

## Η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης στην υπερηχοκαρδιογραφία

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΧΡΥΣΟΣ, ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΑΤΡΑΝΗΣ,  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΝΙΚΗΤΑΣ

Καρδιολογικό Τμήμα,  
Παναρκαδικό Γενικό Νοσοκομείο Τρίπολης

---

### Λέξεις ευρετηρίου

Τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση, υπερηχοκαρδιογραφία

---

### Επικοινωνία

Δημήτριος Χρυσός

Ματρόζου 12 – Κουκάκι, Τ.Κ. 117-41  
E-mail: dimchrissos@yahoo.gr

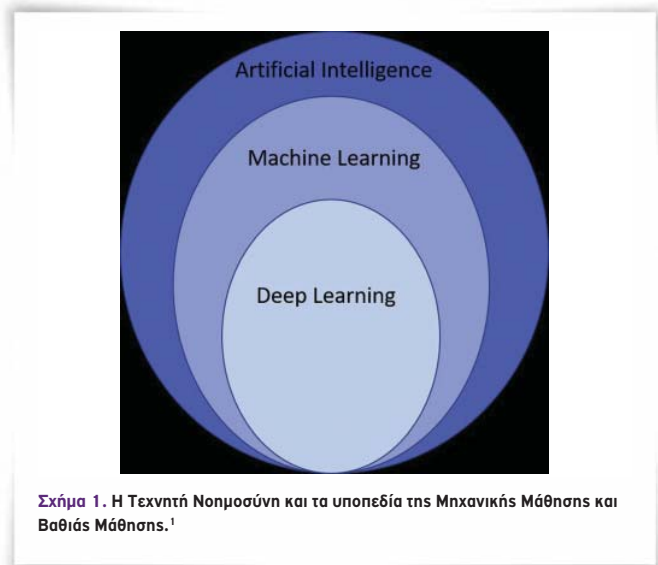
**Η**ερμηνεία των υπερηχοκαρδιογραφημάτων παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από την υποκειμενική εμπειρία του χειριστή. Η ύπαρξη μεταβλητότητας και η διαφορά στην εμπειρία μεταξύ των χειριστών έχει σαν αποτέλεσμα εσφαλμένες διαγνώσεις. Η τεχνολογία της Τεχνητής Νοημοσύνης παρέχει νέες δυνατότητες στην υπερηχοκαρδιογραφία ώστε να παρέχει με ακρίβεια, συνέπεια (σταθερότητα) και αυτοματοποιημένα την ερμηνεία των υπερηχοκαρδιογραφημάτων, μειώνοντας έτσι δυννητικά τον κίνδυνο ανθρώπινου σφάλματος.

### Εισαγωγή

Η υπερηχοκαρδιογραφία παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάγνωση και διαχείριση ασθενών με καρδιαγγειακές παθήσεις. Δεδομένου ότι η υπερηχοκαρδιογραφία είναι η κατεξοχήν μέθοδος απεικόνισης της καρδιάς που επιτρέπει την άμεση σε πραγματικό χρόνο ανίχνευση διαφόρων ανωμαλιών, η ακριβής ποσοτική αξιολόγηση της καρδιακής δομής και λειτουργίας είναι απαραίτητη για την κλινική διάγνωση και για την καθοδήγηση των καταλληλότερων θεραπειών. Ωστόσο, παρά την πληθώρα κατευθυντήριων οδηγιών για την ερμηνεία και την αξιολόγηση των υπερηχοκαρδιογραφημάτων, η ποσοτικοποίηση και η διάγνωση βάσει υποκειμενικού υπολογισμού με τη χρήση της 2D υπερηχοκαρδιογραφίας παραμένει ατελής και επιρρεπής σε σφάλματα. Υπάρχει επίσης ένα μακροχρόνιο ζήτημα σχετικά με την ασυμφωνία των εξεταστών καθώς και με το υψηλό επίπεδο μεταβλητότητας (διακύμανσης) που παρατηρείται μεταξύ του ίδιου ή διαφορετικών παρατηρητών στην ερμηνεία των υπερηχοκαρδιογραφημάτων, ειδικά μεταξύ εκείνων με εικόνες κακής ποιότητας.<sup>1,2</sup>

## Γενικά περί Τεχνητής Νοημοσύνης

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ), μια νέα τεχνολογία, γίνεται με γρήγορους ρυθμούς αισθητή στον κόσμο της ιατρικής. Ήδη πολλές εταιρείες και ερευνητές έχουν επενδύσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας και των εργαλείων της (μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση, αλγόριθμοι, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα – ΤΝΔ). Η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ, Artificial Intelligence-AI) είναι κλάδος της πληροφορικής επιστήμης, που ασχολείται με τη σχεδίαση και την κατασκευή ευφυών (νοημόνων) υπολογιστικών συστημάτων, που μπορούν να μιμηθούν τις νοητικές λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου, όπως επίλυση προβλημάτων, μάθηση, κατανόηση από συμφοραζόμενα, προσαρμοστικότητα, εξαγωγή συμπερασμάτων.<sup>3</sup> Η ΤΝ διακρίνεται σε Ασθενή ή Περιορισμένη (Weak or Narrow Intelligence), αυτή που υπάρχει σήμερα, και σε Ισχυρή ή Τεχνητή Γενική Νοημοσύνη (Strong or Artificial General Intelligence, AGI), που θα διαθέτει στοιχεία ανθρώπινης νοημοσύνης και κοινής λογικής (αναμένεται μετά από 60-70 χρόνια).<sup>3</sup> Η ΤΝ, σε γενικές γραμμές, περιλαμβάνει συστήματα που επιτρέπουν στους υπολογιστές ή τις μηχανές να εκτελούν ή να μιμούνται την ανθρώπινη σκέψη. Εφαρμοζόμενη στην καρδιακή απεικόνιση, η ΤΝ επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση και κατάτμηση (τμηματοποίηση) των καρδιακών δομών, πραγματοποιεί την ποσοτικοποίηση των καρδιακών κοιλοτήτων και τον υπολογισμό της λειτουργίας αυτών χρησιμοποιώντας προκαθορισμένους κανόνες, αλγόριθμους ή οδηγίες. Επιπλέον, η ΤΝ μπορεί να βελτιώσει την επιλογή (διαλογή) του ασθενούς, την απόκτηση εικόνας και την ανακατασκευή της καθώς και την αναγνώριση των τεχνημάτων (σφαλμάτων – artifacts). Στο εγγύς μέλλον, η ΤΝ εφαρμοσμένη στην καρδιακή απεικόνιση πιθανότατα θα επιτρέψει την αυτοματοποιημένη διάγνωση διαφόρων παθολογικών καταστάσεων (ασθενειών). Η Ασθενής ή Περιορισμένη ΤΝ εμπεριέχει την Μηχανική Μάθηση (Machine Learning, ML) και τη Βαθιά Μάθηση (Deep Learning, DL) (Σχήμα 1).<sup>1,4</sup> Η Μηχανική Μάθηση, ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, πηγάζει ένα βήμα παραπέρα ενώ ο κοινός υπολογιστής έχει τη δυνατότητα να απαντήσει σε συγκεκριμένα ερωτήματα, κατόπι



Σχήμα 1. Η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα υποπεδία της Μηχανικής Μάθησης και Βαθιάς Μάθησης.<sup>1</sup>

προγραμματισμού για κάθε αναζήτηση και να ολοκληρώσει μια εργασία, η Μηχανική Μάθηση επιτρέπει στον αλγόριθμο του υπολογιστή να βελτιώνει συνεχώς τις ερμηνείες του με την έκθεσή του σε περισσότερα επισημασμένα ή γνωστά δεδομένα.<sup>1,4</sup> Με απλά λόγια, η μηχανή λύνοντας προβλήματα, συγχρόνως "μαθαίνει" και γίνεται καλύτερη με την πάροδο του χρόνου χωρίς να χρειάζεται να προγραμματίζεται ρητά από τον άνθρωπο.<sup>1,4</sup> Η Μηχανική Μάθηση διακρίνεται σε εποπτευόμενη, μη εποπτευόμενη και σε ενισχυμένη, ένα υβρίδιο αυτών, ανάλογα με το πόσο παρεμβαίνει ο άνθρωπος για την επίτευξη του επιδιωκόμενου σκοπού.<sup>5-9</sup> Συγκεκριμένα, στην ενισχυμένη μάθηση τα λειτουργικά μέρη του λογισμικού εκτελούν ενέργειες σε ένα περιβάλλον προσπαθώντας να ανακαλύψουν εκείνες με τις οποίες θα επιτύχουν τη μέγιστη σωρευτική ανταμοιβή (απόδοση), μαθαίνοντας από τη δοκιμή και το λάθος (μεγιστοποίηση της ακρίβειας -τελειοποίηση- των αλγορίθμων με τη χρήση δοκιμών και σφαλμάτων).<sup>1,10,11</sup> Η Βαθιά Μάθηση είναι ένα υποσύνολο της μηχανικής μάθησης προχωράει περαιτέρω στην ανάλυση δεδομένων. Τα μοντέλα Βαθιάς Μάθησης χρησιμοποιούν ΤΝΔ, που μιμούνται τους ανθρώπινους βιολογικούς νευρώνες, για την ερμηνεία δεδομένων. Σε αντίθεση με τους αλγόριθμους της Μηχανικής Μάθησης, η Βαθιά Μάθηση επιτρέπει την ερμηνεία μη επισημασμένων -χωρίς ετικέτα- δεδομένων και την

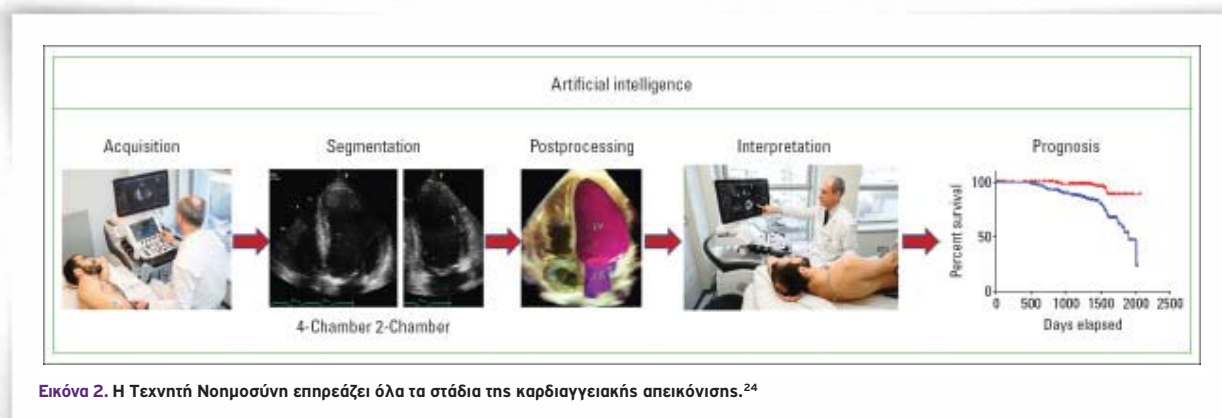
αυτοκατευθυνόμενη ανάλυση χωρίς την ανάγκη για συνεχή ανθρώπινη παρουσία και ανθρώπινο προγραμματισμό.<sup>1</sup> Η Βαθιά Μάθηση μιμείται τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, χρησιμοποιώντας πολλαπλά στρώματα (στιβάδες) τεχνητών νευρωνικών δικτύων, που μπορούν μετά την είσοδο δεδομένων να παράγουν, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, αυτοματοποιημένες προβλέψεις και αποκωδικοποιώντας ακατέργαστα δεδομένα να δημιουργήσουν νέα χαρακτηριστικά υψηλότερου επιπέδου.<sup>1,3</sup>

## Τεχνητή Νοημοσύνη και Υπερηχοκαρδιογραφία

Αρχικά οι αλγόριθμοι της ΤΝ έχουν εφαρμοστεί σε στατικές εικόνες στην ακτινολογία. Οι τεχνικές της υπολογιστικής όρασης (*Computer vision*) και της εξόρυξης δεδομένων (*Data mining*), που έχουν αναπτυχθεί τελευταία, χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης ασχολούνται με την εξαγωγή πολλών ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών από μία δεδομένη περιοχή ενδιαφέροντος μιας απεικόνισης.<sup>12,13</sup> Αυτές οι τεχνικές (*radiomics*) έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ανίχνευση ύποπτων βλαβών για καρκίνο του μαστού σε μαστογραφίες και σε ακτινογραφίες θώρακα για φυματώση και καρκίνο του πνεύμονα.<sup>14-16</sup> Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται πλέον και στην υπερηχοκαρδιογραφία. Η αύξηση των δεδομένων απεικόνισης και η δυνατότητα εντοπισμού ευρημάτων, που δε μπορεί να ανιχνεύσει ο άνθρωπος, *καθιστά την ιατρική απεικόνιση (στη συγκεκριμένη περίπτωση την υπερηχοκαρδιογραφία) από μια υποκειμενική αντιληπτική ικανότητα σε μια πιο αντικειμενική επιστήμη.*<sup>1,12,13</sup> Η δυναμική φύση της απεικόνισης της καρδιάς (ιδιαίτερα η εικόνα *ciné*) είναι μια ιδιαίτερη πρόκληση για την ΤΝ σε σύγκριση με την ανάλυση στατικών εικόνων. Το λογισμικό που βασίζεται σε ΤΝ και που βοηθά στις μετρήσεις εικόνας είναι πλέον διαθέσιμο στο εμπόριο για την υπερηχοκαρδιογραφία, την απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού καρδιάς, την υπολογιστική τομογραφία καρδιάς και την πυρηνική καρδιολογία. Καθώς ο αριθμός των ασθενών με καρδιαγγειακές παθήσεις παρουσιάζει συνεχή αύξηση λόγω της αύξησης του προσδόκιμου επιβίωσης, της αυ-

ξανόμενης πολυπλοκότητας των ασθενών με καρδιαγγειακές παθήσεις και των συν-νοσηροτήτων, είναι επόμενο ο αριθμός των υπερηχοκαρδιογραφικών μελετών να σημειώσει παράλληλη σημαντική αύξηση. Η προβλεπόμενη αναντιστοιχία προσφοράς-ζήτησης μεταξύ του αυξανόμενου όγκου των ασθενών, που χρειάζονται υπερηχοκαρδιογραφική μελέτη, και του αριθμού των καρδιολόγων που είναι διαθέσιμοι για την εκτέλεση και ερμηνεία των μελετών μπορεί ενδεχομένως να αντιμετωπιστεί από την ΤΝ.<sup>17,18</sup>

Πράγματι, η ικανότητα ενός προγράμματος να εκτελεί αυτόματα μετρήσεις κοιλοτήτων δισδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) υπερηχοκαρδιογραφημάτων και να υπολογίζει επίσης αυτόματα τη λειτουργία αυτών (όγκοι, ΚΕ, strain) είναι πλέον πραγματικότητα.<sup>4,19-23</sup> Στο μέλλον, αυτό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αποδοτικότητα της υπερηχοκαρδιογραφίας. Λόγω της ευμετάβλητης ποιότητας εικόνας, της άλλοτε άλλης εμπειρίας του υπερηχοκαρδιολόγου και της πρόκλησης της ανίχνευσης των ορίων των καρδιακών κοιλοτήτων, υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα με τη χειροκίνητη μέθοδο ποσοτικού υπολογισμού των υπερηχοκαρδιογραφικών παραμέτρων. Η χρήση της ΤΝ φέρνει την ελπίδα της μείωσης της μεταβλητότητας τόσο μεταξύ των εξεταζόντων υπερηχο(καρδιο)γραφιστών, όσο και μεταξύ του ίδιου του εξεταζόμενου και της βελτίωσης της ακρίβειας. Η νέα σειρά μηχανημάτων καρδιαγγειακής απεικόνισης έχει ενσωματωμένη τεχνολογία ΤΝ, η οποία έχει επίδραση σε όλα τα στάδια της καρδιακής απεικόνισης (επιλογή της κατάλληλης διαγνωστικής μεθόδου, κατάτμηση και ανακατασκευή εικόνας, επεξεργασία δεδομένων, διάγνωση και εντόπιση σχετικών προγνωστικών πληροφοριών από την καρδιακή απεικόνιση) (Σχήμα 2).<sup>2,19,20,24</sup> Η ενσωμάτωση αλγόριθμου ΤΝ (“εκπαιδευμένος” ταξινομητής με δεδομένα από την υπερηχοκαρδιογραφική παρακολούθηση ηχητικής κηλίδας - speckle tracking echocardiography) επιπρόσθετα σε τέσσερις υπερηχοκαρδιογραφικές παραμέτρους βελτιώνει τη διαγνωστική ακρίβεια στη διάκριση ασθενειών, όπως μεταξύ συμπιεστικής περικαρδίτιδας και περιοριστικής μυοκαρδιοπάθειας [Επιφάνεια Κάτω από την Καμπύλη -Area Under Curve (AUC)-0.962] συγκριτικά με αυτήν που παρατηρείται χωρίς τη χρήση ΤΝ (AUC 0.942).<sup>19,25</sup>



Η ενσωμάτωση λογισμικού ΤΝ στην νέα σειρά μηχανημάτων υπερήχων έχει δώσει τη δυνατότητα σε πολλούς ερευνητές σε πρόσφατες εργασίες τους να καταδείξουν ότι μπορούν να εκτελούν με επιτυχία αυτοματοποιημένη υπερηχοκαρδιογραφική αναγνώριση και ερμηνεία κοινών δισδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) δομών, την ανίχνευση τοπικών διαταραχών της κινητικότητας των τοιχωμάτων, την αυτοματοποιημένη μέτρηση των διαφόρων παραμέτρων και εκτίμηση της καρδιακής λειτουργίας (όγκοι, ΚΕ), καθώς και την αυτοματοποιημένη διάγνωση διαφόρων ασθενειών.<sup>21-31</sup> Η χρήση της νέας τεχνολογίας με ανάλυση υπερηχοκαρδιογραφικών δεδομένων προβλέπει με αρκετή ακρίβεια (διαγνωστική ακρίβεια) την ενδονοσοκομειακή θνητότητα ασθενών που εισήχθησαν με καρδιακή νόσο (συνολικά: AUC 0.90, έμφραγμα μυοκαρδίου: AUC 0.96, καρδιακή ανεπάρκεια: AUC 0.91)<sup>32</sup>, ενώ με την χρήση κλινικών και υπερηχοκαρδιογραφικών δεδομένων ασθενών προβλέπει την θνητότητα το πρώτο και το πέμπτο έτος (1ο AUC 0.85 και 5ο AUC 0.89 αντίστοιχα).<sup>33</sup> (Πίνακας 1).

Οι πρώτες αναφορές για τη χρήση της ΤΝ στην υπερηχοκαρδιογραφική ερμηνεία της ΤΝ έχουν επικεντρωθεί στην 2D υπερηχοκαρδιογραφία. Σε μια απλή ροή εργασίας, ένα πλήρες διαθωρακικό υπερηχοκαρδιογράφημα σε μορφή αρχείου DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine – Ψηφιακή Απεικόνιση και Επικοινωνίες στην Ιατρική) φορτώνεται σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή που βασίζεται σε ΤΝ και σε λιγότερο από 1 λεπτό, ο υπολογιστής μπορεί να αναγνωρίσει τις υπερηχοκαρδιογραφικές προβολές και

**Πίνακας 1.**

**Πρόσφατες ερευνητικές εργασίες στην υπερηχοκαρδιογραφία με την χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης**

Zhang <sup>21</sup>	2018	Αναγνώριση (ταυτοποίηση) 23 λήψεων. Ακρίβεια ταξινόμησης λήψεων 84%
Sengupta <sup>25</sup>	2016	Διαφορική διάγνωση Συμπίεστικής Περικαρδίτιδας από Περιοριστική Μυοκαρδιοπάθεια
Kusunose <sup>26</sup>	2020	Διαταραχές κινητικότητας AUC 0.90-0.97
Behnami <sup>31</sup>	2019	Μέσο απόλυτο λάθος 4.5% για το ΚΕΑΚ σε σύγκριση με αυτό της μεθόδου Simpson (διεπίπεδο)
Kwon <sup>32</sup>	2019	Πρόγνωση ΕΝ θνητότητας AUC 0.90
Samad <sup>33</sup>	2019	Επιβίωση: 1ο έτος AUC:0.85, 5ο έτος AUC: 0.89
Medvedofsky <sup>41</sup>	2018	Τρισδιάστατος υπερηχοκαρδιογραφικός ποσοτικός προσδιορισμός των αριστερών καρδιακών κοιλοτήτων

**Πίνακας 1.** Πρόσφατα παραδείγματα εφαρμογής Τεχνητής Νοημοσύνης σε ερευνητικές εργασίες στην υπερηχοκαρδιογραφία.

**ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ:**

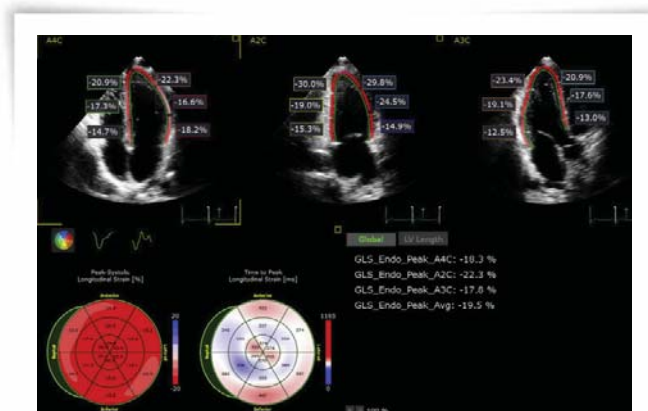
**ΚΕΑΚ:** Κλάσμα Εξώθησης Αριστερής Κοιλίας

**ΕΘ:** Ενδονοσοκομειακή Θνητότητα

**AUC:** Επιφάνεια κάτω από την καμπύλη

να μετρήσει αυτόματα μια ποικιλία 2D παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τις διαστάσεις της αριστεράς κοιλίας (ΑΚ, LV), το πάχος των τοιχωμάτων, τους τελοδιαστολικούς/τελοσυστολικούς όγκους για τον προσδιο-

ρισμό του κλάσματος εξώθησης της αριστερής κοιλίας (ΚΕΑΚ, LVEF), την παραμόρφωση των κοιλιών (strain) και τους όγκους των κόλπων. Επιπλέον, η αυτόματη ανίχνευση παραμέτρων Doppler (E, A, e', a', ταχύτητα ανεπάρκειας τριγλώχινας-πνευμονικής) σε συνδυασμό με τους όγκους των κόλπων και το ΚΕΑΚ (LVEF) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της διαστολικής λειτουργίας. Επιπλέον, άλλοι ερευνητές έχουν δείξει ότι οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε TN μπορούν να αξιολογήσουν αυτόματα τη σοβαρότητα της στένωσης της αορτικής βαλβίδας είτε αξιολογώντας εικόνες της αορτικής βαλβίδας είτε χρησιμοποιώντας ποσοτικές παραμέτρους. Στο μέλλον, είναι πιθανό ότι πρώτου ο καρδιολόγος πριν ακόμα ο καρδιολόγος ανοίξει ένα υπερηχοκαρδιογράφημα, η συντριπτική πλειονότητα του ποσοτικού προσδιορισμού θα έχει ήδη πραγματοποιηθεί αυτόματα.<sup>2</sup> Επιπλέον, η αυτοματοποιημένη ανίχνευση και ο υπολογισμός της συνολικής επιμήκους παραμόρφωσης (Global Longitudinal Strain-GLS) και της τμηματικής παραμόρφωσης της αριστερής κοιλίας είναι ήδη πραγματικότητα (Σχήμα 3).<sup>1</sup> Η παραμόρφωση (strain) αποτελεί βασικό δείκτη για την παρακολούθηση υποκλινικών μεταβολών της λειτουργίας της αριστερής κοιλίας. Ενώ έχει γίνει αρκετή συζήτηση και έρευνα σχετικά με τις πτυχές της μέτρησης του strain, αυτό παραμένει ένας πολύτιμος δείκτης λόγω της ευαισθησίας του στη μέτρηση των πρώιμων αλλαγών στη λειτουργία του μυοκαρδίου και της μεγαλύτερης αναπαραγωγιμότητάς του συγκριτικά από το κλάσμα εξώθησης της ΑΚ (LV). Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας και της ενσωμάτωσης του strain ως διαγνωστικού εργαλείου ανήκει στον πληθυσμό των καρδιο-ογκολογικών ασθενών. Με την εφαρμογή ενός συνόλου αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στην υπερηχοκαρδιογραφία παρακολούθησης ηχητικής κηλίδας (speckle tracking echocardiography) η επιμήκης παραμόρφωση (strain) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στη διαφορική διάγνωση μεταξύ της υπερτροφικής μυοκαρδιοπάθειας και της αθλητικής καρδιάς, όπου διαπιστώθηκε ότι η τμηματική επιμήκης παραμόρφωση στη μεσότητα της αριστερής κοιλίας και ο όγκος της αριστερής κοιλίας είναι οι καλύτερες παράμετροι για να γίνει ο διαχωρισμός των δύο αυτών οντοτήτων.<sup>30</sup>



**Σχήμα 3.** Αυτόματη ανίχνευση περιγράμματος και ανάλυση τμηματικής και συνολικής επιμήκους παραμόρφωσης της αριστερής κοιλίας (Longitudinal Strain-LS-) από τις τρεις κορυφαίες προβολές με λογισμικό Τεχνητής Νοημοσύνης.<sup>1</sup>

Επίσης, η αυτόματη κατάτμηση της αριστερής και της δεξιάς κοιλίας παρουσιάζει ενδιαφέρον και έχει σαν στόχο την επίτευξη αυτοματοποιημένων μετρήσεων του κλάσματος εξώθησης. Έχει αποδειχθεί η σκοπιμότητα της κατάτμησης της αριστερής κοιλίας από μηχανήματα υπερήχων με ενσωματωμένο μοντέλο TN, που ήταν “εκπαιδευμένο” με μικρό αριθμό των εικόνων “εκπαίδευσης”. Η ακρίβεια της κατάτμησης αυξήθηκε, όταν αυξήθηκε ο αριθμός των εκπαιδευτικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της TN ότι η αύξηση του όγκου των εισερχομένων δεδομένων θα βελτιώσει συνήθως την απόδοση του μοντέλου.<sup>1,2,19,24</sup>

Η τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία είναι μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην καρδιακή απεικόνιση. Η εφαρμογή της TN στην τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία είναι πολλά υποσχόμενη. Οι όγκοι των αριστερών και δεξιών καρδιακών κοιλοτήτων που προέρχονται από την τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία έχουν αποδειχθεί ότι συσχετίζονται καλύτερα με το πρότυπο αναφοράς της απεικόνισης καρδιακού μαγνητικού συντονισμού σε σύγκριση με τους όγκους που λαμβάνονται από τις 2D εκτιμήσεις.<sup>34,35</sup> Οι κατευθυντήριες γραμμές της Αμερικανικής Εταιρείας Υπερηχοκαρδιογραφίας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης Καρδιοαγγειακής Απεικόνισης συνιστούν τη χρήση τρισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας για αυτές τις μετρή-

Παρά τη σύσταση αυτή, η τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία δεν έχει υιοθετηθεί πλήρως στην κλινική πρακτική, επειδή απαιτεί ειδική εκπαίδευση και εξειδίκευση.<sup>2</sup> Η πρόσφατη ανάπτυξη αλγορίθμων μηχανικής μάθησης είχε ως αποτέλεσμα την αυτοματοποιημένη μέτρηση του όγκου της αριστερής κοιλίας ΑΚ (LV) και του αριστερού κόλπου όχι μόνο στις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές τους, αλλά και δυναμικά καθ' όλη τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου.<sup>38-41</sup>

Περαιτέρω βελτιώσεις σε αυτόν τον αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης επέτρεψαν επίσης πρόσφατα τον προσδιορισμό των όγκων της δεξιάς κοιλίας. Αυτή η τεχνική μηχανικής εκμάθησης χρειάζεται διαρκεί περίπου 1 λεπτό κατά μέσο όρο για να παρέχει πλήρως αυτοματοποιημένη ανάλυση απαιτώντας μόνο λίγη χειροκίνητη επεξεργασία των ενδοκαρδιακών ορίων.<sup>19</sup> Παράλληλα εκτιμάται το ΚΕ της αριστερής και της δεξιάς κοιλίας καθώς και η επιμήκης παραμόρφωση (strain) αυτών (συνολική και τμηματική). Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ΤΝ για την εκτίμηση του ΚΕ και του strain εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με τον οπτικό προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών από τους ειδικούς.<sup>19,23</sup> Επίσης ο Madani και συν. έδειξαν ότι ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης (DL) επιτυγχάνει μια παρόμοια απόδοση σε ό,τι αφορά την ταξινόμηση της κάθε απεικονιστικής λήψης με εκείνη ενός πιστοποιημένου υπερηχοκαρδιογραφιστή.<sup>19,22</sup> Ένα λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να αναλύσει δύο κορυφαίες υπερηχοκαρδιογραφικές λήψεις και να παραγάγει μια ακριβή τιμή του κλάσματος εξώθησης (ΚΕ, EF) χωρίς να σχεδιάζει περιγράμματα και να εκτιμά τους κοιλιακούς όγκους. Αυτό το επιτυγχάνει επειδή το πρόγραμμα «εκπαιδεύτηκε» σε χιλιάδες εικόνες με γνωστά ΚΕ (EF), ώστε να είναι σε θέση να παράγει μια τιμή ΚΕ (EF) που είναι τόσο ακριβής όσο αυτή ενός ειδικού καρδιολόγου με εμπειρία > 20 ετών.<sup>9</sup>

Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην τρισδιάστατη (3D) υπερηχοκαρδιογραφία μπορεί να είναι ένα ορόσημο για την υπερηχοκαρδιογραφία, καθώς όλο και περισσότεροι καρδιολόγοι ενσωματώνουν αυτήν τη σημαντική τεχνολογία στα επιβαρυνόμενα με κλινικά περιστατικά εργαστήριά τους.<sup>2</sup> Η 3D υπερηχοκαρδιογραφία με λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης παρέχει δυναμική γεωμετρική ανάλυση των βαλ-

βίδων (μιτροειδούς και αορτής), ενώ με νεότερο λογισμικό κάνει ανάλυση και της τριγλώχινας βαλβίδας, που έχει υψηλή συσχέτιση με την χειρουργική επισκόπηση.<sup>42</sup>

Εκτός από την αυτοματοποιημένη ποσοτικοποίηση των 2D και 3D ηχοκαρδιογραφημάτων, η ΤΝ έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο που διαβάζουμε τα υπερηχοκαρδιογραφήματα. Οι τυπικές (καθιερωμένες) λήψεις υπερηχοκαρδιογραφικών εικόνων από υπερηχοκαρδιολόγους, ξεκινούν από τις παραστερνικές τομές, ακολουθούν οι κορυφαίες και τελικά οι υποξιοειδικές τομές. Προς το παρόν, ο μελετητής πρέπει να ενσωματώσει τις καταγραφές από πολλαπλές μη διαδοχικά αποκτηθείσες λήψεις για να καταλήξει σε συμπέρασμα ή διάγνωση. Για παράδειγμα, για να προσδιοριστεί ο βαθμός της στένωσης της αορτικής βαλβίδας με την εξίσωση συνεχείας, η διάμετρος του χώρου εξώθησης της ΑΚ (παραστερνικός μακρύς άξονας) πρέπει να ενσωματωθεί με τις καταγραφές του σήματος Doppler από το χώρο εξώθησης της ΑΚ και από τη βαλβίδα της αορτής (κορυφαίες λήψεις των 3 και 5 κοιλοτήτων και περιστασιακά από τις υπερστερνικές λήψεις), ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται το ΚΕΑΚ (λήψη 2 και 4 κοιλοτήτων για την απόκτηση ενός δισδιάστατου ΚΕ και μόνο μία 4 κοιλοτήτων λήψη στο 3D υπερηχογράφημα). Οι συνεχιζόμενες εξελίξεις στην ΤΝ επιτρέπουν πλέον την αυτόματη ταξινόμηση κάθε εικόνας καταγραφής εντός ενός συνόλου δεδομένων DICOM. Έτσι, όταν κάποιος επιθυμεί να κάνει αξιολόγηση της περιοχής της αορτικής βαλβίδας, όλες οι σχετικές εικόνες από το σύνολο της μελέτης θα εμφανίζονται συγκεντρωμένες, είτε αποτελούν διαδοχικές λήψεις, είτε έχουν χρονική διαφορά η μία από την άλλη. Το ίδιο ισχύει για τις παραμέτρους του ΚΕΑΚ, της διαστολικής λειτουργίας ή της βαλβιδικής παθολογίας (παλινδρόμησης ή στένωσης). Η βασική αρχή αυτής της εξέλιξης βασίζεται στην ικανότητα του υπολογιστή να αναγνωρίζει κάθε καταγεγραμμένη εικόνα και να κατηγοριοποιεί τις εικόνες σύμφωνα με την κλινική χρησιμότητα. Επίσης υπάρχει ήδη στο λογισμικό η αυτόματη εκτίμηση της ροής στο χώρο εξώθησης της αριστερής κοιλίας (ΧΕΑΚ) και την αορτική βαλβίδα [μέγιστη, μέση τιμή, ολοκλήρωμα ταχύτητας-χρόνου (VTI)] με την εξέταση Doppler. Στο άμεσο

μέλλον, θα είμαστε σε θέση να διαβάσουμε ηχοκαρδιογραφήματα σύμφωνα με την συγκεκριμένη κοιλότητα ή βαλβίδα που αξιολογείται αντί της ακολουθίας με την οποία αποκτήθηκαν οι εικόνες.<sup>2</sup>

Επίσης, η ΤΝ μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της εργασιακής ροής και της αποδοτικότητας του εργαστηρίου υπερηχοκαρδιογραφίας. Αναλύοντας αυτόματα τις βασικές παραμέτρους, τα μελλοντικά προγράμματα θα μας επιτρέψουν να κάνουμε “διαλογή” μιας λίστας μη αναγνωσμένων υπερηχοκαρδιογραφημάτων με την πιθανότητα να είναι φυσιολογικά ή να έχουν παθολογικά ευρήματα. Κατά συνέπεια, ο εξετάζων θα είναι σε θέση να δώσει προτεραιότητα στην ερμηνεία των μη φυσιολογικών μελετών, αφήνοντας τις φυσιολογικές μελέτες για αργότερα μέσα στην ημέρα.<sup>2</sup> Ομοίως, η ικανότητα των προγραμμάτων ΤΝ να ανιχνεύουν ακόμη και παθολογικές καταστάσεις (όπως υπερτροφική μυοκαρδιοπάθεια, αμυλοείδωση ή πνευμονική υπέρταση), όταν οι μελέτες πληρούν συγκεκριμένα υπερηχοκαρδιογραφικά κριτήρια, είναι επίσης πολλά υποσχόμενη.<sup>21</sup>

Ένας άλλος τομέας όπου η τεχνητή νοημοσύνη έχει θετικό αντίκτυπο στην υπερηχοκαρδιογραφία είναι η ίδια η διαδικασία καταγραφής της εικόνας. Χρησιμοποιώντας μια τεχνολογία Βαθιάς Μάθησης, νέα προγράμματα λογισμικού συνδυάζουν την αξιολόγηση ποιότητας εικόνας σε πραγματικό χρόνο με προσαρμοστική ανατομική καθοδήγηση που επιτρέπει σε άτομα με περιορισμένη κατάρτιση στην υπερηχοκαρδιογραφία να καταγράψουν πρότυπες εικόνες υπερηχοκαρδιογραφίας. Συγκεκριμένα το λογισμικό βαθιάς μάθησης καθοδηγεί τον χρήστη αναγνωρίζοντας εσφαλμένες ή εκτός άξονα προβολές και παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο μετακίνησης του ηχοβολέα για τη λήψη διαγνωστικών εικόνων σε πραγματικό χρόνο και μόλις οι εικόνες θεωρηθούν διαγνωστικές από το λογισμικό, αποκτούνται αυτόματα.<sup>1,2</sup> Αυτή η καινοτομία στην εφαρμογή της ΤΝ μπορεί να διευκολύνει την πρόσβαση σε υπερηχοκαρδιογραφήματα σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένους πόρους, όταν προκύπτουν κλινικές καταστάσεις, όπου απαιτείται άμεση εξέταση της καρδιακής δομής και λειτουργίας. Πρόσφατα εισήχθη στο λογισμικό των φορητών μηχανημάτων



Σχήμα 4. Φορητό μηχάνημα υπερήχων με ενσωματωμένο αλγόριθμο ΤΝ επιτυγχάνει αυτοματοποιημένη προβολή της λήψης και αυτοματοποιημένο υπολογισμό των όγκων και του ΚΕ της αριστερής κοιλίας.<sup>1,43,45</sup>

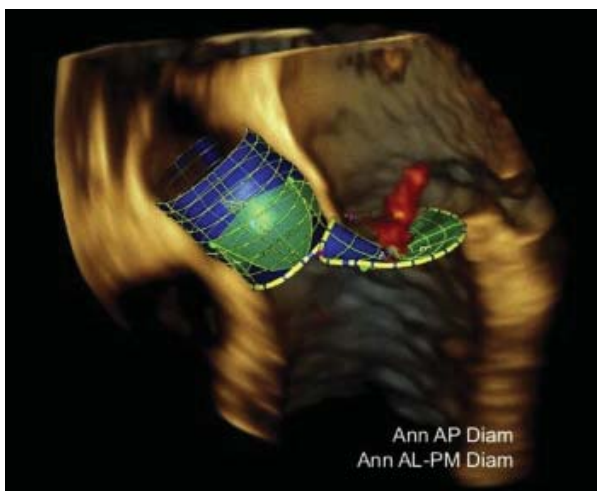
υπερήχων η φορητή υπερηχοκαρδιογραφική ανάλυση που επιτρέπει την αυτοματοποιημένη ανάλυση των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της καταγραφής τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις (π.χ. ασθενείς με COVID-19, επείγοντα καρδιολογικά περιστατικά, Τ.Ε.Π.) γίνεται αυτοματοποιημένη προβολή της λήψης και α αυτοματοποιημένος υπολογισμός κλάσματος εξώθησης με φορητό μηχάνημα υπερήχων, που φέρει ειδικό λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης, στο σημείο φροντίδας του ασθενούς (POCUS-Point of Care Ultrasound) (Σχήμα 4).<sup>1,19,43-45</sup> Οι μελέτες που έχουν γίνει έχουν δείξει ότι η προπτυχιακή εκπαίδευση είναι ένα κατάλληλο πεδίο για την εισαγωγή βασικών εννοιών POCUS.<sup>43</sup> Σε ιατρικές σχολές έχουν αρχίσει να περιλαμβάνουν στα προγράμματα σπουδών, ακόμη και για φοιτητές του πρώτου έτους, φορητά μηχανήματα υπερήχων με ενσωματωμένο αλγόριθμο ΤΝ για την εκτέλεση υπερηχογραφήματος σε σημείο φροντίδας (POCUS), προκειμένου να διδάξουν καλύτερα την ανατομία και να επιταχύνουν την καμπύλη μάθησης για αυτούς τους φοιτητές ιατρικής.<sup>43</sup>

Η χρήση τηλεχειριζόμενης υπερηχοκαρδιογραφίας με χρήση ρομποτικού βραχίονα και με σύνδεση στο διαδίκτυο έχει δοκιμαστεί σε νοσοκομειακή μονάδα με έναν εξειδικευμένο υπερηχοκαρδιολόγο που βρισκόταν σε παρακείμενο χώρο λίγα μέτρα μακριά από τον ασθενή. Μία κεφαλή υπερήχων, στερεωμένη σε έναν μηχανοκί-

νπο βραχίονα, τοποθετήθηκε στον ασθενή από έναν μη-υπερηχοκαρδιολόγο και ελέγχθηκε εξ αποστάσεως από τον έμπειρο υπερηχοκαρδιολόγο μέσω σύνδεσης στο διαδίκτυο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τηλε-υπερηχοκαρδιογραφία παρέχει αξιόπιστες διαγνώσεις και αποδεκτές μετρήσεις στο 86% και το 93% των περιπτώσεων αντίστοιχα.<sup>46</sup> Πρόσφατα ανακοινώθηκε η χρήση ενός αλγόριθμου βαθιάς μάθησης “οδηγού εικόνας” με στόχο να καθοδηγήσει τους αρχάριους στη λήψη (απόκτηση) υπερηχοκαρδιογραφημάτων για περιορισμένη διαγνωστική χρήση σε καταστάσεις που απαιτείται άμεση εξέταση της ανατομίας και σε περιοχές με περιορισμένη εμπειρία στη χρήση υπερήχων.<sup>47</sup>

Ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας της τεχνητής νοημοσύνης είναι η βαλβιδική μοντελοποίηση και κατάτμηση (τμηματοποίηση). Χρησιμοποιούνται υπολογιστές που θα βοηθήσουν στον προσδιορισμό του ακριβούς μεγέθους και τη μοντελοποίηση συσκευών αντικατάστασης δομικών στοιχείων της καρδιάς, όπως τεχνητές βαλβίδες, που τοποθετούνται με ελάχιστα αιματηρές παρεμβατικές μεθόδους, με έμφαση στην καθοδήγηση σε πραγματικό χρόνο (Σχήμα 5).<sup>19,48</sup>

Μερικές σκέψεις που μπορεί να γίνουν σχετικά με το θέμα της τεχνητής νοημοσύνης είναι:



**Σχήμα 5.** Ένα παράδειγμα αυτοματοποιημένης ανάλυσης βαλβίδων με τρισδιάστατη μοντελοποίηση των βαλβίδων της αορτής και της μιτροειδούς. Με κόκκινο απεικονίζεται η μιτροειδική παλινδρόμηση από το κέντρο της βαλβίδας στον αριστερό κόλπο.<sup>48</sup>

**1)** Οι γιατροί δεν είναι ακόμα προετοιμασμένοι για την εφαρμογή της ΤΝ στο καθημερινό κλινικό περιβάλλον. Η μηχανική μάθηση έχει τη δυνατότητα να ωφελήσει τους ασθενείς και τους καρδιολόγους, αλλά μόνο εάν οι κλινικοί γιατροί διαδραματίσουν ενεργό ρόλο στην εφαρμογή αυτών των νέων αλγορίθμων. Επειδή οι κλινικοί γιατροί δεν είναι ειδικοί στην επιστήμη των δεδομένων απαιτείται χρόνος προσαρμογής για την καλύτερη κατανόηση της νέας αυτής τεχνολογίας και την αξιολόγηση της νέας βιβλιογραφίας και των εξελίξεων.<sup>49</sup> Η εμπιστοσύνη σε αυτές τις νέες τεχνολογίες πρέπει να οικοδομηθεί, υποστηριζόμενη από προσπάθειες για διαφάνεια και επεξήγηση.<sup>10,11</sup>

**2)** Πρέπει να αναπτυχθεί η κουλτούρα της διεπιστημονικής συνεργασίας. Τα καλύτερα αποτελέσματα θα πρέπει να αναμένονται όταν λειτουργήσει σωστά αυτή η συνεργασία. Συγκεκριμένα, η συγκρότηση των μηχανών μάθησης γίνονται :

- από *επιστήμονες της πληροφορικής*, ειδικευμένους στον κλάδο της ΤΝ.

- *με τη συμμετοχή* και άλλων επιστημόνων από διαφορετικά γνωστικά αντικείμενα (φυσικών, μαθηματικών, νευροεπιστημόνων, γενετιστών, βιοτεχνολόγων).

- με τη στενή συνεργασία γιατρών (*με ειδικότητα ανάλογη με το γνωστικό αντικείμενο που ερευνάται*), που επιβλέπουν τους αλγορίθμους για τα πιθανά σφάλματα στην απόδοση της μηχανής.<sup>50</sup>

**3)** Πρέπει στο πρόγραμμα σπουδών των Ιατρικών Σχολών να περιλαμβάνεται και η Τεχνητή Νοημοσύνη.

**4)** Ένα σημαντικό ερώτημα που πολλοί θέτουν είναι εάν οι υπερηχοκαρδιολόγοι θα αντικατασταθούν από υπολογιστές στο μέλλον. Εάν παρατηρήσουμε τους ακτινολόγους που χρησιμοποιούν εργαλεία ΤΝ στην ειδικότητά τους για να τους βοηθούν στην ερμηνεία της εικόνας, δεν πρέπει να ανησυχούμε (ακόμα). Στην παρούσα φάση ανάπτυξης της ΤΝ, όταν αυτή η νέα τεχνολογία εφαρμόζεται στην υπερηχοκαρδιογραφία είναι μεν εντυπωσιακή, αλλά δεν μπορεί ακόμη να συγκροτήσει σε ενιαίο σύνολο (να ενοποιήσει, να ενσωματώσει) και να γενικεύσει τα κλινικά δεδομένα από ένα ασθενή, τις συμπληρωματικές διαγνωστικές μελέτες ή την προηγούμενη εμπειρία του υπερηχοκαρδιολόγου, όταν καταλήγει σε ένα



συμπέρασμα. Το ανθρώπινο μυαλό εξακολουθεί να είναι ακόμα πολύ πιο σύνθετο από την ΤΝ, που όπως αναφέρθηκε είναι ακόμα στην ασθενή ή περιορισμένη της φάση, και πιθανότατα θα παραμείνει σε αυτή για πολύ ακόμα χρονικό διάστημα μέχρις ότου μπορέσουμε να βασιστούμε αποκλειστικά σε αυτή για να ερμηνεύσουμε μελέτες καρδιακής απεικόνισης. Παρόλα αυτά είναι δικαιολογημένο να πιστεύουμε ότι ένας υπερηχοκαρδιολόγος που χρησιμοποιεί την ΤΝ θα είναι πιο ακριβής, πιο γρήγορος και πιο αποδοτικός σε σύγκριση με αυτόν που δεν θα την διαθέτει στην φαρέτρα των διαγνωστικών του εργαλείων.<sup>51-54</sup>

**5)** Αν θεωρήσουμε ότι τελεολογία είναι η αντίληψη ότι τα πάντα στον κόσμο διέπονται από ένα σκοπό και τείνουν προς την εκπλήρωση αυτού του σκοπού, τότε η τελεολογία της υπερηχοκαρδιογραφίας είναι η βελτιστοποίηση της λαμβανόμενης πληροφορίας από την απεικόνιση και η ελαχιστοποίηση του κλινικού σφάλματος.

**6)** Στόχος κάθε υπερηχο(καρδιο)γραφιστή είναι να πραγματοποιήσει μία υπερηχογραφική μελέτη που θα την χαρακτηρίζει η αρμονία. Μία υπερηχοκαρδιογραφική μελέτη θεωρείται ότι έχει αρμονία, όταν είναι σε θέση αφ' ενός μεν να αποκαλύψει (να αναδείξει) σε κάθε μία από τις απεικονιστικές λήψεις όσο το δυνατόν περισσότερα από τα συστατικά μέρη (δομικά στοιχεία) – τους αποκαλούμενους «αρμούς»– από το πιο μικρό μέχρι το πιο μεγάλο, που είναι καλώς συναρμολογημένα, στενά και άρρηκτα συνδεδεμένα, αφ' ετέρου δε να απεικονίσει τα ανωτέρω στοιχεία ευκρινέστερα με όσο το δυνατόν καλύτερη ανάλυση στο χώρο και στον χρόνο. Η ανάδειξη (αποκάλυψη) όλων αυτών των «αρμών», όλων αυτών των δεδομένων, σπηρίζεται τόσο στην ανθρώπινη παρέμβαση (συσσωρευμένη εμπειρία εξεταστού), όσο και στη βοήθεια της τεχνολογίας και συγκεκριμένα της ΤΝ. Όσο έμπειρος και αν είναι ο εξεταστής, πολλά στοιχεία, που συνθέτουν το puzzle της αρμονίας, δεν μπορεί να τα δει το ανθρώπινο μάτι για να τα υπολογίσει. Με την πραγματικά επαναστατική τεχνική «Data mining» επιπλέον δεδομένα «εξεορύσσονται» από την απεικονιστική λήψη και αποκωδικοποιούνται με τους αλγόριθμους της ΤΝ, βελτιστοποιώντας την παρεχόμενη πληροφορία, με αποτέλεσμα η υποκειμενική αντιληπτική ικανότητα του εξετάζοντα ιατρού να αντικαθίσταται

από αντικειμενική επιστήμη. Με τη συμβολή αυτής της τεχνικής, επιτυγχάνεται η ομοιογενοποίηση της απεικόνισης, ώστε οι υπερηχοκαρδιολόγοι να μιλάμε με την ίδια γλώσσα για αυτό που βλέπουμε και για αυτό που πραγματικά είναι. Είναι δε πιθανό ότι με την εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας, θα αποκαλύπτονται ακόμα περισσότερα δομικά στοιχεία της καρδιάς που με την υπάρχουσα τεχνολογία, δεν είναι ακόμη αναγνωρίσιμα.

**Συμπερασματικά**, η Τεχνητή Νοημοσύνη εφαρμοζόμενη στην υπερηχοκαρδιογραφία έχει ήδη αρχίσει να διαδραματίζει ισχυρό ρόλο, τόσο με την καθοδήγηση και τη βελτιστοποίηση της εικόνας, όσο και με την ανάλυση και την ερμηνεία αυτής. Η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν έρχεται να αντικαταστήσει τους υπερηχο(καρδιο)γραφιστές, αλλά να τους βοηθήσει να είναι πιο αποτελεσματικοί. Η αποδοχή και υιοθέτηση από το ιατρικό σώμα των βοηθημάτων που προσφέρει η ΤΝ αναμένεται να απλοποιήσει δραματικά τον τρόπο με τον οποίο θα επιλύονται τα διαγνωστικά και θεραπευτικά προβλήματα των ασθενών που ανακύπτουν. Αυτό θα είναι το μέλλον και προβλέπεται λαμπρό!

## Βιβλιογραφία

1. 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): P1061-1066.
2. Narang A., Lang PM. Artificial Intelligence and Echocardiography. Expert analysis. JACC 2019. Available at: <https://www.acc.org/latest-in-cardiology/articles/2019/06/18/07/43/artificial-intelligence-and-echocardiography>
3. Δ. Χρυσός. Ιατρική και Τεχνητή Νοημοσύνη: Ατενίζοντας το μέλλον. Καρδιά και Αγγεία. 2020; 24:261-275.
4. Dey D., Slomka PJ, Leeson P., et al. Artificial Intelligence in Cardiovascular Imaging. State-of-the-Art. Review JACC 2019; 73:1317-35.
5. Dilsizian ME, Siegel EL. Machine Meets Biology: a Primer on Artificial Intelligence in Cardiology and Cardiac Imaging. Curr Cardiol Rep 2018;20:139.
6. Gandhi S, Mosleh W, Shen J, Chow CM. Automation, machine learning, and artificial intelligence in echocardiography: A brave new world. Echocardiography 2018;35:1402-18.

7. Henglin M, Stein G, Hushcha PV, et al. Machine Learning Approaches in Cardiovascular Imaging. *Circ Cardiovasc Imaging* 2017;10:e005614.
8. Johnson KW, Torres Soto J, Glicksberg BS, et al. Artificial Intelligence in Cardiology. *J Am Coll Cardiol* 2018;71:2668-79.
9. Alsharqi M, Woodward WJ, Mumith JA, Markham DC, Upton R, Leeson P. Artificial intelligence and echocardiography. *Echo Res Pract* 2018;5:R115-R125.
10. N.Kagiyama, S. Shrestha, P. Farjo, P. P. Sengupta. Artificial Intelligence: Practical Primer for Clinical Research in Cardiovascular Disease. *J Am Heart Assoc.* 2019 Sep 3; 8(17): e012788.
11. Krittanawong C., Zhag H., Wang Z, et al. Artificial intelligence in precision cardiovascular medicine. *JACC* 2017;69:2657-64.
12. Dey D., Commandeur, F. Radiomics to Identify High-Risk Atherosclerotic Plaque From Computed Tomography: the power of quantification. *Circ Cardiovasc. Imaging.* 2017; 10 (12):e007254.
13. Pesapane F., Codari M., Sardaneli F. Artificial Intelligence in Medical Imaging :Threat or opportunity? Radiologists again at the forefront of innovation in medicine.*Eur Radiol Exp* 2018; 2(1)35.
14. Yassin NIR, Omran S, El Houbay EMF, Allam H. Machine learning techniques for breast cancer computer aided diagnosis using different image modalities: A systematic review.*Comput Methods Programs Biomed* 2018; 156:25-45.
15. Lakhari P., Saudaram B. Deep Learning at Chest Radiography: Automated Classification of Pulmonary Tuberculosis by Using Convolutional Neural Networks. *Radiology* 2017 Aug; 284(2):574- 582.
16. Qin C, Yao D, Shi Y, Song Z. Computer-aided detection in chest radiography based on artificial intelligence: a survey. *Biomed Eng Online* 2018;17:113.
17. Narang A, Sinha SS, Rajagopalan B, et al. The Supply and Demand of the Cardiovascular Workforce: Striking the Right Balance. *J Am Coll Cardiol* 2016;68:1680-9.
18. Kusunose K., Haga A, Abe T., Sata M., et al. Utilization of Artificial Intelligence in Echocardiography. *Circ J.* 2019 Jul 25;83(8):1623-1629.
19. K. R. Siegersma, T. Leiner, D. P. Chew, et al. Artificial intelligence in cardiovascular imaging: state of the art and implications for the imaging cardiologist. *Neth Heart J* 2019 Sep; 27(9):403-413. <https://doi.org/10.1007/s12471-019-01311-1>.
20. F. Lopez-Jimenez, Z. Attia, A. M. Arruda-Olson, et al. Artificial Intelligence in Cardiology: Present and Future. Review. *Mayo Clinic Proceedings*; 2020:95(5), P1015-1039.
21. Zhang J, Gajjala S, Agrawal P, et al. Fully Automated Echocardiogram Interpretation in Clinical Practice: feasibility and diagnostic accuracy. *Circulation* 2018;138:1623-35.
22. Madani A, Arnaout R, Mofrad M, et al. Fast and accurate view classification of echocardiograms using deep learning. *NPJ Digit Med* 2018;1(6):1-8.
23. Knackstedt C, Bekkers SC, Schummers G, et al. Fully Automated Versus Standard Tracking of Left Ventricular Ejection Fraction and Longitudinal Strain: The FAST-EFs Multicenter Study. *J Am Coll Cardiol* 2015;66:1456-66.
24. L.P. Badano, D.M. Keller, D. Mucaru, et al. Artificial intelligence and cardiovascular imaging: A win-win combination. *Anatol J Cardiol* 2020;24(4):214-223.
25. 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.
26. Kusunose K., Abe T., Haga A., et al. A Deep Learning approach for assessment of regional wall motion abnormality from echocardiographic images. *J Am Coll Cardiol Imag.* 2020; 13: 374-381.
27. Narang A, Mor-Avi V, Prado A, et al. Machine learning based automated dynamic quantification of left heart chamber volumes. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2019;20(5):541-549 2018;Oct 9:[Epub ahead of print].
28. Volpato V, Mor-Avi V, Narang A, et al. Automated, machine learning-based, 3D echocardiographic quantification of left ventricular mass. *Echocardiography* 2019;36:312-9.
29. Leclerc S, Smistad E, Pedrosa J, et al. Deep Learning for Segmentation using an Open Large-Scale Dataset in 2D Echocardiography. *IEEE Trans Med Imaging* 2019;Sep;38(9):2198-2210.
30. Narula S, Shameer K, Salem Omar AM, Dudley JT, Sengupta PP. Machine-Learning Algorithms to Automate Morphological and Functional Assessments in 2D Echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2016;68: 2287-95.
31. Behnami D., Liao Z., Girgis H., et al. Dual-view joint estimation of left ventricular ejection fraction with uncertainty modeling in echocardiograms. in: Shen D. Liu T. Peters T.M. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019.* Springer International Publishing, Cham, Switzerland 2019: 696-704 (Lecture Notes in Computer Science, vol 11765).
32. Kwon J.M., Kim K.H., Jeon K.H., Park J. et al. Deep learning for predicting in-hospital mortality among

- heart disease patients based on echocardiography. *Echocardiography* 2019; 36: 213-218
33. Samad M.D., Ulloa A., Wehner G.J., et al. Predicting survival from large echocardiography and electronic health record datasets: optimization with machine learning. *J Am Coll Cardiol Imag.* 2019; 12: 681-689
34. Lang RM, Addetia K, Narang A, et al. 3-Dimensional Echocardiography: Latest Developments and Future Directions. *JACC Cardiovasc Imaging* 2018; 11:1854-78.
35. Italiano G., Fusini L., Mantegazza V. et al. Novelty in 3D Transthoracic Echocardiography. *J. Clin Med* 2021; 10 (3), 408; <https://doi.org/10.3390/jcm10030408>
36. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;28:1-39.e14. doi:10.1016/j.echo.2014.10.003
37. Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA, et al. Guidelines for Performing a Comprehensive Transthoracic Echocardiographic Examination in Adults: Recommendations from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2019;32(1):1-64.
38. Narang A, Mor-Avi V, Prado A, et al. Machine learning based automated dynamic quantification of left heart chamber volumes. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2018;Oct 9: DOI: 10.1093/ehjci/jev137.
39. Tsang W, Salgo IS, Medvedofsky D, et al. Transthoracic 3D Echocardiographic Left Heart Chamber Quantification Using an Automated Adaptive Analytics Algorithm. *JACC Cardiovasc Imaging* 2016;9:769-82.
40. Medvedofsky D, Mor-Avi V, Byku I, et al. Three-dimensional echocardiographic quantification of the left-heart chambers using an automated adaptive analytics algorithm: Feasibility and Impact of Image Quality in Non selected Patients. *J Am Soc Echocardiogr.* 2017; 30(9): 879–885. doi: 10.1016/j.echo.2017.05.018
41. Medvedofsky D, Mor-Avi V, Amzulescu M Three-dimensional echocardiographic quantification of the left-heart chambers using an automated adaptive analytics algorithm: multicentre validation study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2018 Jan 1;19(1):47-58. doi: 10.1093/ehjci/jew328.
42. Fatima H, Mahmood F, Sehgal S. Artificial Intelligence for Dynamic Echocardiographic Tricuspid Valve Analysis: A New Tool in Echocardiography. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia* 2020;34:2703-2706.
43. A. M. Johri, J. Durbin, J. Newbigging, et al. Cardiac Point-of-Care Ultrasound: State-of-the-Art in Medical School Education. *J Am Soc Echocardiogr.* 2018 Jul; 31(7):749-760.
44. Cheema B.S., Walter J, Narang A., et al. Artificial Intelligence-Enabled POCUS in the COVID-19 ICU: A New Spin on Cardiac Ultrasound. *J Am Coll Cardiol Case Rep.* 2021 Feb, 3 (2) 258–263.
45. Gharahbaghian L., Kenton L Anderson K.L., Lobo V., et al. Point-of-Care Ultrasound in Austere Environments: A Complete Review of Its Utilization, Pitfalls, and Technique for Common Applications in Austere Settings. *Emerg Med Clin North Am.* 2017; 35(2):409-441.
46. Arbeille Phil., Provost R., Zuj K., et al. Teles-operated Echocardiography Using a Robotic Arm and an Internet Connection. *Ultrasound in Medicine and Biology* 2014; 40:2521-2529.
47. Narang A., Bae R., Hong Ha, et al. Utility of a Deep-Learning Algorithm to Guide Novices to Acquire Echocardiograms for Limited Diagnostic Use. *JAMA Cardiol.* Published on line February 18, 2021. doi:10.1001/jamacardio.2021.0185
48. Asch FM, Poilvert N., Abraham Th., et al. Automated echocardiographic quantification of left ventricular Ejection Fraction without volume measurement using a machine learning algorithm mimicking a human expert. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2019; 12:e009303.
49. Quer G., Amaout R., Henne M, et al. Machine Learning and the Future of Cardiovascular Care: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol.* 2021; 77 (3): 300-313.
50. Σ. Μουλόπουλος. Μηχανική Μάθηση στη Θεραπευτική. *Θεραπευτικές εξελίξεις*,2018;3-7
51. Sengupta PP, Adjeroh DA. Will Artificial Intelligence Replace the Human Echocardiographer? *Circulation* 2018; 138:1639-42.
52. D'hooge J, Fraser AG. Learning About Machine Learning to Create a Self-Driving Echocardiographic Laboratory. *Circulation* 2018;138:1636-8.
53. Chan S, Siegel EL. Will machine learning end the viability of radiology as a thriving medical specialty? *Br J Radiol* 2019;92:20180416.
54. Tajik AJ. Machine Learning for Echocardiographic Imaging: Embarking on Another Incredible Journey. *J Am Coll Cardiol* 2016;68:2296-8.

## The contribution of Artificial Intelligence in echocardiography

**Dimitrios Chrissos, Alexandros Katranis, George Nikitas**

*Cardiology Department, Panarkadian General Hospital of Tripolis*

**Abstract:** Echocardiography plays an important role in the diagnosis and management of cardiovascular diseases. However, the interpretation remains largely reliant on the subjective expertise of the operator. As a result, inter-operator variability and experience can lead to incorrect diagnoses. Artificial Intelligence (AI) technologies provide new capabilities for echocardiography to generate accurate, consistent and automated interpretation of echocardiograms, thus potentially reducing the risk of human error. In this review, we discuss the AI and the subfields of AI relevant to image interpretation, called machine learning and deep learning, and its potential to enhance the diagnostic performance of echocardiography.

**Keywords:** Artificial intelligence, machine learning, deep learning, echocardiography.