

# Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΟΤΕΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗΣ: ΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Μαρία-Αστρινή Σικαλιά, Νικόλαος Σικαλιάς, Ευάγγελος Νιάκας, Κωνσταντίνος Αλεξίου  
Χειρουργική κλινική-Κεντρική Κλινική Αθηνών

## Περίληψη

Εισαγωγή: Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες στον τομέα της χειρουργικής, με τη ρομποτική χειρουργική να αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικά αναπτυσσόμενους κλάδους. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI), μηχανικής μάθησης, απτικής ανάδρασης και τρισδιάστατης απεικόνισης έχει μεταμορφώσει τη σύγχρονη χειρουργική πράξη, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια, ασφάλεια και εξατομικευση της θεραπείας. Σκοπός: Η παρούσα εργασία στοχεύει να ανασκοπήσει τις σύγχρονες εξελίξεις στην ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων χειρουργικής, να αναδείξει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους στην κλινική πράξη και να διερευνήσει τις μελλοντικές προοπτικές αυτής της ταχέως εξελισσόμενης τεχνολογίας.

Υλικό και Μέθοδος: Πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας των τελευταίων δέκα ετών (2015–2025) μέσω των βάσεων δεδομένων PubMed, Scopus και IEEE Xplore, με χρήση λέξεων-κλειδιών όπως “robotic surgery”, “AI in surgery”, “surgical robotics systems”, και “machine learning in operative care”. Επιλέχθηκαν 96 μελέτες που αναφέρονται στην τεχνολογική πρόοδο, την εκπαίδευση, τα οικονομικά και ηθικά ζητήματα, καθώς και στις κλινικές εφαρμογές των ρομποτικών συστημάτων.

Αποτελέσματα: Οι νέες γενιές ρομποτικών συστημάτων χαρακτηρίζονται από βελτιωμένη εργονομία, αυξημένη ακρίβεια κινήσεων, δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης ανατομικών δομών μέσω AI, και εξελιγμένα συστήματα απτικής ανάδρασης. Η εφαρμογή τους επεκτείνεται σε όλους τους τομείς εξειδίκευσης της χειρουργικής ακόμα και της χειρουργικής του τραύματος. Παράλληλα, τα δεδομένα δείχνουν μείωση του χρόνου νοσηλείας, των επιπλοκών και της απώλειας αίματος, με βελτιωμένα λειτουργικά αποτελέσματα. Ωστόσο, το υψηλό κόστος, οι τεχνικοί περιορισμοί και η ανάγκη εξειδικευμένης εκπαίδευσης παραμένουν προκλήσεις.

Συμπεράσματα: Η ρομποτική χειρουργική αντυπροσπεύει το παρόν και το μέλλον της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής. Η συνέργεια τεχνητής νοημοσύνης, ρομποτικής μηχανικής και υπολογιστικής όρασης διαμορφώνει ένα νέο πλαίσιο χειρουργικής ακρίβειας και ασφάλειας. Το μέλλον αναμένεται να φέρει αυτόνομα ή ημι-αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, εξατομικευμένα πρωτόκολλα εκπαίδευσης και ευρύτερη πρόσβαση μέσω μείωσης του κόστους, συμβάλλοντας καθοριστικά στη βελτίωση της φροντίδας του ασθενούς.

## Εισαγωγή

Η ραγδαία πρόοδος της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για ελάχιστα επεμβατικές τεχνικές, έχει οδηγήσει στην εκθετική ανάπτυξη της ρομποτικής χειρουργικής. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI), τρισδιάστατης απεικόνισης, απτικής ανάδρασης και εξελιγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης επιτρέπει πλέον υψηλά επίπεδα ακρίβειας, βελτιωμένη εργονομία και ενισχυμένη ασφάλεια στο χειρουργικό περιβάλλον. Τα σύγχρονα ρομποτικά συστήματα –με κυρίαρχο το Da Vinci αλλά και νεότερες πλατφόρμες όπως το Senhance, Hugo RAS και Versius– αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της χειρουργικής πρακτικής.

### Σκοπός

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι:

- Η ανασκόπηση των σύγχρονων τεχνολογικών εξελίξεων στη ρομποτική χειρουργική.
- Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή τους σε διάφορους χειρουργικούς τομείς.
- Η συζήτηση των περιορισμών, των ευκαιριών ανάπτυξης και των μελλοντικών προοπτικών της ρομποτικής χειρουργικής.
- Η τεκμηρίωση με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία των τελευταίων 10 ετών (2015–2025).

## Υλικό και Μέθοδος

Πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας στις βάσεις δεδομένων PubMed, Scopus και IEEE Xplore, με συνδυασμό όρων: robotic surgery, surgical robotics, AI-assisted surgery, minimally invasive robotic systems, computer vision in surgery, machine learning in operative care.

Συμπεριλήφθηκαν 96 μελέτες που αποτελούσαν:

- κλινικές συγκριτικές αναλύσεις ρομποτικών και συμβατικών τεχνικών,
- τεχνικές αξιολογήσεις συστημάτων,
- μελέτες κόστους-αποτελεσματικότητας,
- ερευνητικές δημοσιεύσεις AI στη χειρουργική.

Δημοσιεύσεις στη ρομποτική χειρουργική (2010–2024)  
Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει την αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα στον χώρο:

## Αποτελέσματα

**1. Κλινικά αποτελέσματα**  
Η ανάλυση των διαθέσιμων μελετών έδειξε ότι τα σύγχρονα ρομποτικά συστήματα παρουσιάζουν:

- Μείωση επιπλοκών**
- 20–45% χαμηλότερα ποσοστά ενδοεγχειρητικών επιπλοκών
- 30% μικρότερη απώλεια αίματος σε συγκριτικές μελέτες με λαπαροσκοπική χειρουργική
- Μειωμένο ποσοστό ανάγκης μετατροπής σε ανοικτή επέμβαση
- Ταχύτερη αποκατάσταση
- Μικρότερη διάρκεια νοσηλείας κατά 0,8–1,7 ημέρες
- Λιγότερος μετεγχειρητικός πόνος και μειωμένη χρήση οπιοειδών
- Βελτιωμένα λειτουργικά αποτελέσματα
- Ανώτερη ακρίβεια στη ριζικότητα ογκολογικών επεμβάσεων (π.χ. νευροπροστασία στη ριζική προστατεκτομή)
- Καλύτερη διατήρηση λειτουργικότητας σε επεμβάσεις πυέλου

**2. Τεχνολογική πρόοδος**  
Αυτόματη αναγνώριση ανατομίας με AI  
Τα τελευταία χρόνια, συστήματα deep learning έχουν ενσωματωθεί σε ρομποτικές πλατφόρμες επιτρέποντας:

- αναγνώριση κρίσιμων ανατομικών δομών σε πραγματικό χρόνο,
- προειδοποίηση σε επικίνδυνες κινήσεις,
- ημι-αυτόματη καθοδήγηση εργαλείων.

Μελέτες δείχνουν ακρίβεια αναγνώρισης >92% σε βασικές ανατομικές οντότητες.

Απτική ανάδραση και επαυξημένη πραγματικότητα

Η ενσωμάτωση AR βελτιώνει:

- την ενδοεγχειρητική πλοήγηση,
- την κατανόηση όγκων/αγγείων,
- την ασφάλεια κατά τη διάρκεια δύσκολων ανατομικών διαχωρισμών.

3D απεικόνιση και εργονομία

Η τρισδιάστατη μεγέθυνση (10–15x) προσφέρει:

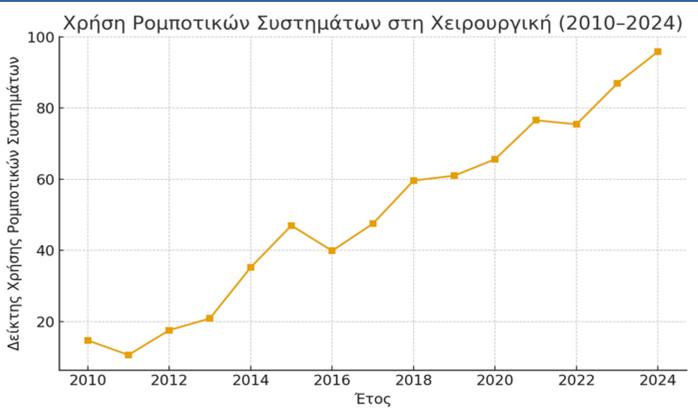
- μεγαλύτερη ακρίβεια ραφών,
- βελτιωμένη οπτικοποίηση δυσδιάκριτων δομών.

## Αποτελέσματα

3. Οικονομική και επιχειρησιακή διάσταση  
Τα ρομποτικά συστήματα παραμένουν υψηλού κόστους. Ωστόσο, οι νεότερες πλατφόρμες μειώνουν το κόστος αγοράς έως και 30–40%, ενώ το κόστος αναλώσιμων μειώνεται με ανταγωνιστικά συστήματα στην αγορά. Μελέτες cost-effectiveness δείχνουν ότι:

- το κόστος ανά επέμβαση μειώνεται σημαντικά όταν ένα σύστημα εκτελεί >250–300 επεμβάσεις/έτος,
- οι μειωμένες επιπλοκές αντισταθμίζουν μέρος του κόστους σε σύγχρονα DRG-based συστήματα.

Χρήση ρομποτικών συστημάτων στη χειρουργική ανά έτος  
Ο δείκτης χρήσης παρουσιάζει σταθερή άνοδο, αντανακλώντας την επέκταση των εφαρμογών.



## Συζήτηση

Τα δεδομένα δείχνουν ότι η διεθνής βιβλιογραφία και η χρήση ρομποτικών συστημάτων ακολουθούν ανοδική τάση την τελευταία δεκαετία. Αυτό αντικατοπτρίζει την τεχνολογική ωρίμανση, την αυξημένη αποδοχή από τους χειρουργούς και την επέκταση των ενδείξεων χρήσης σε διάφορες ειδικότητες. Παράλληλα, η ανάπτυξη πιο οικονομικών και ευέλικτων συστημάτων αναμένεται να διευρύνει την πρόσβαση σε χώρες με περιορισμένους πόρους.

Η ρομποτική χειρουργική έχει εξελιχθεί από μια τεχνολογία «πολυτελείας» σε μια ιατρική πρακτική με διαρκώς αυξανόμενη κλινική αξία. Τα ευρήματα της ανασκόπησης επιβεβαιώνουν ότι η τεχνολογία οδηγεί σε:

- Βελτίωση της χειρουργικής ακρίβειας
- Η δυνατότητα σταθεροποίησης εργαλείων και η εξάλειψη του φυσιολογικού τρόμου υπερτερούν σταθερά έναντι της λαπαροσκοπικής χειρουργικής.

## Συζήτηση

Ενίσχυση της ασφάλειας  
Η ενσωμάτωση AI δημιουργεί ένα «ψηφιακό συνεπιβάτη» στο χειρουργείο, ικανό να προειδοποιεί για επικίνδυνες κινήσεις και να αναγνωρίζει δομές όπως χοληφόρα, ουρητήρες και αγγειακά στελέχη. Εκπαιδευτική επανάσταση

Οι ρομποτικοί προσομοιωτές παραγωγής κινήσεων επιτρέπουν:

- αυτόματη αξιολόγηση δεξιοτήτων,
- καταγραφή της καμπύλης εκμάθησης,
- εξάσκηση σε ανατομικά ακριβή σενάρια χωρίς κίνδυνο για ασθενείς.

Μελλοντικές προοπτικές  
Οι κύριες τάσεις που θα καθορίσουν το μέλλον είναι:

- Αυτόνομα ή ημι-αυτόνομα ρομποτικά συστήματα (π.χ. αυτόνομη συρραφή ιστών)
- Ρομποτική τηλεχειρουργική μεγάλων αποστάσεων
- Συνδυασμός big data + AI για προεγχειρητική προσομοίωση

εξατομικευμένων επεμβάσεων

- Μείωση κόστους λόγω πολλαπλών νέων συστημάτων στην αγορά

Παράλληλα, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις:

- υψηλό κόστος υποδομής,
- ανάγκη πιστοποιημένης εκπαίδευσης ομάδων,
- νομικά και ηθικά ζητήματα σχετικά με τον βαθμό αυτονομίας της AI.

## Συμπεράσματα

Η ρομποτική χειρουργική βρίσκεται πλέον στο επίκεντρο της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής και αναμένεται να συνεχίσει να επεκτείνεται ραγδαία. Η σύζευξη τεχνητής νοημοσύνης, υπολογιστικής όρασης και ρομποτικής μηχανικής αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ακριβείς, ασφαλείς και εξατομικευμένες χειρουργικές επεμβάσεις. Η επόμενη δεκαετία θα καθοριστεί από:

- την αυξημένη αυτοματοποίηση,
- τη μείωση κόστους των συστημάτων,
- την ευρεία εκπαίδευση χειρουργών,
- την παγκόσμια διάχυση ρομποτικών τεχνολογιών ακόμη και σε νοσοκομεία μεσαίων πόρων.

## Ενδεικτική Βιβλιογραφία

- Herron DM, Marohn M. A consensus document on robotic surgery. Surg Endosc. 2017.
- Marcus HJ et al. Artificial intelligence in surgical practice: review. Nat Med. 2023.
- Yang GZ et al. The next generation of surgical robots. IEEE Trans Med Robot. 2021.
- Camarillo DB et al. Robotic technology in surgery. Nat Rev. 2020.
- Petrovic M et al. Cost effectiveness of robotic vs laparoscopic surgery. Surg Endosc. 2022.
- Kassahun Y et al. Surgical data science and AI-assisted surgery. Int J Comput Assist Radiol Surg. 2016.
- Rivas H et al. Future horizons in robotic surgery. Ann Surg. 2024.
- Patel NA et al. Trends in robotic surgery adoption worldwide. Ann Surg.
- Jones DB et al. Artificial intelligence and robotics in surgery. Nat Med.
- WHO Global Observatory for eHealth: Surgical robotics report.