

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, απεικόνιση

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

Εισαγωγή

Στην εποχή της πληροφορίας, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής και επεξεργασίας εκτενών δεδομένων για κάθε ασθενή.

Αυτός ο όγκος πληροφοριών μπορεί δυνητικά να προάγει με ακρίβεια τη διάγνωση στοχεύοντας στη βέλτιστη θεραπεία. Ωστόσο, αυτή η εκθετική αύξηση των διαθέσιμων πληροφοριών ξεπερνά τις ανθρώπινες δυνατότητες και είχε ως συνέπεια την αντικειμενική δυσκολία στην ανάλυση αυτού του όγκου των δεδομένων.¹ Για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού, χρησιμοποιείται η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ), της οποίας η ταχύτητα επεξεργασίας μιας εργασίας και η υπολογιστική ισχύς είναι ασύγκριτα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ανθρώπου.

Η ΤΝ 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) και τη Βαθιά Μάθηση (ΒΜ, Deep Learning). Η ΜΜ συγκροτείται από αλγόριθμους, που “εκπαιδεύονται” και βελτιώνονται καθώς εκτίθενται σε περισσότερα δεδομένα. Η ΜΜ μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες: την εποπτευόμενη και τη μη εποπτευόμενη, με βάση την παρουσία ή όχι 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 εκ-



παιδεύσει 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, ένα επαναστατικό στάδιο εξέλιξης της παραδοσιακής ΤΝ, η οποία με τη χρήση της ΒΜ έχει την ικανότητα να «δημιουργεί» ένα εντελώς νέο, πρωτότυπο περιεχόμενο (κείμενο, εικόνες, κώδικα, ήχο, βίντεο) ανταποκρινόμενη σε απλές εντολές. (Εικόνα 1).

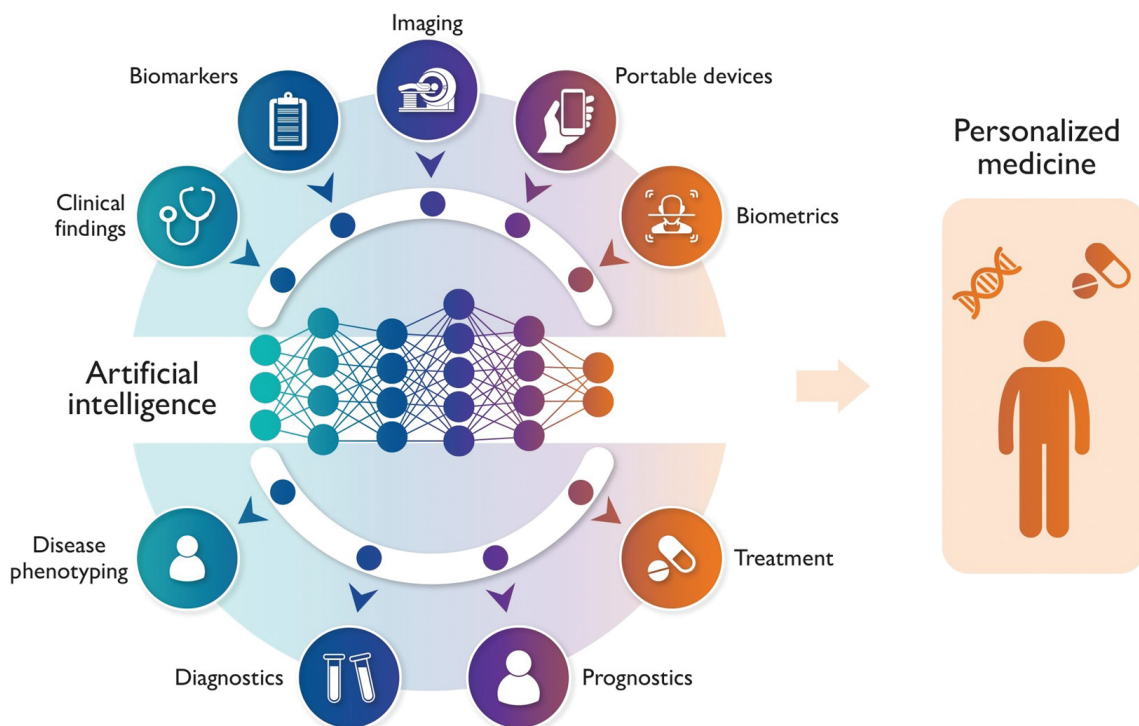
Στον τομέα της καρδιολογίας, η Παραγωγική ΤΝ ανοίγει νέους ορίζοντες, επιτρέποντας τη δημιουργία σύνθετων ιατρικών δεδομένων για την εκπαίδευση αλγορίθμων, τη σύνταξη αυτοματοποιημένων ιατρικών αναφορών και την προσομοίωση πολύπλοκων αιμοδυναμικών σεναρίων. Η ΤΝ και η ΜΜ μπορούν να παρέχουν βοήθεια στους κλινικούς ιατρούς μέσω της λήψης 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 ΤΝ - (Artificial Intelligence - Clinical Decision Support System, AI-CDSS) συμβάλλει στην υποστήριξη των ιατρών για τη λήψη κλινικών αποφάσεων.^{4,5}

Κλινικές εφαρμογές της ΤΝ στην καρδιολογία

Η ΤΝ, μέσω της εξαγωγής πληροφοριών από σύνθετες βάσεις δεδομένων με τη χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων, έχει τη δυνατότητα να επιταχύνει τη διάγνωση καρδιαγγειακών παθήσεων, όπως η στεφανιαία νόσος, η καρδιακή ανεπάρκεια, η κοιλιακή μαρμαρυγή, οι βαλβιδοπάθειες, οι μυοκαρδιοπάθειες και οι συγγενείς καρδιοπάθειες.² (Εικόνα 2)

Graphical Abstract Clinical information including patient data, laboratory parameters, and results from clinical examination, ...



Eur Heart J, Volume 45, Issue 40, 21 October 2024, Pages 4291–4304,
<https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae465>
 The content of this slide may be subject to copyright: please see the slide notes for details.



Εικόνα 2. Graphical Abstract Clinical information including patient data, laboratory parameters, and results from clinical examination, large-scale data from (multi-)national registries, imaging data, and (patient) biometrical data can all be processed by artificial intelligence. Resulting models allow for disease phenotyping, enhance diagnostics, improve prognostication, and facilitate treatment decision-making, thus ultimately contributing to a more personalized therapy of patients with cardiovascular disease.

Unless provided in the caption above, the following copyright applies to the content of this slide: © The Author(s) 2024. Published by Oxford University Press on behalf of the European Society of Cardiology. All rights reserved. For commercial re-use, please contact reprints@oup.com for reprints and translation rights for reprints. All other permissions can be obtained through our RightsLink service via the Permissions link on the article page on our site—for further information please contact journals.permissions@oup.com. This article is published and distributed under the terms of the Oxford University Press, Standard Journals Publication Model (<https://academic.oup.com/pages/standard-publication-reuse-rights>)

ΤΝ και ιστορικό. Η ΤΝ έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά τη διαδικασία λήψης του ιατρικού ιστορικού, επιτρέποντας πιο ακριβή διάγνωση. Η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (ΕΦΓ, Natural Language Processing), ένας βασικός κλάδος της ΤΝ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του κειμένου ή της φωνής του ασθενούς κατά τη λήψη του ιστορικού. Ένα πρόσφατο ορόσημο στην εξέλιξη της ΕΦΓ αποτελεί η ανάπτυξη των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (ΜΓΜ, Large Language Models), 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 chatbots είναι το GPT-4 (Generative Pretrained Transformer-4) που διαθέτει τη δυνατότητα να αποτυπώνει τις συνομιλίες ασθενή - ιατρού και να τις μεταγράφει σε ολοκληρωμένες σημειώσεις.^{6,7,8}

ΤΝ και ακρόαση. Είναι γνωστό ότι η ακρόαση της καρδιάς στερείται ευαισθησίας (έως 43%) και ειδικότητας (έως 69%) για τη διάγνωση βαλβι-

κής καρδιακής νόσου.⁹ Αντίθετα, η ΤΝ μπορεί να εντοπίσει παθολογικά ευρήματα με υψηλή ακρίβεια. Ενδεικτικά, ένας αλγόριθμος που ανέλυσε όλα τα καρδιακά ακροαστικά ευρήματα στο Johns Hopkins Hospital κατάφερε να ανιχνεύσει τα παιδιατρικά φυσήματα με ευαισθησία και ειδικότητά του έφθασαν το 93% και 81% αντίστοιχα και με συνολική διαγνωστική ακρίβεια 88%.¹⁰

Η ενσωμάτωση της ΤΝ σε ψηφιακά στηθοσκόπια δύναται να αντισταθμίζει τους περιορισμούς της παραδοσιακής ακρόασης. Σε περιπτώσεις βαλβιδοπαθειών και συγγενών καρδιοπαθειών η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων ΤΝ πέτυχε την εντόπιση και την ορθή ταξινόμηση των παθήσεων με διαγνωστική ακρίβεια που άγγιξε το 99%.¹¹ Τα ψηφιακά στηθοσκόπια με ΤΝ βελτιώνουν σημαντικά την ανίχνευση της βαλβιδικής καρδιακής νόσου συγκριτικά με την συνήθη 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 σε επίπεδο πρωτοβάθμιας περίθαλψης.¹²

Στον τομέα της παιδιατρικής, εισήχθη πρόσφατα η ψηφιακή πλατφόρμα StethAid, η οποία συνδυάζει την ακρόαση, την ΤΝ και την τηλεϊατρική. Η πλατφόρμα αποτελείται από ένα ψηφιακό στηθοσκόπιο, εφαρμογές για φορητές συσκευές, προσαρμοσμένες πύλες επικοινωνίας ασθενούς - παρόχου υγείας και αλγόριθμους ΒΜ και επιτρέπει στους ιατρούς να αναγνωρίζουν με ακρίβεια το φύσημα Still στα παιδιά (ευαισθησία 91,9%, ειδικότητα 92,6%) και το συριγμό (ευαισθησία 83,7%, ειδικότητα 84,4%).¹³

Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή επεκτείνεται και στην ανίχνευση της καρδιακής ανεπάρκειας. Ένα σύστημα ΒΜ, που εφαρμόζεται σε ένα ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) μονής απαγωγής που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια μιας τυπικής εξέτασης με ψηφιακό στηθοσκόπιο, μπορεί να ανιχνεύσει κλάσμα εξώθησης της αριστερής κοιλίας (ΚΕ) ίσο ή μικρότερο του 40% σε ασθενείς.¹⁴ Επίσης, ένα μοντέλο συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (Convolutional Neural Network) χρησιμοποιώντας εισόδους ΗΚΓ και φωνοκαρδιογραφήματος (PCG) που καταγράφηκαν από ψηφιακό στηθοσκόπιο, πέτυχε την έγκαιρη ανίχνευση ασθενών με δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας και ΚΕ $\leq 40\%$. Αυτή η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία της καρδιακής ανεπάρκειας,

βελτιώνοντας σημαντικά την έκβαση των ασθενών.¹⁵

Σήμερα διατίθεται στο εμπόριο το ψηφιακό στηθοσκόπιο Eko CORE 500™, το οποίο ενσωματώνει τεχνολογία ΗΚΓ και υποστηρίζεται από ΤΝ εγκεκριμένη από τον FDA. Η συσκευή προσφέρει ενεργή ακύρωση θορύβου και ενίσχυση ήχων, ενώ η ενσωματωμένη έγχρωμη οθόνη του επιτρέπει την άμεση ανίχνευση αρρυθμιών, χαμηλού ΚΕ 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 PCG και η προηγμένη ανάλυσή του.

ΗΚΓ ενισχυμένο με ΤΝ. Η ραγδαία εξέλιξη των αλγορίθμων ΤΝ και ΒΜ επιτρέπει πλέον την εξαγωγή 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, επιτρέποντας την ανάπτυξη αλγορίθμων που αντλούν κλινικά χρήσιμες πληροφορίες και έχουν υψηλή κλινική σημασία.¹⁶ Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι σε θέση να προσδιορίσει εάν ένας ασθενής είναι άνδρας ή γυναίκα με ακρίβεια άνω του 90%,¹⁷ την χρονολογική του ηλικία,¹⁷ τη βιολογική του ηλικία ως δείκτη μακροζωίας 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 σύνολο δεδομένων από 44.959 ασθενείς, το οποίο περιλάμβανε ζεύγη ΗΚΓ 12 απαγωγών και υπερηχοκαρδιογραφημάτων (με καταγεγραμμένο το ΚΕ). Οι ερευνητές εκπαιδύσαν ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (CNN) να εντοπίζει ασθενείς με δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας (ΚΕ $\leq 35\%$) χρησιμοποιώντας απο-

κλειστικά τα δεδομένα του ΗΚΓ. Κατά τη δοκιμή του μοντέλου σε ένα ανεξάρτητο δείγμα 52.870 ασθενών, η απόδοσή του ήταν εξαιρετική. Αξιζει να σημειωθεί ότι, ανάμεσα στους ασθενείς χωρίς αρχική δυσλειτουργία (ΚΕ >35%), εκείνοι που παρουσίασαν θετικό αποτέλεσμα στον έλεγχο με ΤΝ διέτρεχαν 4,1 φορές μεγαλύτερο κίνδυνο να αναπτύξουν δυσλειτουργία της αριστερής κοιλίας στο μέλλον.¹⁸

Παράλληλα, τα συστήματα ΒΜ εφαρμόζονται με επιτυχία και για την ανίχνευση αρρυθμιών. Συγκεκριμένα, ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο, που είναι ενσωματωμένο στο ΗΚΓ, δύναται να ταυτοποιήσει ασθενείς με ιστορικό κοιλιακής μαρμαρυγής που τη στιγμή της εξέτασης βρίσκονται σε φλεβοκομβικό ρυθμό με ευαισθησία 79% και ειδικότητα 79,5%.²⁰

Επίσης, σε μία πολυκεντρική μελέτη 77.163 ασθενών, η ανάλυση του ΗΚΓ με αλγόριθμο ΒΜ έδειξε ότι είναι εφικτή η ακριβής ανίχνευση της στένωσης αορτής, της ανεπάρκειας αορτής και της ανεπάρκειας μιτροειδούς. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ενός προγράμματος προσυμπτωματικού ελέγχου βαλβιδοπαθειών.²¹ Συγκεκριμένα, οι Cohen-Shelly et al.²² ανέλυσαν δεδομένα υπερηχοκαρδιογραφήματος και ΗΚΓ από 258.607 ενήλικες. Μέτρια έως σοβαρή στένωση αορτής βρέθηκε στο 3,7% με τη χρήση του AI-ECG (ευαισθησία 78%, ειδικότητα 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.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε μοντέλο ΗΚΓ βασισμένο σε ΤΝ, που είναι σε θέση να ανιχνεύσει το έμφραγμα του μυοκαρδίου σε ασθενείς που προσέρχονται στο Τμήμα Επειγόντων Περιστατικών (ΤΕΠ).²³ Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες ανέδειξαν τη δυνατότητα ανίχνευσης δομικών και λειτουργικών παθήσεων της καρδιάς απευθείας από το ΗΚΓ με ενσωματωμένη ΤΝ. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η διάγνωση της υπερτροφίας της αριστερής κοιλίας,²⁴ των διαταραχών του καρδιακού ρυθμού²⁵ καθώς και η αξιολόγηση της διαστολικής λειτουργίας της αριστερής κοιλίας.^{26,27} Επομένως, το ΗΚΓ με ενσωματωμένη ΤΝ εξελίσσεται σε ένα πολυδύναμο ψηφιακό βιο-

δείκτη που συμβάλλει σημαντικά στην διάγνωση των ασθενών.²⁸

ΤΝ και ακτινογραφία θώρακος. Το ChestLink είναι το πρώτο πλήρως αυτόνομο προϊόν ιατρικής απεικόνισης με ενσωματωμένη ΤΝ. Εντοπίζει ακτινογραφίες θώρακα χωρίς παθολογία και παρέχει γνωματεύσεις ασθενών.²⁹ Σε πρόσφατη μελέτη, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ΤΝ για την αναγνώριση σοβαρής υπερτροφίας και διάτασης της αριστερής κοιλίας χρησιμοποιώντας την ακτινογραφία. Η μελέτη έδειξε ότι ένα μοντέλο ΤΝ υπερέχει σε ευαισθησία έναντι ομάδας πιστοποιημένων ακτινολόγων στη διάγνωση (71% έναντι 66%), διατηρώντας σταθερή την ειδικότητα (73%).³⁰ Επίσης ένα μοντέλο ΤΝ μπορεί να ταξινομήσει το ΚΕ και τις βαλβιδοπάθειες χρησιμοποιώντας πληροφορίες από ψηφιακές ακτινογραφίες θώρακα, που έγιναν εντός 14 ημερών από μία δισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφική μελέτη.³¹

ΤΝ και υπέρηχος καρδιάς. Η ερμηνεία των ερημάτων στον υπέρηχο καρδιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χειριστή και η ποιότητα των εικόνων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο με την εμπειρία του χρήστη, αλλά και με τα σωματομετρικά χαρακτηριστικά του ασθενούς. Η ανάπτυξη αλγορίθμων ΤΝ για την αυτοματοποιημένη ερμηνεία εικόνων είναι πρόκληση και απαιτεί μεγάλα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης. Σε πρόσφατη μελέτη, ένας αλγόριθμος ΒΜ εκπαιδεύτηκε σε μια βάση δεδομένων με περισσότερες από 50.000 υπερηχοκαρδιογραφικές μελέτες για την αυτόματη εκτίμηση του ΚΕ (AutoEF), χρησιμοποιώντας πολλαπλές κορυφαίες λήψεις δύο και τεσσάρων κοιλοτήτων. Οι τιμές του AutoEF εμφάνισαν εξαιρετική συμφωνία (μέση απόλυτη απόκλιση 2,9%) και με τις τιμές, οι οποίες προέκυψαν από τον μέσο όρο των μετρήσεων τριών ειδικών με τη χρήση συμβατικής, ογκομετρικής τεχνικής. Για την ανίχνευση ΚΕ ≤35%, το AutoEF επέδειξε ευαισθησία 0,90 και ειδικότητα 0,92, τιμές παρόμοιες με εκείνες των υπερηχογραφιστών.³² Η ενσωμάτωση της ΤΝ στα μηχανήματα υπερήχων έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει το χρόνο της εξέτασης και να αυξήσει τη διαγνωστική ακρίβεια.

Η 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) και της τμηματικής παραμόρφωσης της αριστερής κοιλίας.^{34,35} Επίσης, συμβάλλει στη διάγνωση παθήσεων (υπερτροφική μυοκαρδιοπάθεια, αμυλοείδωση, πνευμονική αρτηριακή υπέρταση),³⁶ διάκριση μεταξύ συμπίεστικής περικαρδίτιδας και περιοριστικής μυοκαρδιοπάθειας,³⁷ αυτοματοποιημένη ανάλυση καρδιακών βαλβίδων και ανίχνευση υπάρχουσας παθολογίας (ανεπάρκεια - στένωση),³⁸ καθώς και ανάλυση της υφής του μυοκαρδίου για την αιτιολογική διάγνωση της υπερτροφίας της αριστερής κοιλίας.³⁹

Αυτά τα μηχανήματα υπερήχων αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για τη διάγνωση και τη διαχείριση των ασθενών ιδιαίτερα στην Πρωτοβάθμια Φροντίδα Υγείας, στο ΤΕΠ και στη Μονάδα Εντατικής Θεραπείας. Μία πρόσφατη μελέτη επικύρωσε έναν αλγόριθμο ΒΜ για τον αυτόματο υπολογισμό του ΚΕ (AutoEF) με παρακλινίο υπέρηχο (Point Of Care UltraSound, POCUS). Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή συμφωνία με τις μετρήσεις των ειδικών, καθιστώντας την τεχνολογία πολύτιμο εργαλείο για την ακριβή εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας από λιγότερο έμπειρους χρήστες.⁴⁰

Επίσης, πρόσφατα αναπτύχθηκε ένας πλήρως αλγόριθμος ΒΜ για την επισήμανση εικόνων Doppler της διαμυροειδικής ροής, την ανίχνευση του σήματος και την εξαγωγή των ταχυτήτων ροής κύματος Ε και Α και του χρόνου επιβράδυνσης. Η ανάλυση της ταχύτητας των κυμάτων Ε και Α έδειξε εξαιρετική συσχέτιση με τις τιμές χειριστή, ενώ ο χρόνος επιβράδυνσης έδειξε χαμηλότερη συσχέτιση.⁴¹

Κατά την αξιολόγηση της διαστολικής λειτουργίας της αριστερής κοιλίας η χρήση της ΜΜ μπορεί να βελτιώσει την ταξινόμηση της πίεσης πλήρωσης της αριστερής κοιλίας. Τα μοντέλα ΜΜ παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το ποιες παράμετροι μπορεί να είναι 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 2.7-3.2cm/sec/% θεωρείται

παθολογικός και αποτελεί βασικό κριτήριο για τη διάγνωση της καρδιακής ανεπάρκειας με διατηρημένο κλάσμα εξώθησης, καθώς υποδηλώνει αυξημένες πιέσεις πλήρωσης της αριστερής κοιλίας.⁴²

Η παρακολούθηση της καρδιακής λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας και σε ασθενείς με κακοήθεια που λαμβάνουν θεραπεία. Η ΤΝ μπορεί να διευκολύνει στον αυτοματοποιημένο υπολογισμό του ΚΕ. Χρησιμοποιώντας μια φορητή συσκευή υπερήχων με δυνατότητα ΤΝ, 115 ασθενείς με καρκίνο εξετάστηκαν από το ογκολογικό προσωπικό για τον υπολογισμό του ΚΕ. Η συσχέτιση μεταξύ του ΚΕ που προήλθε από ΒΜ και αυτού που ελήφθη από τους καρδιολόγους ήταν εξαιρετική, με μικρή υποεκτίμηση του ΚΕ από τη ΤΝ.⁴³

ΤΝ στην εκτίμηση της πρόγνωσης. Υψίστης σημασίας θεωρείται η αξιολόγηση του κινδύνου για εξατομικευμένη διαχείριση των ασθενών με οξύ στεφανιαίο σύνδρομο (ΟΣΣ). Οι Wenzl F., et al.⁴⁴ ανέπτυξαν μία βελτιωμένη βαθμολογία GRACE 3.0 με στόχο να αξιολογήσουν την απόδοσή της, ειδικά ως προς το φύλο, χρησιμοποιώντας ΜΜ σε 420.781 ασθενείς με ΟΣΣ χωρίς ανάσπαση ST (NSTEMI). Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές φύλου, το GRACE 3.0 υποστηριζόμενο από ΤΝ συνέβαλε στην καλύτερη διαστρωμάτωση κινδύνου των ασθενών. Το GRACE 3.0 είναι μεταξύ των πρώτων εργαλείων ΤΝ που έχουν εγκριθεί από διεθνείς οδηγίες.

ΤΝ και καρδιακή ανεπάρκεια. Οι εφαρμογές ΤΝ 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.

Ένα Σύστημα AI-CDSS δύναται να συνδράμει σημαντικά τους κλινικούς ιατρούς –ιδιαίτερα τους μη ειδικούς- στη διάγνωση της νόσου. Σε προοπτική πιλοτική μελέτη 97 ασθενών που προσήλθαν με δύσπνοια στα εξωτερικά ιατρεία (εκ των οποίων το 44% διαγνώστηκε με καρδιακή ανεπάρκεια), το ποσοστό συμφωνίας στη διάγνωση μεταξύ του AI-CDSS και των καρδιολόγων ήταν 98%. Αντίθετα το αντίστοιχο ποσοστό συμφωνίας μεταξύ ειδικών και μη ειδικών ιατρών στην καρδιακή ανεπάρκεια περιορίστηκε στο 76%. Επομένως, το σύστημα AI-CDSS αναδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμο πρωτίστως σε περι-

βάλλον όπου δεν υπάρχουν εξειδικευμένοι ιατροί στην καρδιακή ανεπάρκεια.⁴⁵

Παράλληλα, μέσω της ΤΝ επιτυγχάνεται η αναγνώριση νέων φαινοτύπων σε ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια. 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) αποτελεί ένα καινοτόμο εργαλείο για την ανάλυση μη δομημένων κλινικών πληροφοριών (ιστορικό, εργαστηριακές εξετάσεις, απεικονιστικές εξετάσεις) για διαγνωστικούς και προγνωστικούς σκοπούς. Σε αναδρομική μελέτη σε ένα εξειδικευμένο κέντρο, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο NLP για την ανάλυση των ηλεκτρονικών φακέλων υγείας, με σκοπό τη συλλογή δημογραφικών, κλινικών και υπερηχογραφικών δεδομένων σε ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια. Από ένα δείγμα 3.727 ασθενών με ΚΕ $\geq 50\%$, μόνο το 8,3% είχε λάβει επίσημη διάγνωση καρδιακής ανεπάρκειας από τον κλινικό ιατρό. Το 75% του δείγματος αν και πληρούσε τα διαγνωστικά κριτήρια δεν είχε επίσημη διάγνωση. Δεδομένου ότι όσοι παρέμεναν αδιάγνωστοι είχαν υψηλότερη θνητότητα, η χρήση της NLP επιτρέπει τον αυτόματο εντοπισμό ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια μέσω δεδομένων του ηλεκτρονικού φακέλου και οι οποίοι θα μπορούν να ωφεληθούν συμπληρώνοντας τους υπάρχοντες διαγνωστικούς αλγορίθμους και καθοδηγώντας τους προς εξειδικευμένη κλινική αξιολόγηση.⁴⁶

ΤΝ και βαλβιδοπάθειες. Η βαλβιδική καρδιακή νόσος συχνά διαλάχει της διάγνωσης και ως εκ τούτου υποθεραπεύεται. Η ΤΝ μπορεί να συμβάλλει στην υπερηχοκαρδιογραφική αξιολόγηση και τον φαινοτυπικό προσδιορισμό των ασθενών για τον εντοπισμό ομάδων υψηλού κινδύνου. Η ΤΝ δύναται να βοηθήσει στην απόκτηση υπερηχοκαρδιογραφικών εικόνων και στην αναγνώριση και ερμηνεία των ευρημάτων για αυτοματοποιημένη ανάλυση.³⁸ Οι αναδυόμενες καινοτομίες μπορούν να βελτιώσουν αυτό το μοντέλο παροχής φροντίδας και συμπεριλαμβάνουν τη μη επιβλεπόμενη ΜΜ για την αποκάλυψη νέων φαινοτύπων βαλβιδικής νόσου και την παραγωγική ΤΝ για αυτοματοποιημένη έκθεση. Αυτές οι εξελίξεις ακολουθούνται από τη χρήση της ΤΝ στη ρομποτική διοισοφάγειο και διαθωρακική

ηχοκαρδιογραφία, καθώς και στο συνδυασμό σε πραγματικό χρόνο 3D υπερηχογραφήματος με ακτινοσκόπηση ακτίνων Χ, για την καθοδήγηση των επεμβάσεων στις βαλβίδες.⁴⁷

ΤΝ και αξονική τομογραφία. Η αξονική στεφανιογραφία (CCTA) ενισχυμένη με ΤΝ παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης της υποκλινικής στεφανιαίας νόσου. Το λογισμικό ΤΝ αξιολογεί την ύπαρξη στένωσης στα στεφανιαία αγγεία, καθώς και τη σύνθεση της αθηρωματικής πλάκας, εξάγοντας μια βαθμολογία κινδύνου με ανώτερη προγνωστική ακρίβεια σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Η εφαρμογή της ΤΝ συμβάλλει στην αυτοματοποιημένη εκτίμηση της αβεστοποίησης των στεφανιαίων αρτηριών (Agatston score),⁴⁹ την ανάλυση της αθηρωματικής πλάκας,⁵⁰ την ταξινόμηση της στένωσης βάσει του συστήματος CAD-RADS 2.0,⁵¹ καθώς και την ποσοτικοποίηση του επικαρδιακού λιπώδους ιστού.^{52,53} Στη μελέτη των van Rosendaal et al., η ικανότητα διάκρισης κάποιας παθολογίας ήταν σημαντικά υψηλότερη με την προσέγγιση που βασίζεται στη ΜΜ έναντι των συμβατικών βαθμολογιών CCTA.⁴⁸ Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η ενσωμάτωση των δεδομένων από τη CCTA, μέσω αλγορίθμων ΜΜ, βελτιώνει σημαντικά τη διαστρωμάτωση κινδύνου.

Πέραν της αυτοματοποίησης στην ανάλυση και ερμηνεία εικόνων, η ΜΜ επιτρέπει την εξαγωγή δεδομένων που δεν είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι. Συγκεκριμένα, η εισαγωγή του Δείκτη Εξασθένησης Λίπους (Fat Attenuation Index - FAI), μιας μεθόδου ανάλυσης της αξονικής τομογραφίας βασισμένης στην ΤΝ που ποσοτικοποιεί τις μεταβολές στον περιαγγειακό χώρο, προσέφερε νέα δεδομένα για την εκτίμηση της φλεγμονής στα στεφανιαία αγγεία ασθενών που υποβάλλονται σε CCTA, γεγονός που σχετίζεται με την εκδήλωση μείζονων καρδιαγγειακών συμβαμάτων.^{54,55,56} 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 των ασθενών.⁵⁶

Επιπλέον, η εισαγωγή της τρισδιάστατης ανά-λυσης (3D texture radiomics), γνωστής ως Fat Radiomic Profile (FRP), ενισχύει περαιτέρω τη διαγνωστική ακρίβεια και έχει ανώτερη προγνω-στική αξία έναντι του FAI. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα της μεθόδου να ποσοτικοποιεί την ίνωση σε συνδυασμό με την ανίχνευση της φλεγ-μονής μέσω της εξασθένησης του λίπους.⁶⁰ Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπεται ο προηγμένος χα-ρακτηρισμός των αθηρωματικών πλακών⁶¹ και του περιαγγειακού χώρου,⁶⁰ συμβάλλοντας στον εντοπισμό φλεγμονής που προηγείται των ανα-τομικά ορατών σημείων αθηροσκλήρωσης.

Μια άλλη καθοριστική εφαρμογή της TN στην καρδιαγγειακή απεικόνιση είναι ο αναίμα-κτος υπολογισμός της κλασματικής εφεδρείας ροής (Fractional Flow Reserve, FFR) από την CCTA (Computed Tomography – derived frac-tional Flow Reserve, CT-FFR). Ανάλογα με τη μέ-θοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του FFR, η εξέταση ταξινομείται ως CT-FFR CFD, όπου γίνεται προσομοίωση της φυσικής ροής του αίματος με την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και ως CT-FFR ML, όπου χρησιμοποιείται αλγόριθμος που προ-βλέπει απευθείας τις τιμές FFR βάσει προτύπων, επιτυγχάνοντας έτσι πολύ ταχύτερα αποτελέ-σματα. Μελέτες δείχνουν ότι η δεύτερη προσέγ-γιση προσφέρει παρόμοια διαγνωστική ακρίβεια με την πρώτη, αλλά σε σημαντικά μικρότερο χρόνο επεξεργασίας.⁶²

Η HeartFlow FFR-CT είναι μια μη επεμβατική μέθοδος με TN που χρησιμοποιείται για την αξιο-λόγηση της στεφανιαίας νόσου. Δημιουργεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο από τη CCTA, προσδιορί-ζοντας εάν μια βλάβη περιορίζει αιμοδυναμικά τη ροή του αίματος, με την κλινική της αξία να έχει τεκμηριωθεί μέσω των μελετών NXT και PLAT-FORM.^{63,64} Στην κλινική πράξη, η Siemens Healthineers με τη χρήση αλγορίθμων MM και η HeartFlow με τη χρήση του CFD λειτουργούν συμπληρωματικά για τον υπολογισμό του FFR-CT, με την ονομασία HeartFlow FFR-CT Analy-sis. Επίσης το DeepVessel FFR είναι μία ιατρική συσκευή λογισμικού, εγκεκριμένη από το FDA, που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε αλγορίθμους BM και πραγματοποιεί αυτόνομη, ταχεία, on-site ανά-λυση και αξιολόγηση του FFR-CT.

Το HeartFlow FFR-CT Planner, με δυνατότητα TN, χρησιμοποιεί το CFD και είναι ένα διαδρα-στικό εργαλείο που επιτρέπει στον επεμβατικό

καρδιολόγο να διαμορφώνει στρατηγικές θερα-πείας στεφανιαίας νόσου σε πραγματικό χρόνο προτού ο ασθενής εισέλθει στο αιμοδυναμικό ερ-γαστήριο. Βασιζόμενο στα δεδομένα της CCTA, πραγματοποιεί εικονική προσομοίωση της δια-δερμικής στεφανιαίας παρέμβασης. Μέσω αυτής της ψηφιακής δοκιμής εκτιμάται πώς θα διαμορ-φωθεί ο δείκτης FFR μετά την τοποθέτηση της ενδοπρόθεσης ενδεχομένως τροποποιώντας κλι-νικές αποφάσεις.⁶⁵

TN και μαγνητική τομογραφία καρδιάς. Μέσω αλγορίθμων TN και MM κατά τη διενέργεια μα-γνητικής τομογραφίας καρδιάς, οι όγκοι των καρ-διακών κοιλοτήτων, οι μεταβολές τους και το ΚΕ υπολογίζονται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.^{5,34,66} Τα εργαλεία αυτά, ενσωματωμένα απευθείας στους τομογράφους, διασφαλίζουν μια ταχύτατη και πλήρως τυποποιημένη ανάλυση. Συγκεκρι-μένα, τα μοντέλα BM επιτρέπουν την αυτοματο-ποιημένη κατάτμηση (segmentation) των καρδιακών δομών, περιορίζοντας την ανάγκη πα-ρουσίας ειδικών για την ερμηνεία των απεικονί-σεων.⁶⁷ Η αυτοματοποιημένη εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας και η διάγνωση δομικών παθήσεων - όπως η ύπαρξη ουλής, η ίνωση και η φλεγμονή του μυοκαρδίου- βοηθούν στη λήψη κλινικών αποφάσεων. Παράλληλα, επιτρέπουν έναν πιο προηγμένο φαινοτυπικό προσδιορισμό της ιστολογικής υφής και της σύνθεσης του μυο-καρδίου και του περικαρδίου.⁵ Πρόσφατα δεδο-μένα δείχνουν ότι η εφαρμογή της ραδιομικής (radiomics) για την ανάλυση της υφής του μυο-καρδίου ενισχύει σημαντικά τη διαγνωστική και προγνωστική ακρίβεια, ανοίγοντας νέους ορί-ζοντες στη διάγνωση και τη διαστρωμάτωση κιν-δύνου των ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια.⁶⁸

TN και πυρηνική ιατρική. Η ενσωμάτωση της TN στο πεδίο της πυρηνικής ιατρικής έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές, ελαττώνοντας το χρόνο επεξεργασίας των εικόνων και ενισχύοντας τη διαγνωστική ακρίβεια, ακόμη και τη διαστρωμά-τωση κινδύνου.⁶⁹ Ειδικότερα, η TN αναδιαμορ-φώνει ριζικά το σπινθηρογράφημα αιμάτωσης του μυοκαρδίου, επιλύοντας διαχρονικούς τεχνι-κούς περιορισμούς που σχετίζονται με την αύ-ξηση του θορύβου που παράγεται λόγω μείωσης της δόσης ακτινοβολίας ή του χρόνου σάρωσης. Με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων BM, όπως τα Παραγωγικά Αντιπαραθετικά Δίκτυα

(Generative Adversarial Networks), 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 MM υπερέχει έναντι της συμβατικής οπτικής αξιολόγησης των ελλειμμάτων αιμάτωσης από τον κλινικό ιατρό. Μέσω της συνδυαστικής ανάλυσης απεικονιστικών δεδομένων, ιστορικού και των παραμέτρων της δοκιμασίας κόπωσης, η TN υπολογίζει με υψηλή ακρίβεια το συνολικό έλλειμμα αιμάτωσης. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει κατακόρυφα τη διαγνωστική ευαισθησία για την ανίχνευση της στεφανιαίας νόσου. Παράλληλα, καθιστά δυνατή την πρώιμη αναγνώριση ασθενών με MINOCA προσφέροντας μεγαλύτερη προγνωστική αξία για την αποφυγή μελλοντικών καρδιαγγειακών συμβαμάτων.⁷⁰

TN και στεφανιογραφία. Το Autocath FFR (AI-FFR) είναι ένα αυτοματοποιημένο, μη επεμβατικό λογισμικό που βασίζεται στην TN και λειτουργεί ως σύστημα υποστήριξης κλινικών αποφάσεων για τους επεμβατικούς καρδιολόγους. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του FFR μέσω της ανάλυσης εικόνων.⁷¹ Το AI-FFR έχει εξαιρετική ακρίβεια (90%) στην πρόβλεψη των τιμών του FFR σε σύγκριση με την κλασική μέθοδο. Στη μελέτη VIRTU-4 CCS βρέθηκε ότι η προσθήκη της «εικονικά» υπολογιζόμενης κλασματικής εφεδρείας ροής (vFFR) που βασίζεται σε εικόνες στεφανιογραφίας, 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

Συμπεράσματα

Η TN 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 αλληλουχία του γονιδιώματος, 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. Επίσης, η TN αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στην έρευνα και στην ταχύτερη ανάπτυξη νέων φαρμάκων. Η εφαρμογή των ανωτέρω θα οδηγήσει τελικά σε μια πιο εξατομικευμένη αντιμετώπιση των καρδιαγγειακών παθήσεων. Η παραδοχή ότι ο συνδυασμός ανθρώπινης και τεχνητής νοημοσύνης υπερέχει της ανθρώπινης μονάδας μεμονωμένα είναι θεμελιώδης.

Παράλληλα όμως με τα σημαντικά επιτεύγματα της TN 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 επικύρωση των μοντέλων σε διαφορετικούς πληθυσμούς. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ηθικά διλήμματα που δημιουργούνται σε τομείς όπου η TN υιοθετείται. Στόχος είναι η «συννοημοσύνη», δηλαδή η λειτουργική και γόνιμη συμβίωση με τις μηχανές, που υπόσχεται να επαναπροσδιορίσει τα όρια της πρόληψης, της διάγνωσης και της θεραπευτικής στην καρδιολογία.

Βιβλιογραφία

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 Th., 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 Z. 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):ztg003.
13. Arjoun 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., ElMedany 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:Europe*, 2026
26. Kagiya 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. Bhawe 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, Matsumoto T., 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 Ventricular 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., Montesidou 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 Rosendaal 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 Car-

- diovascular 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. Antoniadou 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. Antoniadou 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, Leipsic J, 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, Bhuvana 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.
 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 reserve 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.