.[15]

Σήμερα διατίθεται στο εμπόριο το ψηφιακό στηθοσκόπιο **Eko CORE 500™**, το οποίο ενσωματώνει τεχνολογία ΗΚΓ (1 απαγωγής) και υποστηρίζεται από Τεχνητή Νοημοσύνη εγκεκριμένη από τον FDA. Η συσκευή προσφέρει ενεργή ακύρωση θορύβου και ενίσχυση ήχων, ενώ η ενσωματωμένη έγχρωμη οθόνη του επιτρέπει την άμεση ανίχνευση αρρυθμιών (όπως η κολπική μαρμαρυγή), χαμηλού κλάσματος εξώθησης και καρδιακών φυσημάτων. Σε αντίθεση με τον αμιγώς ψηφιακό χαρακτήρα του Core 500, το **3M Littmann CORE** λειτουργεί ως υβριδικό σύστημα, διατηρώντας την παραδοσιακή ακουστική οδό. Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στη διεπαφή χρήστη: το Core 500 παρέχει οπτική ένδειξη των ευρημάτων απευθείας στην ενσωματωμένη οθόνη του, ενώ το 3M Littmann CORE απαιτεί ενεργή σύνδεση Bluetooth με την εφαρμογή Eko App σε smartphone ή tablet προκειμένου να γίνει η μετατροπή των ηχητικών κυμάτων σε οπτικό φωνοκαρδιογράφημα (PCG) και η προηγμένη ανάλυσή του.

6. ΗΚΓ ενισχυμένο με ΤΝ

Η ραγδαία εξέλιξη των αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης και Βαθιάς Μάθησης (ΤΝ/ΒΜ) επιτρέπει πλέον την εξαγωγή "κρυφών" φαινοτυπικών και λειτουργικών δεδομένων από απλά, μη επεμβατικά διαγνωστικά εργαλεία. Η Mayo Clinic πρωτοστάτησε σε αυτόν τον τομέα αναλύοντας περισσότερα από 650.000 ΗΚΓ ασθενών με διάφορες καρδιακές παθήσεις, γεγονός που επέτρεψε την ανάπτυξη αλγορίθμων ΤΝ/ΒΜ που αντλούν κλινικά χρήσιμες πληροφορίες και έχουν υψηλή κλινική σημασία.[16] Ενδεικτικά, με βάση μόνο λίγους καρδιακούς παλμούς, ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι σε θέση να προσδιορίσει εάν ένας ασθενής είναι άνδρας ή γυναίκα με ακρίβεια άνω του 90%,[17] την χρονολογική ηλικία του,[17] να εκτιμήσει τη βιολογική του ηλικία ως δείκτη μακροζωϊας *[Assessing Biological Age: The Potential of ECG Evaluation Using AI (Mayo Clinic, 2021) & AI-enabled EKGs find difference between numerical age and biological age (Mayo Clinic News Network)]* και να αναγνωρίσει εάν υπάρχουν ενδείξεις δυσλειτουργίας της αριστερής κοιλίας.[18] Επιπλέον, αναπτύχθηκαν μοντέλα ΤΝ που αναλύουν το ΗΚΓ με σκοπό τον έγκαιρο εντοπισμό γυναικών ασθενών που διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο εμφάνισης καρδιακών παθήσεων.[19]

Σε άλλη ερευνητική εργασία, χρησιμοποιήθηκε ένα διευρυμένο σύνολο δεδομένων από 44.959 ασθενείς, το οποίο περιελάμβανε ζεύγη ΗΚΓ 12 απαγωγών και υπερηχοκαρδιογραφημάτων (με καταγεγραμμένο το LVEF). Οι ερευνητές εκπαίδευσαν ένα συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο (CNN) να εντοπίζει ασθενείς με δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας (οριζόμενη ως LVEF ≤ 35%) χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τα δεδομένα του ΗΚΓ. Κατά τη δοκιμή του μοντέλου σε ένα ανεξάρτητο δείγμα 52.870 ασθενών, η απόδοσή του ήταν εξαιρετική, σημειώνοντας δείκτη AUC (περιοχή κάτω από την καμπύλη) = 0,93. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ανάμεσα στους ασθενείς χωρίς αρχική δυσλειτουργία (LVEF > 35%), εκείνοι που παρουσίασαν θετικό αποτέλεσμα στον έλεγχο με ΤΝ διέτρεχαν 4,1 φορές μεγαλύτερο κίνδυνο [αναλογία κινδύνου (hazard

***AUC** (Area Under Curve-Περιοχή κάτω από την καμπύλη) είναι μέτρο απόδοσης του μοντέλου στη διάκριση ασθενών με και χωρίς νόσο.

ratio): 4,1] να αναπτύξουν δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας στο μέλλον.[18]

Παράλληλα, τα συστήματα Βαθιάς Μάθησης εφαρμόζονται με επιτυχία και για την ανίχνευση αρρυθμιών. Συγκεκριμένα, ένα συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο, που είναι ενσωματωμένο στο ΗΚΓ, εκπαιδεύτηκε να αναγνωρίζει (ανιχνεύει) το ηλεκτροκαρδιογραφικό αποτύπωμα της κολπικής μαρμαρυγής (ΚΜ) σε ασθενείς που τη στιγμή της εξέτασης (λήψη ΗΚΓ) βρίσκονταν σε φλεβοκομβικό ρυθμό (ΦΡ). Το σύστημα αυτό αποδείχθηκε ικανό να ταυτοποιεί τους ασθενείς με ιστορικό ΚΜ στο σημείο φροντίδας (point-of-care), επιτυγχάνοντας ευαισθησία 79,0% και ειδικότητα 79,5%.[20]

Σε μία πολυκεντρική μελέτη πληθυσμού που περιέλαβε 77.163 ασθενείς, η ανάλυση του ΗΚΓ με αλγόριθμο ΒΜ έδειξε ότι είναι εφικτή η ακριβής ανίχνευση της στένωσης αορτής, της ανεπάρκειας αορτής και της ανεπάρκειας μιτροειδούς (με δείκτες AUC από 0,77 έως 0,88). Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ενός προγράμματος προσυμπτωματικού ελέγχου (screening) βαλβιδικής καρδιοπάθειας.[21]

Στην κατεύθυνση αυτή, η ανάλυση ΗΚΓ με βάση την ΤΝ και τη ΒΜ αποδείχθηκε ιδιαίτερα επιτυχής στον εντοπισμό ασθενών με στένωση αορτής. Συγκεκριμένα, οι Cohen-Shelly et al.[22] ανέλυσαν δεδομένα υπερηχοκαρδιογραφήματος και ΗΚΓ από 258.607 ενήλικες. Μέτρια έως σοβαρή στένωση αορτής ήταν παρούσα στο 3,7%. Το μοντέλο εκπαιδεύθηκε σε 129.788, η επικύρωσή του έγινε σε 25.893 και η τελική δοκιμή σε 102.926 τυχαία επιλεγμένους συμμετέχοντες. Στην ομάδα δοκιμής, το AI-ECG αναγνώρισε το 3,7% των περιπτώσεων ως θετικό με AUC = 0,85 εμφανίζοντας ευαισθησία 78%, ειδικότητα 74% και ακρίβεια 74%. Παρατηρήθηκε ότι η ευαισθησία αυξανόταν και η ειδικότητα μειωνόταν με την πάροδο της ηλικίας, ενώ οι γυναίκες εμφάνισαν χαμηλότερη ευαισθησία, αλλά υψηλότερη ειδικότητα σε σύγκριση με τους άνδρες. Η απόδοση του μοντέλου βελτιώθηκε ελαφρώς όταν συνυπολογίστηκαν η ηλικία και το φύλο (AUC = 0,87), αγγίζοντας το AUC = 0,90 σε ασθενείς χωρίς αρτηριακή υπέρταση. Πέρα από τις χρόνιες παθήσεις, αναπτύχθηκε πρόσφατα μοντέλο ΗΚΓ Βαθιάς Μάθησης προορισμένο για το περιβάλλον των Τμημάτων Επειγόντων Περιστατικών (ΤΕΠ). Το μοντέλο αυτό είναι σε θέση να προβλέψει την πιθανότητα ανάγκης επαναιμάτωσης, καθώς και την εμφάνιση εμφράγματος μυοκαρδίου τύπου Ι σε ασθενείς που προσέρχονται στα ΤΕΠ, υπερέχοντας σημαντικά της κλινικής ερμηνείας του ΗΚΓ από τους θεράποντες ιατρούς (AUC = 0,91 έναντι 0,65).[23]

Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες αναδεικνύουν τη δυνατότητα ανίχνευσης δομικών και λειτουργικών παθήσεων της καρδιάς απευθείας από το ΗΚΓ 12 απαγωγών με ενσωματωμένη ΤΝ. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η διάγνωση της υπερτροφίας της αριστερής κοιλίας,[24] του καρδιακού ρυθμού (Μελέτη UK Biobank & SHIP: Europace, 2026)[25] καθώς και η αξιολόγηση της διαστολικής λειτουργίας της αριστερής κοιλίας. Η τελευταία επετεύχθη μετά την ανάπτυξη ενός συνελικτικού μοντέλου Βαθιάς Μάθησης, το οποίο ενσωματώνει ταυτόχρονα τα δεδομένα του ΗΚΓ 12 απαγωγών και συγκεκριμένες κλινικές παραμέτρους των ασθενών.[26,27]

Η εκρηκτική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και η συγκέντρωση τεράστιων, καλά σχολιασμένων συνόλων δεδομένων ΗΚΓ έχουν μετατρέψει παλαιότερα ακαδημαϊκά ενδιαφέροντα σε εφαρμόσιμες κλινικές γνώσεις. Αυτή η εξέλιξη έχει οδηγήσει σε μια νέα κατηγορία ψηφιακών βιοδεικτών - σημάτων που προέρχονται από το ΗΚΓ. Το ΗΚΓ με ενσωματωμένη ΤΝ εξελίσσεται σε ένα πολυδύναμο ψηφιακό βιοδείκτη που συμμετέχει σε μία πληθώρα ενεργειών και συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των ασθενών.[28] **(Πίνακας 1)**.

Πίνακας 1.

Ηλεκτροκαρδιογραφία με τεχνητή νοημοσύνη ως βιοδείκτης[28]

Βασικοί ρόλοι των ψηφιακών βιοδεικτών ηλεκτροκαρδιογραφήματος
• Βοήθεια στη διάγνωση
• Πρόβλεψη πρόγνωσης
• Επιλογή θεραπείας
• Απομακρυσμένη παρακολούθηση
• Αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του ιατρού
• Πολυτροπική ενσωμάτωση

7. ΤΝ και ακτινογραφία θώρακα

Υπάρχει πλέον η αυτοματοποιημένη ακτινολογική εξέταση. Το ChestLink είναι το πρώτο πλήρως αυτόνομο προϊόν ιατρικής απεικόνισης με ενσωματωμένη ΤΝ. Το ChestLink εντοπίζει ακτινογραφίες θώρακα (CXR) χωρίς ανωμαλία και παράγει οριστικές γνωματεύσεις (εκθέσεις) ασθενών χωρίς καμία παρέμβαση από τον ακτινολόγο.[29] Σε πρόσφατη μελέτη, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ΤΝ για την αναγνώριση σοβαρής υπερτροφίας και διάτασης της αριστερής κοιλίας χρησιμοποιώντας CXR. Η ανάλυση με ΒΜ 71.589 CXR από 24.689 διαφορετικούς ασθενείς, που ολοκληρώθηκαν εντός 1 έτους από τα υπερηχογραφήματά τους, μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια την παρουσία κύριων δομικών ανωμαλιών της καρδιάς και είναι χρήσιμη στην πρώιμη αναγνώριση ασθενών με υπερτροφία της αριστερής κοιλίας (AUC* = 0,79), με διάταση αυτής (AUC* = 0,80) και για τη σύνθετη ετικέτα που υποδεικνύει την παρουσία οποιουδήποτε από τα δύο (AUC* = 0,80). Η μελέτη δείχνει ότι ένα μοντέλο ΤΝ υπερέχει σε ευαισθησία έναντι της ομάδας πιστοποιημένων ακτινολόγων στη διάγνωση (71% έναντι 66%), διατηρώντας σταθερή την ειδικότητα (73%). Αυτό υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της ΤΝ ως αξιόπιστου «δεύτερου αναγνώστη» στην κλινική πράξη.[30] Επίσης ένα μοντέλο βασισμένο στη ΒΜ για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων υπερηχοκαρδιογραφίας από ψηφιακές ακτινογραφίες θώρακος, μπορεί να ταξινομήσει το LVEF (AUC* = 0,92, ακρίβεια 86%) και τις βαλβιδοπάθειες της καρδιάς (AUC* = 0,85, ακρίβεια 77.5%) χρησιμοποιώντας πληροφορίες από ψηφιακές ακτινογραφίες θώρακα, που συλλέχθηκαν αναδρομικά από ασθενείς εντός 14 ημερών από μία δισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφική μελέτη.[31]

8. ΤΝ και υπέρηχοι

Η υπερηχοκαρδιογραφία είναι το διαγνωστικό εργαλείο της καρδιολογίας, καθώς είναι ευρέως διαθέσιμο, εύκολο στην εφαρμογή τόσο σε νοσοκομεία όσο και σε χειρουργεία και παρέχει σημαντικές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τη δομή και τη λειτουργία της καρδιάς. Ωστόσο, η τεχνική εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χειριστή και η ποιότητα των εικόνων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα όχι μόνο με την εμπειρία του χρήστη, αλλά και με τα ανατομικά χαρακτηριστικά του ασθενούς. Η ανάπτυξη προσεγγίσεων με ΒΜ για αυτοματοποιημένη τμηματοποίηση και ερμηνεία εικόνων είναι πρόκληση και απαιτεί μεγάλα, σχολιασμένα και απαιτεί μεγάλα, σχολιασμένα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης. Σε πρόσφατη εργασία, ένας αλγόριθμος ΒΜ εκπαιδεύτηκε σε μια βάση δεδομένων με περισσότερες από 50.000 υπερηχοκαρδιογραφικές μελέτες για την αυτόματη εκτίμηση του LVEF (AutoEF), χρησιμοποιώντας πολλαπλές κορυφαίες λήψεις δύο και τεσσάρων κοιλοτήτων. Οι τιμές του AutoEF εμφάνισαν υψηλή συνέπεια (μέση απόλυτη απόκλιση 2,9%) και εξαιρετική συμφωνία με τις τιμές αναφοράς, οι οποίες προέκυψαν από τον μέσο όρο των μετρήσεων τριών ειδικών με τη χρήση συμβατικής, ογκομετρικής τεχνικής. Για την ανίχνευση κλάσματος εξώθησης ≤35%, το AutoEF επέδειξε ευαισθησία 0,90 και ειδικότητα 0,92, τιμές παρόμοιες με εκείνες των ειδικών (0,93 και 0,87 αντίστοιχα).[32] Η ενσωμάτωση της ΤΝ στα μηχανήματα υπερήχων έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει το χρόνο της εξέτασης, το χρόνο συμμετοχής του εξετάζοντος, να διευκολύνει τη ροή εργασίας και να αυξήσει τη διαγνωστική ακρίβεια (καλύτερος χαρακτηρισμός της ασθένειας και εξατομίκευση και εξατομίκευση της θεραπείας). Η μεγάλη εξέλιξη της υπερηχοκαρδιογραφίας με την εφαρμογή της ΤΝ είναι ότι μπορεί να κάνει αυτοματοποιημένη αναγνώριση προβολών, ανίχνευση καρδιακών ορίων (ενδοκαρδίου - περικαρδίου), κατάτμηση καρδιακών κοιλοτήτων, μετρήσεις (όγκοι, ΚΕ) και ανάλυση βαλβίδων.[5,33,34]

Επιπλέον, επιτυγχάνει την αυτοματοποιημένη ανίχνευση και τον υπολογισμό της συνολικής επιμήκους παραμόρφωσης (Global Longitudinal Strain - GLS) και της τμηματικής παραμόρφωσης της αριστερής κοιλίας.[34,35] Επίσης κάνει διάγνωση παθήσεων (υπερτροφική μυοκαρδιοπάθεια, αμυλοείδωση, πνευμονική αρτηριακή υπέρταση),[36] διάκριση μεταξύ συμπιεστικής περικαρδίτιδας και περιοριστικής μυοκαρδιοπάθειας,[37] την αυτοματοποιημένη ανάλυση καρδιακών βαλβίδων και την ανίχνευση υπάρχουσας παθολογίας των (ανεπάρκεια - στένωση)[38] καθώς και ανάλυση της υφής του μυοκαρδίου για την αιτιολογική διάγνωση της

υπερτροφίας της αριστερής κοιλίας (υπερτασική ή ουραιμική).[39]

Η συμβολή αυτών των μηχανημάτων υπερήχων είναι μεγάλη στην Πρωτοβάθμια Φροντίδα Υγείας, στο Τμήμα Επειγόντων Περιστατικών και στη Μονάδα Εντατικής Θεραπείας γιατί αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο που βοηθά στη διάγνωση και τη διαχείριση των ασθενών. Μία πρόσφατη μελέτη επικύρωσε έναν αλγόριθμο ΒΜ για τον αυτόματο υπολογισμό του κλάσματος εξώθησης της αριστερής κοιλίας (AutoEF) σε περιβάλλοντα σημείου φροντίδας (Point Of Care UltraSound, POCUS). Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή συμφωνία (0,86-0,95) με τις αξιολογήσεις ειδικών, καθιστώντας την τεχνολογία πολύτιμο εργαλείο για την ακριβή εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας από λιγότερο έμπειρους χρήστες.[40]

Επίσης πρόσφατα αναπτύχθηκε μια πλήρως αυτοματοποιημένη ροή εργασίας ΒΜ για την επισήμανση εικόνων Doppler της διαμιτροειδικής ροής, την ανίχνευση του φακέλου του σήματος και την εξαγωγή των ταχυτήτων ροής κύματος Ε και Α και του χρόνου επιβράδυνσης. Εκπαίδευσαν μοντέλα CNN σε 5544 εικόνες 140 ασθενών για πρόβλεψη 24 κατηγοριών εικόνων και πέτυχαν μια εντυπωσιακή συνολική ακρίβεια 0,97. Η ανάλυση της ταχύτητας των κυμάτων Ε και Α έδειξε εξαιρετική συσχέτιση 0,99 και 0,98 με τις τιμές χειριστή αντίστοιχα, ενώ ο χρόνος επιβράδυνσης έδειξε χαμηλότερη συσχέτιση με τιμή r 0,82.[41]

Κατά την αξιολόγηση της διαστολικής λειτουργίας της αριστερής κοιλίας η χρήση της ΜΜ (ML) μπορεί να βελτιώσει την ταξινόμηση της πίεσης πλήρωσης της αριστερής κοιλίας. Τα μοντέλα ΜΜ (ML) παρέχουν νέες γνώσεις σχετικά με το ποιες παράμετροι μπορεί να είναι πιο πολύτιμες για χρήση στην ταξινόμηση. Ο δείκτης παραμόρφωσης του αριστερού κόλπου κατά τη φάση δεξαμενής/μέγιστης πλήρωσης (reservoir strain-LASr) αποτελεί τον πλέον μελετημένο και ισχυρό προγνωστικό δείκτη. Μια τιμή LASr < 24% ή ένας λόγος ΕΔΜΡ/LASr >2.7 έως 3.2cm/sec/% θεωρείται παθολογικός και αποτελεί βασικό κριτήριο για τη διάγνωση της καρδιακής ανεπάρκειας με διατηρημένο κλάσμα εξώθησης (HFpEF), καθώς υποδηλώνει αυξημένες πιέσεις πλήρωσης της αριστερής κοιλίας.[42]

Λόγω των καρδιαγγειακών παρενεργειών των νέων θεραπειών για τον καρκίνο, η παρακολούθηση της καρδιακής λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας σε αυτούς τους ασθενείς. Η ΤΝ μπορεί να διευκολύνει την απόκτηση βέλτιστων εικόνων και τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό LVEF. Χρησιμοποιώντας μια φορητή συσκευή υπερήχων με δυνατότητα ΤΝ (AI-enabled hand-held ultrasound device), 115 ασθενείς με καρκίνο εξετάστηκαν από το ογκολογικό προσωπικό για τον υπολογισμό του LVEF. Η συσχέτιση μεταξύ του LVEF που προέρχεται από ΒΜ και αυτού που ελήφθη από τους καρδιολόγους ήταν εξαιρετική, με μικρή υποεκτίμηση του LVEF από τη ΒΜ. Αυτά τα ευρήματα ενδέχεται να επιταχύνουν τη ροή κλινικών εργασιών για ασθενείς με καρκίνο και να επιταχύνουν την παραπομπή σε καρδιολογικές υπηρεσίες όταν είναι απαραίτητο.[43]

9. Πρόβλεψη ενδονοσοκομειακών εκβάσεων

Επειδή παρατηρείται ακόμη σημαντική θνησιμότητα σε ασθενείς με Οξύ Στεφανιαίο Σύνδρομο (ΟΣΣ), είναι υψίστης σημασίας η αξιολόγηση του κινδύνου για εξατομικευμένη διαχείριση των ασθενών. Οι Wenzl F., et al.[44] ανέπτυξαν μία βελτιωμένη βαθμολογία GRACE 3.0 (**G**lobal **R**egistry of **A**cute **C**oronary **E**vents - Παγκόσμιο Μητρώο Οξέων Στεφανιαίων Συμβάντων) με στόχο να αξιολογήσουν την απόδοσή της, ειδικά ως προς το φύλο, χρησιμοποιώντας Μηχανική Μάθηση σε 420.781 διαδοχικούς ασθενείς με ΟΣΣ χωρίς ανύψωση ST (NSTE-ACS) σε σύγχρονες εθνικές πληθυσμιακές ομάδες (κοόρτες) από το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ελβετία. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές φύλου στον φαινότυπο NSTE-ACS, το GRACE 3.0 υποστηριζόμενο από ΤΝ έδειξε ανώτερη διάκριση και καλή βαθμονόμηση με AUC 0,91 στους άνδρες και 0,87 στις γυναίκες με NSTE-ACS σε μια ομάδα πληθυσμού (κοόρτη) εξωτερικής επικύρωσης. Το GRACE 3.0 οδήγησε σε σημαντική ανακατάταξη των γυναικών ασθενών στην ομάδα υψηλού κινδύνου με σημαντικές κλινικές επιπτώσεις. Η βαθμολογία GRACE 3.0 έχει καλύτερη απόδοση σε άνδρες και γυναίκες και μειώνει τις ανισότητες μεταξύ των φύλων στην

διαστρωμάτωση κινδύνου. Είναι μεταξύ των πρώτων εργαλείων ΤΝ που έχουν εγκριθεί από διεθνείς οδηγίες.

10. Καρδιακή ανεπάρκεια

Η καρδιακή ανεπάρκεια (ΚΑ) επηρεάζει το 1–2% του ενήλικου πληθυσμού στις ανεπτυγμένες χώρες και περισσότερο από το 10% των ασθενών ηλικίας > 70 ετών. Οι εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης (ΜΜ) έχουν χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη ανίχνευση της καρδιακής ανεπάρκειας, την ταξινόμηση, την εκτίμηση της βαρύτητας και την πρόβλεψη ανεπιθύμητων ενεργειών, όπως η επανεισαγωγή στο νοσοκομείο εντός 30 ημερών.

Διάγνωση καρδιακής ανεπάρκειας (ΚΑ)

Ένα Σύστημα Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων με Τεχνητή Νοημοσύνη (AI-CDSS) δύναται να συνδράμει σημαντικά τους κλινικούς ιατρούς –ιδιαίτερα τους μη ειδικούς- στη διάγνωση της ΚΑ —ανεξαρτήτως τύπου—, προσφέροντας υψηλή διαγνωστική ακρίβεια. Για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση του συστήματος AI-CDSS χρησιμοποιήθηκε μια αναδρομική κοόρτη 1198 ασθενών (με και χωρίς ΚΑ), η οποία χωρίστηκε σε σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης (n=600) και δοκιμής (n=598). Στο σύνολο δεδομένων δοκιμής, το ποσοστό συμφωνίας της αυτοματοποιημένης διάγνωσης ανήλθε σε 98,3%. Παράλληλα, σε προοπτική πιλοτική μελέτη 97 ασθενών που προσήλθαν με δύσπνοια στα εξωτερικά ιατρεία (εκ των οποίων το 44% διαγνώστηκε με ΚΑ), το ποσοστό συμφωνίας μεταξύ του AI-CDSS και των ειδικών στην ΚΑ ήταν 98%. Αντίθετα το αντίστοιχο ποσοστό συμφωνίας μεταξύ ειδικών και μη ειδικών ιατρών στην ΚΑ περιορίστηκε στο 76%.

Επομένως, το σύστημα AI-CDSS αναδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διάγνωση της καρδιακής ανεπάρκειας, πρωτίστως σε περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει άμεση διαθεσιμότητα εξειδικευμένων στην καρδιακή ανεπάρκεια.[45]

Παράλληλα, μέσω της ΤΝ επιτυγχάνεται η αναγνώριση νέων φαινοτύπων και γίνεται νέα ταξινόμηση της ΚΑ σε ασθενείς με διατηρημένο κλάσμα εξώθησης (HFpEF). Η φαινοτυπική αυτή ομαδοποίηση συμβάλλει, μεταξύ άλλων, στον έγκαιρο εντοπισμό των ασθενών εκείνων που αναμένεται να ανταποκριθούν θετικά στη θεραπεία καρδιακού επανασυγχρονισμού.

Στο πλαίσιο αυτό, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (NLP), είναι ένα πεδίο εντός της ΤΝ αποτελεί ένα καινοτόμο εργαλείο για την ανάλυση μη δομημένων κλινικών πληροφοριών (όπως το ιατρικό ιστορικό, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών εξετάσεων και οι εκθέσεις απεικονιστικού ελέγχου) για διαγνωστικούς και προγνωστικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, η NLP μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη διάγνωση της καρδιακής ανεπάρκειας με διατηρημένο κλάσμα εξώθησης (HFpEF - Heart Failure preserved Ejection Fraction).

Σε μία αναδρομική μελέτη πληθυσμού (κοόρτης) σε ένα εξειδικευμένο κέντρο, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο NLP για την ανάλυση Ηλεκτρονικών Φακέλων Υγείας (EHR), με σκοπό τη συλλογή δημογραφικών, κλινικών και υπερηχογραφικών δεδομένων, καθώς και των τελικών εκβάσεων των ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια (ΚΑ). Από ένα δείγμα 3727 διαδοχικών ασθενών με ΚΑ και κλάσμα εξώθησης αριστερής κοιλίας (LVEF) ≥ 50% στο υπερηχοκαρδιογράφημα, μόνο το 8,3% είχε λάβει επίσημη διάγνωση HFpEF από τον κλινικό ιατρό. Ωστόσο, το 75% του δείγματος πληρούσε τα διαγνωστικά κριτήρια HFpEF της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Καρδιολογίας (ESC) για την πάθηση, αλλά δεν είχε επίσημη διάγνωση HFpEF. Οι ασθενείς με επιβεβαιωμένη διάγνωση HFpEF με βάση την ανάλυση NLP παρουσίαζαν συχνότερες νοσηλείες, ενώ όσοι πληρούσαν τα κριτήρια ESC είχαν υψηλότερη θνησιμότητα. Αυτή η μελέτη καταδεικνύει ότι οι ασθενείς με μη διαγνωσμένο HFpEF αποτελούν ομάδα υψηλού κινδύνου με αυξημένη θνησιμότητα. Συνεπώς, η χρήση της NLP επιτρέπει τον αυτόματο εντοπισμό υποδιαγνωσμένων ασθενών και άλλων παθήσεων μέσω των δεδομένων του EHR, που θα μπορούν να ωφεληθούν συμπληρώνοντας τους υπάρχοντες διαγνωστικούς αλγορίθμους και καθοδηγώντας τους προς εξειδικευμένη κλινική αξιολόγηση.[46] Επιπλέον, η σύγχρονη βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η πρόβλεψη της πιθανότητας επανεισαγωγής ασθενών 30 και 180 ημέρες μετά τη νοσηλεία λόγω ΚΑ παρουσιάζει σαφή βελτίωση, όταν εφαρμόζονται μέθοδοι που βα-

σίζονται σε αλγόριθμους ΜΜ, όπως το Τυχαίο Δάσος (Random Forest, RF) συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους στατιστικής (π.χ. λογιστική παλινδρόμηση).

Συνολικά, η ενσωμάτωση της μεθοδολογίας ΜΜ στο διαχείριση της ΚΑ στοχεύει στην έγκαιρη ανίχνευση των ασθενών με υψηλό κίνδυνο εμφάνισης της νόσου, τη σωστή ταξινόμηση των ασθενών με βάση τον εξατομικευμένο κίνδυνο και την άμεση κλινική παρέμβαση. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο για τους ίδιους τους ασθενείς (μείωση της νοσηρότητας και της θνησιμότητας μέσω έγκαιρης έναρξης θεραπείας) όσο και για τη δομή και τους πόρους της δευτεροβάθμιας περίθαλψης.

11. Η ΤΝ στην απεικόνιση της Βαλβιδικής Καρδιοπάθειας

Η Βαλβιδική Καρδιοπάθεια (ΒΚΠ) παραμένει σε σημαντικό βαθμό υποδιαγνωσμένη και υποθεραπευμένη. Στον τομέα των βαλβιδικών καρδιακών παθήσεων, η εστίαση της ΤΝ έχει δοθεί στην υπερηχοκαρδιογραφική αξιολόγηση και τον φαινοτυπικό προσδιορισμό των πληθυσμών ασθενών για τον εντοπισμό ομάδων υψηλού κινδύνου. Η ΤΝ μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση εικόνων, στην αναγνώριση και επισήμανση των υπερηχοκαρδιογραφικών τομών για ευκολότερη αξιολόγηση από τον εξεταστή, και στην τμηματοποίηση των βαλβιδικών και καρδιακών δομών για αυτοματοποιημένη ανάλυση.[38]

Σε μία πρόσφατη ανασκόπηση εξετάζεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου φροντίδας ενισχυμένου με ΤΝ που έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την έγκαιρη ανίχνευση, τη διαστρωμάτωση κινδύνου και τη θεραπεία της ΒΚΠ. Σε αυτό το μοντέλο, εργαλεία ΤΝ - όπως η αυτοματοποιημένη ερμηνεία ΗΚΓ, τα ψηφιακά στηθοσκόπια και ο υπερηχογράφος στο σημείο φροντίδας - διευκολύνουν τον αποκεντρωμένο έλεγχο και την παραπομπή για καρδιακή απεικόνιση σε επίπεδο κοινότητας. Κατά τη μετάβαση από τα εξωτερικά ιατρεία σε κέντρα τριτοβάθμιας περίθαλψης, η ενσωμάτωση ΤΝ στις απεικονιστικές μεθόδους (υπερηχοκαρδιογραφία, αξονική τομογραφία και μαγνητική τομογραφία) διευκολύνει την προηγμένη διαγνωστική αξιολόγηση και ενημερώνει τον σχεδιασμό των διαδικασιών.

Οι αναδυόμενες καινοτομίες μπορούν να βελτιώσουν αυτό το μοντέλο παροχής φροντίδας και συμπεριλαμβάνουν τη μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση για την αποκάλυψη νέων φαινοτύπων ΒΚΠ, την παραγωγική ΤΝ για αυτοματοποιημένη έκθεση, τη χρήση ψηφιακών διδύμων για την προσομοίωση παρεμβάσεων και την ενσωμάτωση πολλαπλών πρακτόρων (συμβούλων) ΤΝ (AI agents) για την υποστήριξη των συνεδριάσεων της καρδιακής ομάδας. Αυτές οι εξελίξεις ακολουθούνται από τη χρήση της ΤΝ στη ρομποτική διοισοφάγεια και ενδοκαρδιακή ηχοκαρδιογραφία, καθώς και στη μείξη σε πραγματικό χρόνο 3D υπερηχογραφήματος με ακτινοσκόπηση ακτίνων Χ, για την καθοδήγηση των παρεμβάσεων στις βαλβίδες.[47]

12. Αξονική τομογραφία

Η αξονική τομογραφία ή υπολογιστική τομογραφία (Computed Tomography, CT) είναι μια μέθοδος εγκάρσιας απεικόνισης με υψηλή ανάλυση και εξαιρετική ανίχνευση του περιγράμματος που επιτρέπει την τρισδιάστατη ανακατασκευή των εικόνων που λαμβάνονται.

Στο πλαίσιο αυτό, η Βαθιά Μάθηση (ΒΜ) χρησιμοποιείται για την αυτόματη κατάτμηση των καρδιακών και αγγειακών δομών, με τρόπο που συχνά υπερβαίνει την ακρίβεια και την αναπαραγωγιμότητα των ανθρώπινων χειριστών. Η αξονική στεφανιογραφία ή Στεφανιαία Υπολογιστική Τομογραφική Αγγειογραφία (CCTA) ενισχυμένη με Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ) παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης της υποκλινικής στεφανιαίας αθηροσκλήρυνσης. Το λογισμικό ΤΝ αξιολογεί την ύπαρξη στένωσης στα 16 καθιερωμένα στεφανιαία τμήματα, καθώς και τη σύνθεση της αθηρωματικής πλάκας (ασβεστοποιημένη, μικτή και μη ασβεστοποιημένη), εξάγοντας μια βαθμολογία κινδύνου με ανώτερη προγνωστική ακρίβεια σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Στη μελέτη των van Rosendael et al., η ικανότητα διάκρισης συμβάντων, όπως εκφράζεται από την AUC, ήταν σημαντικά υψηλότερη για την προσέγγιση που βασίζεται στη Μηχανική Μάθηση (0,771) έναντι των συμβατικών βαθμολογιών CCTA (0,685-0,701, P<0,001).[48] Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η ενσωμάτωση των δεδομένων πλάκας από τη CCTA, μέσω αλ-

γορίθμων Μηχανικής Μάθησης, βελτιώνει σημαντικά τη διαστρωμάτωση κινδύνου. Επιπλέον, η κλινική εφαρμογή της ΤΝ περιλαμβάνει την αυτοματοποιημένη βαθμολόγηση ασβεστίου (Agatston score),[49] την ανάλυση της αθηρωματικής πλάκας,[50] την ταξινόμηση της στένωσης βάσει του συστήματος CAD-RADS 2.0** (Coronary Artery Disease-Report and Data System- Σύστημα Αναφοράς και Δεδομένων Στεφανιαίας Αρτηριακής Νόσου),[51] καθώς και την ποσοτικοποίηση του επικαρδιακού λιπώδους ιστού.[52] Τα επόμενα χρόνια η ΒΜ αναμένεται να μειώσει δραστικά τον χρόνο αναφοράς για κλινική καρδιαγγειακή αξονική τομογραφία, επιτρέποντας ταχύτερη και καλύτερη παροχή αυτών των κλινικών υπηρεσιών παγκοσμίως. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι η CCTA θεωρείται πλέον ως εξέταση πρώτης γραμμής για τη διαγνωστική διερεύνηση ατόμων με θωρακικό πόνο ύποπτο για αποφρακτικό στεφανιαίο σύνδρομο (Class I, Level A).[53]

Πέραν της αυτοματοποίησης στην ανάλυση και ερμηνεία εικόνων, η Μηχανική Μάθηση (ΜΜ) επιτρέπει την εξαγωγή δεδομένων από τις αξονικές τομογραφίες που δεν είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι. Συγκεκριμένα, η εισαγωγή του Δείκτη Εξασθένησης Λίπους (Fat Attenuation Index - FAI), μιας μεθόδου ανάλυσης αξονικής τομογραφίας (CT) βασισμένης στην ΤΝ που ποσοτικοποιεί τις μεταβολές στον περιαγγειακό χώρο, προσέφερε νέα δεδομένα για τη φλεγμονώδη κατάσταση των στεφανιαίων αγγείων ασθενών που υποβάλλονται σε στεφανιαία αξονική αγγειογραφία (CCTA). Η εκτίμηση της στεφανιαίας φλεγμονής μέσω του FAI στην περιστεφανιαία περιοχή παρουσιάζει αξιοσημείωτη προγνωστική αξία για τον καρδιακό θάνατο και τα μείζονα ανεπιθύμητα καρδιαγγειακά συμβάντα (MACE),[54,55] γεγονός που επιβεβαιώθηκε και από πρόσφατη εξωτερική επικύρωση της τεχνολογίας.[56] Η αξιολόγηση του καρδιαγγειακού κινδύνου μέσω αυτού του αλγορίθμου ΤΝ εφαρμόζεται πλέον στην κλινική πρακτική για τη διαστρωμάτωση κινδύνου των ασθενών, ενσωματωμένη σε προγνωστικά μοντέλα που συνδυάζουν χαρακτηριστικά της στεφανιαίας πλάκας και κλινικούς παράγοντες.[57,58,59] Πρόσφατα δεδομένα υποδεικνύουν ότι η καθοδήγηση των προληπτικών θεραπειών βάσει αυτής της στρατηγικής επιφέρει αλλαγή στη θεραπευτική διαχείριση σε περίπου 45% των ασθενών. Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη σε άτομα με μηδενική ή ελάχιστη στεφανιαία αθηροσκλήρωση.[56]

Επιπλέον, η εισαγωγή της τρισδιάστατης ραδιομικής ανάλυσης υφής (3D texture radiomics),*** γνωστής ως Fat Radiomic Profile (FRP - ραδιομικό προφίλ λίπους), ενισχύει περαιτέρω τη διαγνωστική ακρίβεια και παρέχει ανώτερη προγνωστική αξία έναντι του FAI. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα της μεθόδου να ποσοτικοποιεί τη δομική αναδιαμόρφωση (ίνωση) του ιστού, επιπροσθέτως της οξείας φλεγμονής που ανιχνεύεται μέσω της απλής εξασθένησης του λίπους.[60] Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπεται ο προηγμένος χαρακτηρισμός των αθηρωματικών πλακών[61] και του περιαγγειακού χώρου,[60] συμβάλλοντας στον εντοπισμό φλεγμονωδών διεργασιών που προηγούνται των ανατομικά ορατών σημείων αθηροσκλήρωσης.

Μια άλλη καθοριστική εφαρμογή της ΤΝ στην καρδιαγγειακή απεικόνιση είναι ο αναίμακτος υπολογισμός της κλασματικής εφεδρείας ροής (Fractional Flow Reserve, FFR) από την αξονική στεφανιογραφία (Computed Tomography – derived Fractional Flow Reserve, CT-FFR) με την οποία αξιολογείται η ροή σε υπάρχουσες στενώσεις για την ανίχνευση αιμοδυναμικά σημαντικών βλαβών και συμβάλλει σημαντικά στη διαχείριση των στεφανιαίων ασθενών.

Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του FFR, η εξέταση τιτλοφορείται: CT-FFR CFD (Computational Fluid Dynamics - Υπολογιστική Ρευστοδυναμική) και CT-FFR ML (Machine Learning -Μηχανική Μάθηση). Στην πρώτη (CT-FFR CFD) γίνεται προσομοίωση της φυσικής ροής του αίματος με την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, ενώ στη δεύτερη (CT-FFR ML) χρησιμοποιείται αλγόριθμος εκπαιδευμένος από χιλιάδες προηγούμενες προσομοιώσεις CFD, ο οποίος προβλέπει απευθείας τις τιμές FFR βάσει προτύπων, επιτυγχάνοντας έτσι πολύ ταχύτερα αποτελέσματα. Μελέτες δείχνουν ότι

** Η έκδοση CAD-RADS 2.0 ενσωματώνει πλέον επίσημα την εκτίμηση του συνολικού φορτίου της πλάκας (plaque burden), κάτι στο οποίο η ΤΝ παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η χειροκίνητη ποσοτικοποίηση είναι εξαιρετικά χρονοβόρα για τον κλινικό γιατρό.

*** 3D texture radiomics: τεχνολογία που αναλύει την εσωτερική δομή σχηματισμών σε τρεις διαστάσεις, ποσοτικοποιώντας την ετερογένεια και την υφή των ιστών πέρα από την οπτική παρατήρηση.

η προσέγγιση CT-FFRML προσφέρει παρόμοια διαγνωστική ακρίβεια (AUC) με το CFD, αλλά με σημαντικά ταχύτερο χρόνο επεξεργασίας, καθιστώντας το κατάλληλο για άμεση κλινική λήψη αποφάσεων (on-site).[62] Και οι δύο μέθοδοι είναι εγκεκριμένες από το FDA.

Η HeartFlow FFRCT (Fractional Flow Reserve-Computer Tomography), προϊόν της εταιρείας HeartFlow, Inc., είναι μια μη επεμβατική τεχνολογία με τεχνητή νοημοσύνη που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της στεφανιαίας νόσου. Δημιουργεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο από τη CCTA, προσδιορίζοντας εάν μια βλάβη περιορίζει αιμοδυναμικά τη ροή του αίματος, με την κλινική της αξία να έχει τεκμηριωθεί μέσω μελετών NXT και PLATFORM.[63,64]

Στην κλινική πράξη, η Siemens Healthneers με τη χρήση αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης και η HeartFlow με τη χρήση του CFD λειτουργούν συμπληρωματικά σε μια ενιαία κλινική διαδρομή για τον υπολογισμό του FFRCT, με την ονομασία HeartFlow FFRCT Analysis. Επίσης το DeepVessel FFR, προϊόν της εταιρείας ιατρικής τεχνολογίας Keya Medical, είναι μία ιατρική συσκευή λογισμικού, εγκεκριμένη από το FDA, που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε αλγορίθμους Βαθιάς Μάθησης και πραγματοποιεί αυτόνομη, ταχεία, on-site ανάλυση και αξιολόγηση του FFRCT.

Το HeartFlow FFRCT Planner, με δυνατότητα ΤΝ, χρησιμοποιεί το CFD και είναι ένα διαδραστικό εργαλείο που επιτρέπει στον επεμβατικό καρδιολόγο να διαμορφώνει στρατηγικές θεραπείας στεφανιαίας νόσου σε πραγματικό χρόνο προτού εισέλθει στο αιμοδυναμικό εργαστήριο. Βασιζόμενο στα δεδομένα της αξονικής στεφανιογραφίας, πραγματοποιεί εικονική προσομοίωση της διαδερμικής στεφανιαίας παρέμβασης (PCI)• μέσω αυτής της ψηφιακής δοκιμής (virtual stenting), εκτιμάται πώς θα διαμορφωθεί ο δείκτης FFR μετά την τοποθέτηση ενδοπρόθεσης (stent) σε συγκεκριμένο σημείο, αποτρέποντας έτσι άσκοπες παρεμβάσεις.

Με τη χρήση ΤΝ το HeartFlow FFRCT Planner μπορεί να αλλάξει τις αποφάσεις διαχείρισης, μειώνοντας τη συχνότητα με την οποία επιλέγεται η PCI. Μετά από ανασκόπηση των δεδομένων του λογισμικού FFRCT Planner (έγκριση από το FDA το 2019), τροποποιήθηκε η στρατηγική PCI στο 45% των ασθενών και στο 31% των βλαβών.[65]

Η λαμβανόμενη εφεδρεία κλασματικής ροής από την αξονική τομογραφία (CTFFR) θα είναι πιθανότατα πιο ωφέλιμη για τη διαχείριση ασθενών και με τον εξορθολογισμό της χρήσης της θα επιτευχθεί βελτιστοποίηση των πόρων στις κατηγορίες ελάσσονος ή διφορούμενης στένωσης, όπου μπορεί να χρησιμεύσει ως διαλογέας (μέσο διαλογής - gatekeeper) για επεμβατικές διαδικασίες.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση αλγορίθμων ΤΝ στην αξονική τομογραφία μετατρέπει μια καθαρά ανατομική εξέταση σε ένα πολυπαραμετρικό εργαλείο που προσφέρει ταυτόχρονα ανατομική, λειτουργική και προγνωστική πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο.

13. Μαγνητική Τομογραφία Καρδιάς (Cardiac Magnetic Resonance, CMR)

Ενώ στο παρελθόν η ποσοτική ανάλυση της καρδιακής μαγνητικής τομογραφίας (CMR) ήταν επίπονη και χρονοβόρα, πλέον, μέσω αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης (ΤΝ/ΜΜ), οι όγκοι των καρδιακών κοιλοτήτων, οι μεταβολές τους και το κλάσμα εξώθησης υπολογίζονται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.[5,34,66] Τα εργαλεία αυτά, ενσωματωμένα απευθείας στους τομογράφους, διασφαλίζουν μια ταχύτατη και πλήρως τυποποιημένη ανάλυση. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα Βαθιάς Μάθησης (ΒΜ) επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη κατάτμηση (segmentation) των καρδιακών δομών, περιορίζοντας την εξάρτηση από την αποκλειστική παρουσία εξειδικευμένων ιατρών ανάγκη παρουσίας έμπειρων ειδικών για την ερμηνεία αυτών των απεικονίσεων αυτών.[67] Η αυτοματοποιημένη εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας και η διάγνωση δομικών παθήσεων - όπως η ύπαρξη ουλής, η ίνωση και η φλεγμονή του μυοκαρδίου- μετασχηματίζουν την κλινική πρακτική. Παράλληλα, επιτρέπουν έναν πιο προηγμένο φαινοτυπικό προσδιορισμό της ιστολογικής υφής και της σύνθεσης του μυοκαρδίου και του περικαρδίου.[5] Πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι η εφαρμογή της ραδιομικής (radiomics) για την ανάλυση της υφής του μυοκαρδίου ενισχύει σημαντικά τη διαγνωστική και προγνω-

στική ακρίβεια, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στη διάγνωση και τη διαστρωμάτωση κινδύνου των ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια.[68]

14. Τεχνητή Νοημοσύνη και Πυρηνική Ιατρική

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (ΤΝ) στο πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής (ΠΙ, Nuclear Medicine) έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα, ελαττώνοντας το χρόνο μετεπεξεργασίας και ενισχύοντας τη διαγνωστική ακρίβεια, τη συνέπεια, ακόμη και τη διαστρωμάτωση κινδύνου.[69]

Ειδικότερα, η ΤΝ αναδιαμορφώνει ριζικά το σπινθηρογράφημα αιμάτωσης του μυοκαρδίου (MPI - SPECT), επιλύοντας διαχρονικούς τεχνικούς περιορισμούς που σχετίζονται με την αύξηση του θορύβου που παράγεται λόγω μείωσης της δόσης ακτινοβολίας ή του χρόνου σάρωσης. Με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων Βαθιάς Μάθησης (ΒΜ), όπως τα Παραγωγικά Αντιπαραθετικά Δίκτυα (Generative Adversarial Networks, GANs), επιτυγχάνεται δραστική καταστολή του θορύβου. Αυτό επιτρέπει τη σημαντική μείωση της δόσης του χορηγούμενου ραδιοφαρμάκου και του χρόνου ακινησίας του ασθενούς, ενώ βελτιώνεται η ποιότητα της τελικής απεικόνισης.

Σε διαγνωστικό επίπεδο, η Μηχανική Μάθηση υπερέχει έναντι της συμβατικής οπτικής αξιολόγησης των ελλειμμάτων αιμάτωσης από τον κλινικό γιατρό. Μέσω της συνδυαστικής ανάλυσης (multimodal integration) απεικονιστικών δεδομένων, κλινικού ιστορικού και των παραμέτρων της δοκιμασίας κόπωσης, η ΤΝ υπολογίζει με υψηλή ακρίβεια το συνολικό έλλειμμα αιμάτωσης (total perfusion deficit). Η προσέγγιση αυτή αυξάνει κατακόρυφα τη διαγνωστική ευαισθησία για την ανίχνευση αποφρακτικής στεφανιαίας νόσου. Παράλληλα, καθιστά δυνατή την πρώιμη αναγνώριση της μικροαγγειακής δυσλειτουργίας (INOCA - Ischemia with Non-Obstructive Coronary Arteries /Ισχαιμία χωρίς Αποφρακτική Στεφανιαία Νόσο) και του επαπειλούμενου μυοκαρδίου, προσφέροντας ανώτερη προγνωστική αξία για την αποφυγή μελλοντικών καρδιαγγειακών συμβαμάτων.[70]

15. Τεχνητή Νοημοσύνη και Στεφανιογραφία

Το Autocath FFR (AI-FFR) είναι ένα αυτοματοποιημένο, μη επεμβατικό λογισμικό που βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη και λειτουργεί ως σύστημα υποστήριξης κλινικών αποφάσεων για τους επεμβατικούς καρδιολόγους. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κλασματικής εφεδρείας ροής (FFR) μέσω της ανάλυσης εικόνων αγγειογραφίας.[71] Το Autocath FFR έδειξε ότι έχει εξαιρετική ακρίβεια (90%) στην πρόβλεψη των τιμών του FFR σε σύγκριση με την κλασική επεμβατική μέθοδο που λαμβάνεται με βάση το σύρμα (wire-based FFR). Παράλληλα, στη μελέτη The VIRTU-4 CCS Trial βρέθηκε ότι η προσθήκη της «εικονικά» υπολογιζόμενης κλασματικής εφεδρείας ροής (vFFR) που βασίζεται σε εικόνες επεμβατικές στεφανιαίας αγγειογραφίας, τροποποίησε την επιδιωκόμενη στρατηγική διαχείρισης στο 22% των ασθενών.[72] Σε άλλη πρόσφατη μελέτη, ο υπολογισμός του AI-FFR επέδειξε εξαιρετική διαγνωστική απόδοση έναντι του επεμβατικού FFR, αναδεικνύοντας μια ταχεία μέθοδο με υψηλή αναπαραγωγιμότητα.[73]

16. Απώτερος στόχος: Εξατομικευμένη Ιατρική Ακριβείας

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί έναν τεράστιο όγκο κλινικών πληροφοριών. Αυτές περιλαμβάνουν το ιστορικό και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και κλινικών εξετάσεων των ασθενών, δεδομένα μεγάλης κλίμακας από πολυεθνικά μητρώα, απεικονιστικά ευρήματα, καθώς και βιομετρικά δεδομένα από φορητές συσκευές. Επιπλέον, ενσωματώνει δεδομένα από την αλληλούχιση του γονιδιώματος επόμενης γενιάς (Next Generation Sequencing-NGS), η οποία αποτελεί ήδη κλινική πρακτική στις μυοκαρδιοπάθειες και αναμένεται να γενικευθεί στο άμεσο μέλλον. Τα μοντέλα που προκύπτουν επιτρέπουν τον φαινοτυπικό προσδιορισμό των νόσων, βελτιώνουν τη διάγνωση και την πρόγνωση, ενώ διευκολύνουν τη λήψη θεραπευτικών αποφάσεων.[5] **(Εικόνα 2)**. Επίσης, η ΤΝ αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στην έρευνα και στην ταχύτερη ανάπτυξη νέων φαρ-

μάκων.[74] Στο πλαίσιο αυτό, δεδομένα από πηγές πολυτροπικής απεικόνισης (υπερηχοκαρδιογράφημα, αξονική και μαγνητική τομογραφία καρδιάς-CMR, σπινθηρογράφημα-SPECT και PET) θα ενσωματώνονται αυτόματα με τα δεδομένα του ηλεκτρονικού ιατρικού αρχείου. Με τον τρόπο αυτό, θα παρέχεται σε πραγματικό χρόνο μια ολοκληρωμένη και εξατομικευμένη αναπαράσταση της καρδιάς **(ψηφιακό δίδυμο–digital twin)**, η οποία θα περιλαμβάνει το μυοκάρδιο, τις βαλβίδες, τα στεφανιαία αγγεία, τη σοβαρότητα της νόσου και τις λειτουργικές της επιπτώσεις, καθοδηγώντας τη θεραπεία και προβλέποντας τις κλινικές εκβάσεις.[75,76] Η εφαρμογή των ανωτέρω θα οδηγήσει τελικά σε μια πιο εξατομικευμένη αντιμετώπιση των καρδιαγγειακών νοσημάτων. Αυτός άλλωστε αποτελεί και τον απώτερο στόχο της ιατρικής για τον 21ο αιώνα: την παροχή της σωστής θεραπείας, στον σωστό ασθενή, τη σωστή στιγμή.

Παράλληλα όμως με τα σημαντικά επιτεύγματα της ΤΝ στον τομέα της Ιατρικής, απαιτείται και η επίλυση σημαντικών προκλήσεων. Αυτές περιλαμβάνουν τη διασφάλιση της προστασίας των προσωπικών δεδομένων, την αντιμετώπιση των συστημικών προκαταλήψεων και της μεροληψίας των αλγορίθμων, την ανάγκη για εξωτερική επικύρωση των μοντέλων σε διαφορετικούς πληθυσμούς, καθώς και την επίλυση του προβλήματος του "μαύρου κουτιού" για την ενίσχυση της ιατρικής εμπιστοσύνης.

17. Συμπερασματικά:

Η ΤΝ έχει διεισδύσει σε όλες τις εκφάνσεις της ζωής μας και η ευρεία διαθεσιμότητά της υποδηλώνει ότι η χρήση της θα επηρεάσει σύντομα την πρακτική της καρδιολογίας σε καθημερινή βάση. Η ΤΝ θα είναι μέρος της καθημερινής ρουτίνας κάθε καρδιολόγου για να παρέχει την ευκαιρία για αποτελεσματικό φαινοτυπικό προσδιορισμό των ασθενών και σχεδιασμό προγνωστικών μοντέλων για διάφορες ασθένειες. Θα ενισχύσει τη χρήση μη επεμβατικών διαγνωστικών και θα μειώσει την ανάγκη για δαπανηρές και περίπλοκες επεμβατικές εξετάσεις για τη διάγνωση της ΣΝ. Οι μελλοντικοί καρδιολόγοι θα μπορούν να αναγνωρίζουν σε έναν ασυμπτωματικό ασθενή, εάν υπάρχει δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας ή τον κίνδυνο εμφάνισης καρδιακής ανεπάρκειας, εμφράγματος του μυοκαρδίου ή θανατηφόρας αρρυθμίας, καθορίζοντας την απαραίτητη στρατηγική αποτροπής τους (πρωτογενή πρόληψη ακριβείας). Οι καρδιολόγοι θα πρέπει να εκπαιδεύονται στην ανάπτυξη της ΤΝ ***(ψηφιακός εγγραμματισμός ή γραμματισμός)*** και να λαμβάνουν μέρος σε καινοτομίες ΤΝ και να τις χρησιμοποιούν στην πρακτική τους. Η παραδοχή ότι ο συνδυασμός ανθρώπινης και τεχνητής νοημοσύνης υπερέχει της ανθρώπινης μονάδας μεμονωμένα είναι θεμελιώδης. Ωστόσο, θα πρέπει να λάβουν υπόψη τα ηθικά διλήμματα που δημιουργούνται σε τομείς όπου η ΤΝ υιοθετείται και να επιδιώξουν να ενσωματώσουν τις γνώσεις τους και τις προτάσεις που προέρχονται από την τεχνητή νοημοσύνη, για μια ώριμη και τεκμηριωμένη κρίση σε κάθε στάδιο της κλινικής διαδρομής του ασθενούς. Το διακύβευμα που προβάλλει είναι η ***«συννοημοσύνη»***, η λειτουργική και γόνιμη συμβίωση με τις μηχανές, που υπόσχεται να επαναπροσδιορίσει τα όρια της πρόληψης, της διάγνωσης και της θεραπευτικής στην καρδιολογία.

Η **συννοημοσύνη** είναι μια έννοια που αναφέρεται στη συνεργασία μεταξύ δύο διαφορετικών μορφών νοημοσύνης —συνήθως μιας φυσικής (ανθρώπινης) και μιας τεχνητής (ΤΝ)— με σκοπό την παραγωγή ενός κοινού έργου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Topol Eric. Βαθιά Ιατρική. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. 2023; σελ.23
2. Sun X., Yin Y., Yang Q., et al. Artificial intelligence in cardiovascular diseases: diagnostic and therapeutic perspectives. European Journal of Medical 2023;28:242.
3. Johnson K, Soto J, Glicksberg B, et al. Artificial Intelligence in Cardiology.JACC 2018;71(23):2668-2679
4. Elhaddad M, Haman S. AI-Driven Clinical Decision Support Systems: An Ongoing Pursuit of Potential. Cureus 2024; 16 (4): e57728.
5. Lüscher T. F., Wenzl F., D'Ascenzo F., et al. Artificial intelligence in cardiovascular medicine: clinical applications. European Heart Journal. 2024; 45 (40): 4291–4304.
6. Karatzia L., Aung N., Aksentijevic D. Artificial intelligence in cardiology: Hope for the future and power for the present. Front Cardiovasc Med. 2022 Oct

13;9:945726.
7. Krishnan G, Singh S., Pathania M, et al. Artificial intelligence in clinical medicine: catalyzing a sustainable global healthcare paradigm. Front. Artif. Intell., 2023;6: 1227091.
8. Haug Ch., Drazen J. Artificial Intelligence and Machine Learning in Clinical Medicine, 2023. NEJM 2023;388(13):1201-1208.
9. Gardezi SKM, Myerson SG, Chambers J., ,et al. Cardiac auscultation poorly predicts the presence of valvular heart disease in asymptomatic primary care patients. Heart 2018; 104:1832-1835
10. Thompson WR, Reinisch AJ, Unterberger MJ, et al. Artificial Intelligence-Assisted Auscultation of Heart Murmurs: Validation by Virtual Clinical Trial.Pediatr Cardiol. 2019 Mar;40(3):623-629.
11. Sun S, Huang T, Biqiang Zhang et al. A novel intelligent system based on adjustable classifier models for diagnosing heart sounds. Scientific Reports, 2022;12: 1283.
12. Rancier M., Israel I., Monickam V., et al. Artificial-intelligence-enabled digital stethoscope improves point-of-care screening for moderate-to-severe valvular heart disease. Eur Heart J Digit Health. 2026;7(2):ztag003.
13. Arjoune Y, Nguyen TN, Salvador T., et al. StethAid: A Digital Auscultation Platform for Pediatrics. Sensors 2023;23(12):5750.
14. Bachtiger P., Petri C, Scott F, et al. Point-of-care screening for heart failure with reduced ejection fraction using artificial intelligence during ECG-enabled stethoscope examination in London, UK: a prospective, observational, multicentre study. Lancet Digit Health. 2022;4(2):e117-e125.
15. Guo L., Pressman G., Kieu S., et al. Automated Detection of Reduced Ejection Fraction Using an ECG-Enabled Digital Stethoscope: A Large Cohort Validation. JACC Advances. Archives 2025; 4:101619.
16. Siontis KC, Noseworthy PA, Attia ZI, et al. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. Nat Rev Cardiol 2021;18(7):465–478.
17. Attia, Z. I., Friedman, P. A., Noseworthy, P. A., et al. Age and sex estimation using artificial intelligence from standard 12-lead ECGs. Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology, 2029;12(9), e007284.
18. Attia ZI, Suraj Kapa S, Lopez-Jimenez F., et al. Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. Nat Med 2019;25(1):70-4.
19. Sau A., Sieliwonczyk E., Patlatzoglou K., et al. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography for the identification of a sex-related cardiovascular risk continuum: a retrospective cohort study. Lancet Digit Health. 2025;7(3):e184-e194.
20. Noseworthy PA, Attia ZI, Behnken EM, et al. Artificial intelligence-guided screening for atrial fibrillation using electrocardiogram during sinus rhythm: a prospective non-randomised interventional trial. Lancet 2022;400:1206–12
21. Elias P., Poterucha TJ, Rajaram V., et al. Deep Learning Electrocardiographic Analysis for Detection of Left-Sided Valvular Heart Disease. JACC 2022;80 (6):613-626.
22. Cohen-Shelly M., Attia ZI., Friedman PA., et al. Electrocardiogram screening for aortic valve stenosis using artificial intelligence. Eur Heart J. 2021; 42 (30):2885-2896.
23. Büscher A., Lucas Plagwitz L, Kemal Yildirim K., et al. Deep learning electrocardiogram model for risk stratification of coronary revascularization need in the emergency department. Eur Heart Journal 2026; 47 (18): 2155–2167.
24. Li Y., Zhao K., Wu J., et al. Machine Learning in Left Ventricular Hypertrophy Detection: Systematic Review and Meta-Analysis. J Med Internet Res 2026;28:e76637.
25. van Duijvenboden S., El-Medany A.,et al.Population-Wide Assessment of Heart Rhythm and Physical Activity from 14-Day Recordings: The UK Biobank Cardiac Monitoring Study. UK Biobank & SHIP:Europace, 2026
26. Kagiyama N., Piccirilli M., Yanamala N., et al. Machine Learning Assessment of Left Ventricular Diastolic Function Based on Electrocardiographic Features. J Am Coll Cardiol. 2020 Aug 25;76(8):930-941.
27. Lee E., Ito S., Miranda WR., et al. Artificial intelligence-enabled ECG for left ventricular diastolic function and filling pressure. npj Digital Medicine 2024; 7, Article number: 4.
28. Lee HS, Croon PhM, Lee MS., et al. Artificial Intelligence-Enabled Electrocardiography in Practice: A State-of-the-Art. Korean Circ J. 2026;56 (3): 199-215
29. Plesner LL., Müller FC., Nybing JD., et al. Autonomous Chest Radiograph Reporting Using AI: Estimation of Clinical Impact. Radiology 2023;307(3): e222268.
30. Bhave S., Rodriguez V., Poterucha T., et al. Deep learning to detect left ventricular structural abnormalities in chest X-rays. European Heart Journal, 2024;45:2002–2012.
31. Ueda D, MatsumotoT., Ehara Sh., et al. Artificial intelligence-based model to classify cardiac functions from chest radiographs: a multi-institutional, retrospective model development and validation study. Lancet Digit Health 2023; 5: e525–533.
32. Asch FM, Poilvert N., Abraham Th., et al. Automated Echocardiographic Quantification of Left Ventricu-

lar Ejection Fraction Without Volume Measurements Using a Machine Learning Algorithm Mimicking a Human Expert. Circ Cardiovasc Imaging 2019;12(9):e009303.
33. Χρυσός Δ, Κατράνης Αλ., Νικήτας Γ. Η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης στην υπερηχοκαρδιογραφία. Ελλην. Καρδιολ. Επιθ. 2021;6(3):242-253.
34. Siegersma KP, Leiner T, Chew DP. Artificial intelligence in cardiovascular imaging: state of the art and implications for the imaging cardiologist. Neth Heart J. 2019; 27(9): 403–413.
35. Davis A., Billick K., Horton K., et. al. Artificial Intelligence and Echocardiography: A Primer for Cardiac Sonographers. State–of-the art. Review JASE 2020; 33(9):1061-1066.
36. Zhang J, Gajjala S , Agrawal P, et al. Fully Automated Echocardiogram Interpretation in Clinical Practice. Circulation. 2018;138(16):1623–1635.
37. Sengupta PP, Huang Yen-Min, Bansal M, et.al. Cognitive Machine-Learning Algorithm for Cardiac Imaging: A Pilot Study for Differentiating Constrictive Pericarditis From Restrictive Cardiomyopathy. Circ Cardiovasc Imaging.2016 Jun;9(6):1-10 e004330.
38. Nedadur R, Wang B, Tsang W, et al. Artificial intelligence for the echocardiographic assessment of valvular heart disease. Heart 2022;108(20):1–8.
39. Yu F, Huang H, Yu Q, et al. Artificial intelligence-based myocardial texture analysis in etiological differentiation of left ventricular hypertrophy Ann Transl Med 2021;9(2):108.
40. Asch FM, Mor-Avi V., Rubenson D., et al., Deep Learning–Based Automated Echocardiographic Quantification of Left Ventricular Ejection Fraction: A Point-of-Care Solution. Circulation: Cardiovascular Imaging. 2021;14(6):e012293.
41. Elwazir MY., et al. In: 2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE); p.691–6.
42. Khan FH, Inoue K.,Nobuyuki Ohte N.,et al.Evaluation of diastolic function: machine learning improves classification of left ventricular filling pressure. European Heart Journal - Cardiovascular Imaging, 2026;27(6) 2026; 1205–1212.
43. Papadopoulou S., Dionysopoulos D., Mentesidou V., et al. Artificial intelligence-assisted evaluation of cardiac function by oncology staff in chemotherapy patients. European Heart Journal - Digital Health, 2024;5 (3) ; 278–287.
44. Wenzl F., Kraler S., Ambler G., et al. Sex-specific evaluation and redevelopment of the GRACE score in non-ST-segment elevation acute coronary syndromes in populations from the UK and Switzerland: a multinational analysis with external cohort validation. Lancet . 2022;400(10354):744-756.
45. Choi DJ, Park JJ., Ali T., et al. Artificial intelligence for the diagnosis of heart failure.npj Digital Medicine 2020;volume 3 ,article number:54
46. Wu J, Biswas D, Ryan M., et al. Artificial intelligence methods for improved detection of undiagnosed heart failure with preserved ejection fraction. Eur J Heart Fail 2024;26: 302 –310.
47. Sengupta PP., Poterucha T., Pezel Th., et al. Current and future use of artificial intelligence in valvular heart disease imaging. European Heart Journal - Cardiovascular Imaging, 2026; 27(2); 319–329.
48. van Rosendael A., Maliakal G., Kolli K. et al. Maximization of the usage of coronary CTA derived plaque information using a machine learning based algorithm to improve risk stratification; insights from the CONFIRM registry. Cardiovasc Comput Tomogr. 2018; 12(3):204-209.
49. Williams MC, Shanbhag AD., Zhou J., et al. Automated vessel-specific coronary artery calcification quantification with deep learning in a large multicentre registry. Agatston score. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2024;25(7):976–985.
50. Lin A., Manral N., McElhinney P., et al. Deep learning-enabled coronary CT angiography for plaque and stenosis quantification and cardiac risk prediction: an international multicentre study. Lancet Digit Health 2022;4 (4):e256–265.
51. Cury RC., Leipsic J., Abbaraet S., et. al. CAD-RADS 2.0 – 2022. Coronary Artery Disease-Reporting and Data System. JACC Cardiovasc Imaging 2022;15 (11):1974–2001.
52. West HW, Siddique M, Williams MC., et al. Deep-Learning for Epicardial Adipose Tissue Assessment With Computed Tomography: Implications for Cardiovascular Risk Prediction. JACC Cardiovasc Imaging 2023; 16 (6):800-816.
53. Vrints Chr., Andreotti F., Koskinas K., et al. ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes. Eur. Heart J. 2024; 45(36):3415-3537.
54. Oikonomou EK, Marwan M., Desai MY., et al. Non-invasive detection of coronary inflammation using computed tomography and prediction of residual cardiovascular risk (the CRISP CT study): a post-hoc analysis of prospective outcome data. Lancet 2018;392:929–939.
55. Chan K, et al. Measuring the perivascular Fat Attenuation Index (FAI) on routine Coronary Computed Tomography Angiography (CCTA).Circulation 2023;148 A18320.
56. Chan K., Wahome E., Tsiachristas A., et al. Inflammatory risk and cardiovascular events in patients without obstructive coronary artery disease: the ORFAN multicentre, longitudinal cohort study. Lancet 2024;403:2606-2018.
57. Antoniades C, West HW, et al. Coronary CT angiography as an 'one-stop shop' to detect the high-

risk plaque and the vulnerable patient. Eur Heart J. 2021;42:3853- 55.
58. Oikonomou EK, Antonopoulos AS, Schottlander D, et al. Standardized measurement of coronary inflammation using cardiovascular computed tomography: integration in clinical care as a prognostic medical device. Cardiovasc Res 2021;117(13):2677-2690.
59. Antoniades C, Tousoulis D, Vavlukis M., et al. Perivascular adipose tissue as a source of therapeutic targets and clinical biomarkers. Eur Heart J 2023;44(38):3827-3844.
60. Oikonomou EK, Williams MC, Kotanidis CP, et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT angiography. Eur Heart J. 2019;40 (43):3529–3543.
61. Chen Q, Xie G, Tang CH, et al. Development and Validation of CCTA-based Radiomics Signature for Predicting Coronary Plaques With Rapid Progression.Circ Cardiovasc Imaging. 2023 Sep;16(9): e015340.
62. Coenen A., Kim YH, Kruk M., et al. Diagnostic Accuracy of a Machine-Learning Approach to Coronary Computed Tomographic Angiography-Based Fractional Flow Reserve: Result From the MACHINE Consortium. Circ Cardiovasc Imaging 2018;11(6): e007217.
63. Nørgaard BL, LeipsicJ, Sara Gaur S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next Steps. JACC 2014;63(12):1145-1155.
64. Kharabish A., ElGuindy A. PLATFORM at 90 days: Evaluating the clinical utility of FFRCT. Glob Cardiol Sci Pract. 2016;2016(3):e201622.
65. Van Belle E., Luis Raposo L., Baptista S. Impact of an Interactive CT/FFRCT Interventional Planner on Coronary Artery Disease Management Decision Making. JACC: Imaging: 2021; 14(5):1068-1070].
66. Davies RH, Augusto JB, Bhuva A, et al. Precision measurement of cardiac structure and function in cardiovascular magnetic resonance using machine learning.J Cardiovasc Magn Reson 2022;24:16.
67. Papetti DM, Van Abeelen K, Davies R, et al. An accurate and time-efficient deep learning-based system for automated segmentation and reporting of cardiac magnetic resonance-detected ischemic scar. Comput Methods Programs Biomed 2023;29:107321. Comput Methods Programs Biomed 2023;29:107321.
68. Wu LM, Shi RY, Wu CW, et al. A radiomic MRI based nomogram for prediction of heart failure with preserved ejection fraction in systemic lupus erythematosus patients: insights from a three-center prospective study. J Magn Reson Imaging 2022;56:779–789.
69. Golub I., Thummata A., Morad T., et al. Artificial Intelligence in Nuclear Cardiac Imaging: Novel Advances, Emerging Techniques, and Recent Clinical Trials. J Clin Med. 2025;14(6):2095.
70. Parlati A., Nardi E., Sucato V., et al. ANOCA, INOCA, MINOCA: The New Frontier of Coronary Syndromes. J. Cardiovasc. Dev. Dis. 2025; 12 (2), 64. https://doi.org/10.3390/jcdd12020064.
71. Bednarek A., Gąsior P., Jaguszewski M., et al. Artificial Intelligence based fractional flow reserve. Cardiology Journal 2025; 32 (5): 487–504. Cardiology Journal 2025; 32 (5): 487–504.
72. Ghobrial M., Haley H., Gosling R., et al. Modelled impact of virtual fractional flow reverse in patients undergoing coronary angiography (VIRTU-4). Heart 2024;110 (16):1048-1055.
73. Ben-Assa E., Salman A., Cafri C., et al. Performance of a novel artificial intelligence software developed to derive coronary fractional flow reserve values from diagnostic angiograms. Coron Artery Dis. 2023; 34: 533–541.
74. Johnson KW., Soto JT., Glicksberg BS., et al. Artificial Intelligence in Cardiology. JACC 2018;71 (23):2668-2679.
75. van Assen M., Razavi A., Whelton S., et al. Artificial intelligence in cardiac imaging: where we are and what we want. European Heart Journal 2023;44 (7): 541–543.
76. Editorial (editor-in-chief Monteiro Joao). The Future of Medicine. Nature Medicine 2025;31:1.

Τεχνητή Νοημοσύνη στην Καρδιολογία: Σύγχρονες Εξελίξεις και Προοπτικές

Περίληψη

Εισαγωγή: Η καρδιαγγειακή νόσος παραμένει η κύρια αιτία θνησιμότητας παγκοσμίως, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για πιο ακριβή και έγκαιρη διάγνωση. Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (ΤΝ) στον τομέα της καρδιολογίας έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές, αναδιαμορφώνοντας την κλινική πράξη.

Σκοπός: Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανασκόπηση των σημαντικότερων πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων της ΤΝ στην καρδιολογία, καθώς και στην ανάλυση των μελλοντικών προοπτικών και προκλήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή της.

Μεθοδολογία: Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σύγχρονων επιστημονικών μελετών, κλινικών δοκιμών και άρθρων που δημοσιεύθηκαν την τελευταία δεκαετία. Εξετάστηκαν οι εφαρμογές αλγορίθμων σε όλα τα γνωστικά πεδία της καρδιολογίας καθώς και στην πρόβλεψη κινδύνου.

Αποτελέσματα: Τα ευρήματα δείχνουν ότι η ΤΝ υπερέχει στην αυτοματοποιημένη ανάλυση του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ) επιτρέποντας την ανίχνευση "αποτυπώματος" προηγηθέντος επεισοδίου κολπικής μαρμαρυγής και την ασυμπτωματική δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας. Στην καρδιακή απεικόνιση (υπερηχογράφημα, αξονική και μαγνητική τομογραφία, SPECT), οι αλγόριθμοι Βαθιάς Μάθησης μειώνουν τον χρόνο διάγνωσης και το ανθρώπινο σφάλμα, προσφέροντας ακριβή εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας και των όγκων των καρδιακών κοιλοτήτων, την ανίχνευση αποφρακτικής στεφανιαίας νόσου και την πρώιμη αναγνώριση της μικροαγγειακής δυσλειτουργίας. Επιπλέον, τα προγνωστικά μοντέλα ΤΝ ενσωματώνουν τεράστιους όγκους δεδομένων από ηλεκτρονικούς φακέλους υγείας, βελτιώνοντας την εξατομικευμένη εκτίμηση του κινδύνου για οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου ή για ανάπτυξη καρδιακής ανεπαρκείας.

Συμπεράσματα / Προοπτικές: Η ΤΝ αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο στα χέρια των καρδιολόγων, ενισχύοντας την ιατρική ακριβείας και μειώνοντας το φόρτο εργασίας των συστημάτων υγείας. Παρά τις εντυπωσιακές εξελίξεις, η ευρεία κλινική της ενσωμάτωση απαιτεί την επίλυση σημαντικών προκλήσεων, όπως η διασφάλιση της προστασίας των προσωπικών δεδομένων, η ανάγκη για εξωτερική επικύρωση των αλγορίθμων σε διαφορετικούς πληθυσμούς και η αντιμετώπιση του προβλήματος του «μαύρου κουτιού» για την ενίσχυση της ιατρικής εμπιστοσύνης. Το μέλλον της καρδιολογίας βασίζεται στη δημιουργική συνέργεια ανθρώπινης κλινικής κρίσης και Τεχνητής Νοημοσύνης.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, Μηχανική Μάθηση, Βαθιά Μάθηση, Καρδιολογία, Ηλεκτροκαρδιογράφημα, Καρδιακή Απεικόνιση, Πρόγνωση Κινδύνου.