

## Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην καρδιοχειρουργική αντιμετώπιση Σύμπλοκων Συγγενών και άλλων Δομικών Καρδιοπαθειών

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΠΡΩΤΟΠΑΠΑΣ  
ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΖΑΒΑΡΟΠΟΥΛΟΣ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αθηναϊκό Καρδιοχειρουργικό Ινστιτούτο,  
Β' Καρδιοχειρουργική Κλινική Παιδών και Συγγενών  
Καρδιοπαθειών Ενηλίκων  
Νοσοκομείο «ΜΗΤΕΡΑ»

### Λέξεις ευρετηρίου

Τρισδιάστατη εκτύπωση της καρδιάς, cardiac 3D printing, συγγενείς καρδιοπάθειες, δομικές καρδιοπάθειες

### Επικοινωνία

Γεώργιος Σαρρής  
Λ. Κηφισίας 2, Μαρούσι 15125  
Τηλ. 6932 601 020  
e-mail: info@athensheartsurgery.gr

**Τ**ρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων φυσικών αντικειμένων με μηχανήματα που προσομοιάζουν κατά κάποιον τρόπο με αυτά που εκτυπώνουν κείμενο και εικόνες σε χαρτί, μόνο που η εκτύπωση γίνεται όχι σε ένα επίπεδο, αλλά σε διαδοχικά παράλληλα επίπεδα ώστε έτσι να κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο αντικείμενο στον χώρο. Είναι διαθέσιμη τα τελευταία 30 χρόνια, με αρχικές εφαρμογές στην βιομηχανία για την παραγωγή πρωτοτύπων εξαρτημάτων, στην αρχιτεκτονική και σε κλάδους της μηχανολογίας. Σταδιακά εφαρμόστηκε και στον χώρο της υγείας, αρχικά κυρίως στην γναθοχειρουργική και στην ορθοπαιδική, με κατασκευή φυσικών ανατομικών μοντέλων – εκμαγείων της γνάθου ή αρθρώσεων, με βάση δεδομένα ιατρικής απεικόνισης.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις καρδιαγγειακές παθήσεις επετεύχθη πιο πρόσφατα αφού είναι πολύ περισσότερο απαιτητική, λόγω των ιδιοτήτων της απεικόνισης της καρδιάς, που είναι κινούμενο όργανο και η απεικονιστική του διαφοροποίηση από τους γύρω ιστούς παραμένει δυσχερής.<sup>1,2</sup> Στις αρχές του 2000, οι Binder et al, χρησιμοποιώντας δεδομένα υπερηχοκαρδιογραφίας, δημοσίευσαν την πρώτη εργασία σχετικά με την καρδιακή τρισδιάστατη εκτύπωση, και στη συνέχεια το 2001 οι Pentacost et al, παρήγαγαν τα πρώτα τρισδιάστατα μοντέλα που αντιγράφουν εμβρυϊκές καρδιές με βάση φωτομικρογραφικά δεδομένα.<sup>3</sup> Μια πρόσφατη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπίστωσε ότι πριν από το 2000 είχαν δημοσιευτεί μόνο δύο εργασίες (εξαιρουμένων των μεμονωμένων περιστατικών) σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση σε καρδιαγγειακά νοσήματα, ενώ μεταξύ 2011 και 2015 ο αριθμός αυτός αυξήθηκε σε 189.<sup>4</sup> Σήμερα αυτή η τεχνολογία, με εφαρμογές στη αντιμετώπιση ασθενών αρχικά με συγγενείς και στη συνέχεια με επίκτητες δομικές καρδιοπάθειες, αναδεικνύεται διεθνώς σε σημαντική καινοτομία

που διαμορφώνει εκ νέου την κλινική πρακτική της καρδιαγγειακής χειρουργικής και των δερμικών επεμβάσεων.

## Ιστορική Αναδρομή

Τον τρίτο αιώνα π.Χ., στην ελληνιστική Αλεξάνδρεια, οι Έλληνες ιατροί Ερώφιλος ο Χαλκιδαίος και Ερασίστρατος από την Χίο χρησιμοποιούν για πρώτη φορά πτωματικά παρασκευάσματα για την συστηματική εκμάθηση της ανθρώπινης ανατομίας. Αυτή η επιστημονική παράδοση εγκαταλείφθηκε μετά την καταστροφή του ελληνιστικού και του ρωμαϊκού κόσμου για να αναβιώσει στην Ιταλία του 14ου αιώνα. Το «De humani corporis fabrica» του Andreas Vesalius, βασισμένο σε πτωματικά ανατομικά παρασκευάσματα, στέκεται ως ένας διαχρονικός άτλαντας λεπτομερών ανατομικών σχεδίων της ανθρώπινης ανατομίας και έχει χρησιμεύσει ως πρότυπο για την ανατομική διδασκαλία μέχρι σήμερα.<sup>5</sup>

Ωστόσο, το επόμενο σημαντικό βήμα στη μελέτη της ανατομίας ενός συγκεκριμένου εν ζώη ασθενούς, έπρεπε να περιμένει την ανακάλυψη των ακτίνων Χ από τον Wilhelm Conrad Röntgen το 1895<sup>6</sup>, οι οποίες πάντως προβάλλουν την «σκιά» του συνόλου των ιστών σε ένα επίπεδο. Η υπολογιστική αξονική τομογραφική απεικόνιση, που εισήχθη εμπορικά από τον Sir Godfrey Hounsfield το 1972,<sup>7</sup> επέτρεψε στους γιατρούς να δουν την εσωτερική ανατομία του σώματος με τη μορφή πολλαπλών λεπτών «τομογραφικών» τομών. Η μαγνητική τομογραφία (MRI), που εφευρέθηκε από τον Paul Christian Lauterbur και τον Peter Mansfield, επίσης τη δεκαετία του 1970, παρέσχε περαιτέρω τη δυνατότητα παρακολούθησης κινούμενων οργάνων, όπως η καρδιά, καθώς και της αξιολόγησης της λειτουργίας τους. Ως επόμενο βήμα, οι αλγόριθμοι απόδοσης όγκου και τρισδιάστατης ανακατασκευής επέτρεψαν την κατασκευή εικονικών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων-εικόνων της εσωτερικής δομής του σώματος. Αυτές οι εντυπωσιακές εικόνες μπορούν να περιστραφούν σε μια οθόνη υπολογιστή επιτρέποντας στον γιατρό να οπτικοποιήσει την ανατομία από διαφορετικές γωνίες. Η ηχοκαρδιογραφία επίσης έχει παράλληλα προοδεύσει σημαντικά: Από τις απλές γραμμικές εικόνες M-mode στην δισδιάστατη απεικόνιση των οργάνων

και, τα τελευταία χρόνια, σε τρισδιάστατη απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο (real time 3D Imaging).

## Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Όσο εντυπωσιακά όμως και αν είναι τα προαναφερθέντα επιτεύγματα της ιατρικής απεικόνισης, εξακολουθούν να απαιτούν από τον γιατρό να δημιουργήσει μια εσωτερική κατανόηση, μια διανοητική τρισδιάστατη εικόνα των εμπλεκόμενων δομών. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έρχεται να αντικαταστήσει αυτή την νοητή εικόνα που καλείται να σχηματίζει ο ιατρός με βάση τις γνώσεις και την εμπειρία του με ένα φυσικού μεγέθους ακριβές εκμαγείο της υποκείμενης ανατομίας, το οποίο ο ιατρός μπορεί να ψηλαφήσει και να χειριστεί με όποιο τρόπο εκείνος επιθυμεί, ώστε να κατανοήσει καλύτερα την ανατομική πολυπλοκότητα της πάθησης, ακόμα και αν δεν έχει μεγάλη εμπειρία στην ερμηνεία των σύγχρονων ιατρικών απεικονίσεων. Με άλλα λόγια, η τρισδιάστατη εκτύπωση «εκδημοκρατικοποιεί» την κατανόηση των σύμπλοκων ανατομικά παθήσεων.

Η τεχνολογία, που εφευρέθηκε από τον Charles Hull το 1986 και ονομάστηκε για πρώτη φορά «στερεολιθογραφία», όπως προαναφέρθηκε, βρήκε αρχικά πολλές εφαρμογές στην αρχιτεκτονική, τη μηχανική και τη βιομηχανία.<sup>8</sup>

Η τρισδιάστατη εκτύπωση περιγράφεται ως κατασκευή προσθήκης, σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς τύπους αφαιρετικής κατασκευής, στην οποία ένα αντικείμενο δημιουργείται με σταδιακή αφαίρεση υλικού από ένα μεγαλύτερο κομμάτι, όπως συμβαίνει π.χ. στη γλυπτική. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, διαδοχικά στρώματα υλικού τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο, με κάθε στρώμα να αποτελεί τη βάση για το επόμενο. Σήμερα υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών αλλά και τεχνικών σταθεροποίησης των διαδοχικά εκτυπωμένων στρωμάτων, ώστε να έχει καταστεί δυνατή η δημιουργία αντικειμένων με ποικίλες ιδιότητες μηχανικής συμπεριφοράς, ακόμα και μεταλλικών αντικειμένων.<sup>9</sup> Πιο δημοφιλής επί του παρόντος τεχνολογία είναι αυτή των εκτυπωτών inkjet, οι οποίοι χρησιμοποιούν φωτοπολυμεριζόμενα υλικά. Όλοι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δημιουργούν τα αντικείμενα με βάση ειδικά ψηφιακά αρχεία που περιέχουν ψηφιακά ογκομετρικά δεδομένα απεικόνισης (voxel), τα οποία φέρουν

την ονομασία στερεολιθογραφικά αρχεία (STL) και δημιουργούνται από εξειδικευμένα προγράμματα (λογισμικό) μέσω επεξεργασίας υψηλής ανάλυσης και ακριβείας πρωτογενών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά, όταν πρόκειται για ιατρικές απεικονίσεις, λαμβάνονται συνήθως από κλασικές αξονικές ή μαγνητικές τομογραφίες υψηλής ευκρίνειας<sup>10,11</sup> και τεχνικών προδιαγραφών.

Η ακριβής απεικόνιση οστικών δομών επετεύχθη εύκολα με τις κλασικές μεθόδους απεικόνισης (αξονική και μαγνητική τομογραφία), γεγονός το οποίο συνέβαλε στις πρώτες εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη γναθοπροσωπική χειρουργική, την οδοντιατρική και την ορθοπαιδική. Οι καρδιακές εφαρμογές υστερούσαν εν μέρει λόγω των πρόσθετων προκλήσεων της καρδιακής απεικόνισης που περιλαμβάνουν την ομοιότητα της απεικονιστικής πυκνότητας της καρδιάς με αυτή των γύρω ιστών, την ανάγκη χορήγησης κατάλληλου υλικού αντίθεσης (contrast media) και του προσδιορισμού του κατάλληλου χρόνου της χορήγησης αυτής για την μεγιστοποίηση της επιθυμητής αντίθεσης, τις τεχνικές εξουδετέρωσης της κίνησης της καρδιάς (με ηλεκτροκαρδιογραφικό συγχρονισμό - ECG Gating) και του θωρακικού κλωβού (με αναπνευστικό συγχρονισμό) σε μαγνητικές τομογραφίες), και συνολικά την ανάπτυξη κατάλληλων πρωτοκόλλων απεικόνισης.<sup>12</sup>

## Κλινικά Οφέλη – Εξατομικευμένη Ιατρική Ακριβείας (Personalized Precision Medicine)

Από κλινική άποψη, η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη της καρδιακής τρισδιάστατης εκτύπωσης ήταν η μεγάλη ανάγκη του χειρουργού να κατανοήσει πλήρως την περίπλοκη υποκείμενη ανατομία, λαμβάνοντας υπόψιν πολλαπλές τρισδιάστατες εικόνες τις οποίες καλείται να συνδυάσει στην σκέψη του ώστε να ανακατασκευάσει νοητά την τρισδιάστατη δομή που θα συναντήσει στο χειρουργείο. Οι ασάφειες ή οι ελλείψεις σε αυτήν την κατανόηση, όση σχετική εμπειρία και αν υπάρχει, αναγκαστικά άλλοτε ανακαλύπτονται απροσδόκπα στο χειρουργείο και άλλοτε δεν γίνονται ούτε στο χειρουργείο αντιληπτές, καθώς ο χειρουργός δεν είναι ελεύθερος να επιθεωρήσει όλες τις εσωτερικές δομές της καρδιάς, αλλά

μόνο αυτές που βρίσκονται στο χειρουργικά προσβάσιμο οπτικό του πεδίο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μια χειρουργική στρατηγική μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθεί ή να διαμορφωθεί εκ νέου κατά τη διάρκεια μίας χειρουργικής επέμβασης, ή, ακόμα χειρότερα, κάποιο σημαντικό ανατομικό στοιχείο να μην γίνει αντιληπτό και η επέμβαση να είναι ατελής. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι να οδηγούμαστε σε μεγαλύτερους χρόνους χειρουργείου, σε λιγότερο ακριβείς ή αποτελεσματικές επεμβάσεις, σε αυξημένη πιθανότητα επιπλοκών και φυσικά σε αυξημένο κίνδυνο για τον ασθενή, αλλά και σε αύξηση του κόστους της υγειονομικής περίθαλψης. Άρα, το τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο (εκμαγείο) γίνεται ένα νέο, πολύτιμο εργαλείο – βοήθημα του χειρουργού για την πραγματοποίηση ακριβέστερης, ταχύτερης και αποτελεσματικότερης επέμβασης.

Επιπλέον, το τρισδιάστατο μοντέλο παρέχει την δυνατότητα και στον ασθενή και στην οικογένειά του να κατανοήσει ευκολότερα τα ουσιώδη της συγκεκριμένης ανατομίας και επιτρέπει στον ιατρό να εξηγήσει στον ασθενή τα βήματα της επέμβασης καθώς και τους σχετικούς κινδύνους και πιθανές επιπλοκές, πράγμα που επιτρέπει την καλλίτερη δυνατή συνεργασία του ασθενούς με την ιατρική ομάδα.

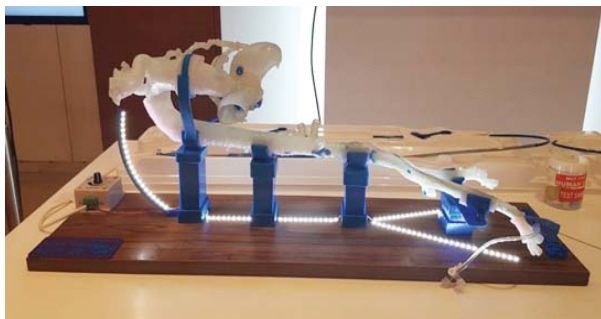
## Συγγενείς Καρδιοπάθειες

Όλα τα παραπάνω ζητήματα συναντώνται σε μεγαλύτερο βαθμό στην χειρουργική αντιμετώπιση συγγενών και εν γένει των δομικών καρδιοπαθειών, όπου η υποκείμενη παθολογική ανατομία μπορεί να έχει πρακτικά άπειρη ποικιλία, και οι διορθωτικές επεμβάσεις συχνά είναι εξαιρετικά περίπλοκες, με υψηλή θνησιμότητα και νοσηρότητα. Ο μικρός αριθμός περιστατικών σε σπάνιες παθήσεις μας ώθησε να αναζητήσουμε νέους τρόπους ενίσχυσης της προεγχειρητικής κατανόησης. Ως εκ τούτου, πριν από μερικά χρόνια, μαζί με μερικούς συναδέλφους σε όλο τον κόσμο, αρχίσαμε να διερευνούμε την πιθανή χρησιμότητα της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης αρχικά σε περίπλοκες συγγενείς καρδιακές βλάβες, με κίνητρο τις ειδικές ανάγκες ορισμένων ασθενών μας. Μετά από αρχικές πολύ ενθαρρυντικές εμπειρίες που είχαμε κατασκευάζοντας τρισδιάστατα μοντέλα σε συ-

νεργασία με την ομάδα του Toronto Children's Hospital (επικεφαλής ο Δρ. Shi Joon Yoo), ιδρύσαμε τη δική μας ομάδα τρισδιάστατης εκτύπωσης στην Αθήνα, την 3D Life ([www.3dlife.gr](http://www.3dlife.gr)).<sup>13</sup> Η αυξανόμενη εμπειρία μας στα πλαίσια των προσπαθειών αυτών έχει αναφερθεί σε πολλά διεθνή συνέδρια και έχει αποτελέσει αντικείμενο δημοσιεύσεων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά.

### Δομικές καρδιοπάθειες ενηλίκων

Παράλληλα με την από μέρους μας διερεύνηση και ανάπτυξη των εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης της καρδιάς στην χειρουργική συγγενών καρδιοπαθειών, μας έγινε σαφές ότι αυτή η τεχνολογία δεν ήταν μόνο εξαιρετικά χρήσιμη ως ένα μοναδικό εργαλείο για την παροχή εξατομικευμένης χειρουργικής αντιμετώπισης υψηλής ποιότητας σε ασθενείς με συγγενείς καρδιοπάθειες όλων των ηλικιών (νεογνών, βρεφών, παιδιών και ενηλίκων), αλλά και σε πολλούς ασθενείς με επίκτητες δομικές καρδιοπάθειες που απαιτούσαν πολύπλοκες χειρουργικές ή διακαθετηριακές επεμβάσεις. Επίσης, η τεχνολογία αποδείχθηκε πολύτιμη και στη διαχείριση θωρακικών αλλά και κοιλιακών αορτικών ανευρυσμάτων. Σε συνεργασία με επεμβατικούς καρδιολόγους χρησιμοποιήσαμε τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα του χώρου εξόδου της αριστεράς κοιλίας για διευκόλυνση επεμβάσεων διακαθετηριακής τοποθέτησης βαλβίδων (TAVI), του αριστερού κόλπου και των πνευμονικών φλεβών για διευκόλυνση ηλεκτροφυσιολογικών επεμβάσεων (κατάλυση αρρυθμιών), αλλά και προσθετικών βαλβίδων για διευκόλυνση σχεδιασμού διαδερμικής σύγκλισης παραβαλβιδικών διαφυγών.<sup>14-19</sup>



Εικόνα. Μοντέλο προσομοίωσης διακαθετηριακών αορτικών βαλβίδων (TAVI).

### Εκπαίδευση

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα καρδιακά μοντέλα παρέχουν μεγάλες καινοτόμες εκπαιδευτικές δυνατότητες, σε δύο τομείς:

**A.** Κατανόηση ανατομικά σύμπλοκων καρδιακών βλαβών. Πέραν των προαναφερθέντων ωφελημάτων της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τον κάθε συγκεκριμένο ασθενή, που απολαμβάνει τα οφέλη της περισσότερο εξατομικευμένης ιατρικής, πολύ σημαντικός είναι επίσης ο ραγδαία διογκούμενος ρόλος της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαίδευση των φοιτητών ιατρικής και κυρίως των νεότερων χειρουργών, ρόλος που μπορεί να χαρακτηριστεί επαναστατικά ανατρεπτικός! Οι πραγματικές δυνατότητες μελέτης της ανατομίας σύμπλοκων καρδιακών παθήσεων στις λίγες ανά τον κόσμο ανατομικές βιβλιοθήκες, όπου φυλάσσονται διατηρημένα σε φορμόλη ανατομικά παρασκευάσματα-όργανα ασθενών που απεβίωσαν από τις παθήσεις αυτές, είναι ελάχιστες. Όμως, οι ψηφιακές ανατομικές βιβλιοθήκες που περιέχουν διαρκώς αυξανόμενο αριθμό τρισδιάστατων μοντέλων παρέχουν την δυνατότητα ψηλάφησης, επισκόπησης και μελέτης τόσο φυσιολογικών ανατομικών μοντέλων όσο και «καρδιών» με σπάνιες καρδιαγγειακές παραλλαγές. Η ομάδα μας στην Αθήνα δημιούργησε μία από τις πρώτες στον κόσμο τέτοιες ψηφιακές ανατομικές βιβλιοθήκες τρισδιάστατων μοντέλων καρδιαγγειακών παθήσεων, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο συγγενών καρδιοπαθειών αλλά και δομικών καρδιοπαθειών ενηλίκων. Η on-line αυτή ψηφιακή ανατομική βιβλιοθήκη διαρκώς εμπλουτίζεται και είναι προσβάσιμη στον καθένα διαδικτυακά στον παρατιθέμενο ιστότοπο:<sup>13</sup>

<http://www.3dlife.gr/categories.php>

Τέτοιες ψηφιακές βιβλιοθήκες συμπληρώνουν τις υπάρχουσες λίγες ανατομικές βιβλιοθήκες ανθρώπινων οργάνων, οι οποίες ούτως ή άλλως δεν είναι εύκολα προσβάσιμες, και τελικά θα τις αντικαταστήσουν για πολλές από τις λειτουργίες τους, ιδιαίτερα καθόσον στις ψηφιακές βιβλιοθήκες αποτυπώνονται ανατομικά προβλήματα ασθενών εν ζωή και όχι μόνο ασθενών μετά τον θάνατό τους.<sup>20</sup>

**B.** Χειρουργική προσομοίωση. Πέραν όμως των δυνατοτήτων κατανόησης της ανατομικής

περιπλοκότητας διαφόρων καρδιαγγειακών παθήσεων, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα καρδιάς χρησιμοποιούνται πλέον με μεγάλη επιτυχία σε προγράμματα χειρουργικής προσομοίωσης, που διαφορετικά θα ήταν αδύνατον. Έτσι, οι χειρουργοί, ειδικά δε οι νεότεροι, μπορούν πλέον να εξασκηθούν στην αντιμετώπιση παθήσεων που θα συναντούσαν λίγες φορές στην καριέρα τους και να πραγματοποιήσουν σε προγράμματα χειρουργικής προσομοίωσης δύσκολες και όχι κοινές επεμβάσεις, αποκτώντας έτσι επαρκείς γνώσεις, δεξιότητες και αυτοπεποίθηση ώστε να εκτελέσουν περιπτώσεις υψηλού κινδύνου κατά την διάρκεια αλλά και μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσής τους.<sup>21</sup>

Η εμπειρία μας οδήγησε στη συνειδητοποίηση ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα μπορούν να φέρουν επανάσταση στη χειρουργική εκπαίδευση στο πλαίσιο της πρακτικής χειρουργικής προσομοίωσης. Όπως προαναφέρθηκε, δημιουργήσαμε μια μοναδική “cloud based” ανατομική βιβλιοθήκη τρισδιάστατων μοντέλων, η οποία περιλαμβάνει διαρκώς διογκούμενη μεγάλη ποικιλία σύνθετων ανατομικών προβλημάτων πραγματικών ασθενών, με σκοπό αυτή να αναπτύσσεται επ’ άπειρον και να χρησιμεύει ως ένας μοναδικός εκπαιδευτικός πόρος. Ξεκινήσαμε επίσης μια σειρά Εργαστηρίων Προσομοίωσης Χειρουργικής Συγγενών Καρδιοπαθειών, το πρώτο εκ των οποίων πραγματοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία στο πλαίσιο του Athens Crossroads Congress on Cardiovascular Surgery που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα, τον Νοέμβριο του 2018, διδάσκοντας την επέμβαση της αντιμετάθεσης των μεγάλων αγγείων (Arterial Switch operation) σε φυσικού μεγέθους τρισδιάστατα μοντέλα-εκμαγεία της καρδιάς νεογνών με μετάθεση των μεγάλων αγγείων (transposition of the great arteries -TGA). Σε αυτό το εργαστήριο, οι εκπαιδευτές δίδαξαν τα στάδια της επέμβασης χωρίς χρονικά όρια και οι εκπαιδευόμενοι είχαν την δυνατότητα να εκτελέσουν την επέμβαση στο δικό τους τρισδιάστατο μοντέλο υπό διδακτική επίβλεψη και χωρίς το άγχος μιας πραγματικής επέμβασης. Ο Yoo et al<sup>22</sup> που είχε οργανώσει στο Τορόντο παρόμοια εκπαιδευτικά σεμινάρια χειρουργικής προσομοίωσης, αναφέρει ότι ένας από τους παλαιότερους χειρουργούς του κέντρου του σχολίασε ότι συνήθως χρειάζονται με-

ρικά χρόνια για να μάθουν οι χειρουργοί πώς να κάνουν την επέμβαση Norwood στο σύνδρομο υποπλαστικής αριστερής καρδιάς, αλλά και ότι θα μπορούσε να μάθει την επέμβαση μέσα σε μια νύχτα, εάν είχε πρόσβαση σε μοντέλα τρισδιάστατης εκτύπωσης μερικών περιπτώσεων με διαφορετικές παθολογικές παραλλαγές. Συμβούλευε δε θερμά τους χειρουργούς και τους εκπαιδευόμενους να εξασκήσουν τις χειρουργικές τους δεξιότητες σε μοντέλα τρισδιάστατης εκτύπωσης, πριν εκτελέσουν τη συγκεκριμένη επέμβαση στους ασθενείς.

## Συζήτηση

Είναι προφανές ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση της καρδιάς (cardiac 3D Printing) με τα πιθανά οφέλη της είναι ένα πολύ χρήσιμο και ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση καρδιαγγειακών παθήσεων (επίκτητων και συγγενών), γιατί ξεπερνά ορισμένους από τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων 2d/3d απεικόνισης. Η δυνατότητα χειρισμού ανατομικών μοντέλων υψηλής ακριβείας με τρόπους αδύνατους ακόμη και κατά τη διάρκεια μιας χειρουργικής επέμβασης επιτρέπει στην καρδιοχειρουργική ομάδα να εκτιμήσει πιθανές διαδικαστικές δυσκολίες, να αποφύγει εκπλήξεις κατά τη διάρκεια της επέμβασης και να διευκρινίσει τους στόχους και τους περιορισμούς των προγραμματισμένων χειρουργικών επεμβάσεων.

Χωρίς αμφιβολία, ο ρόλος των μοντέλων τρισδιάστατης εκτύπωσης στην καθημερινή κλινική πρακτική δεν έχει ακόμη πλήρως αποσαφηνιστεί. Η τεράστια ενίσχυση της προεγχειρητικής κατανόησης, η ενίσχυση της ενημέρωσης της οικογένειας του ασθενούς και η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της διεγχειρητικής και περιεγχειρητικής φροντίδας είναι πρόδηλη. Πάντως, μέχρι τώρα, προοπτικές τυχαίοποιημένες συγκριτικές μελέτες της χρησιμότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε σχέση με τη συμβατική απεικόνιση σπανίζουν, όπως και δεδομένα στη βιβλιογραφία που να αποδεικνύουν τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αυτής της τεχνολογίας ή ότι η χρήση της θα μπορούσε να βελτιώσει τα κλινικά αποτελέσματα ή τη χειρουργική εκπαίδευση. Μία προοπτική μελέτη από το Henry Ford Hospital στις ΗΠΑ έδειξε πολύ μεγάλη μείωση των επι-

πλοκών και του κόστους από την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε διαδερμικές επεμβάσεις, αλλά τέτοιες μελέτες ακόμα σπανίζουν. Η European Congenital Heart Surgeons Association (ECHSA) πολύ πρόσφατα ξεκίνησε μια προοπτική μελέτη μητρώου που συλλέγει δεδομένα από συμμετέχοντα ευρωπαϊκά και βορειοαμερικανικά κέντρα, με στόχο να τεκμηριώσει πόσο χρήσιμη ήταν η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου, σύμφωνα με την εκτίμηση της χειρουργικής ομάδας που χρησιμοποίησε την τεχνολογία αυτή, αξιολομώντας βασικές πτυχές, όπως ο σχεδιασμός της χειρουργικής επέμβασης, η συμβουλευτική οικογένειας, και χειρουργική προσομοίωση και εκπαίδευση της ομάδας. Η μελέτη αυτή ευρίσκεται σε εξέλιξη, αλλά τα προκαταρκτικά στοιχεία φαίνεται να τεκμηριώνουν ότι η τεχνολογία αυτή παρέχει σημαντικά οφέλη στους παραπάνω αξιολογηθέντες άξονες.<sup>23</sup>

Η συσσωρευόμενη εμπειρία δείχνει ότι η χειρουργική εκπαίδευση σε τρισδιάστατα μοντέλα θα γίνει σταδιακά βασικό συστατικό στα προγράμματα χειρουργικής εκπαίδευσης, ειδικά στον τομέα των συγγενών καρδιοπαθειών, με αυξανόμενο ρόλο καθώς το κόστος των υλικών εκτύπωσης θα μειώνεται, και καθώς θα βελτιώνονται ώστε να αναπαράγουν καλλίτερα τις μηχανικές ιδιότητες του καρδιακού ιστού.<sup>24</sup>

Τέλος, γνωρίζουμε ότι η αξονική τομογραφία και η μαγνητική τομογραφία μπορούν να απεικονίσουν άριστα τη δεξαμενή αίματος, κάθε μία όμως τεχνική έχει τους δικούς της περιορισμούς στην απεικόνιση του μυοκαρδίου, ενώ ο υπέρηχος είναι πολύ ανώτερος αυτών στην επίδειξη της ανατομίας και της λειτουργίας των καρδιακών βαλβίδων. Ένας νέος μαθηματικός αλγόριθμος, ο οποίος θα μπορούσε να παρέχει συγχώνευση απεικονιστικών δεδομένων από πολλαπλούς τρόπους απεικόνισης θα βελτιώσει την ακρίβεια των εκτυπωμένων τρισδιάστατα εκτυπωμένων καρδιακών μοντέλων τα οποία επί του παρόντος δεν αποδίδουν ιδεωδώς ανατομικά προβλήματα των καρδιακών βαλβίδων.<sup>25</sup>

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή εξατομικευμένων προθέσεων όπως μοσχεύματα, νάρθηκες (“stents”), τεχνητές βαλβίδες κ.λπ. 26 Τέλος, διερευνάται πειραματικά η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία βιολογικών ιστών (λ.χ. αγγείων ή καρδιακών βαλβίδων), με συνδυα-

σμένη εκτύπωση βιοσυμβατού–απορροφήσιμου υποστρώματος (“matrix”). π.χ. από κολλαγόνο, και από προγονικών καρδιακών κυττάρων. Η διαδικασία αυτή, που είναι γνωστή ως βιοεκτύπωση, και η μηχανική ιστών δύνανται να οδηγήσει σε νέα εποχή στην εξατομικευμένη ιατρική.

Η ομάδα μας πρωτοστάτησε διεθνώς στην ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης της καρδιάς και ήταν πρώτη ομάδα στην Ελλάδα που χρησιμοποίησε και υποστήριξε αυτή την τεχνολογία στην αντιμετώπιση ασθενών με Συγγενείς Καρδιοπάθειες σε όλες τις πτυχές της (για προεγχειρητικό σχεδιασμό, συμβουλευτική και εκπαίδευση). Η τρέχουσα ερευνητική μας προσπάθεια για την περαιτέρω ανάπτυξη της καινοτόμου αυτής τεχνολογίας εστιάζεται σε δύο κατευθύνσεις:

- α) Στον συνδυασμό της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της ψηφιακής τεχνολογίας τεχνητής νοημοσύνης - εικονικής πραγματικότητας (virtual reality-VR) καθώς και ενισχυμένης πραγματικότητας (augmented reality-AR) για την ενίσχυση της προεγχειρητικής κατανόησης και του χειρουργικού σχεδιασμού και στην υποβοήθηση του χειρουργού τόσο προεγχειρητικά όσο και κατά την διάρκεια της επέμβασης.
- β) Στην ανάπτυξη βιοεκτυπώσιμων ιστών και, τελικά, οργάνων, που θα μπορούν να είναι εξατομικευμένα για τον κάθε ασθενή τόσο ανατομικά όσο και βιολογικά.

Συμπερασματικά, αυτή η νέα τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης της καρδιάς συνιστά πολύτιμο αρωγό σε ολόκληρη την ομάδα καρδιάς στις διαρκείς προσπάθειες βελτίωσης των υπηρεσιών εξατομικευμένα στον κάθε ασθενή, μειώνοντας τις επιπλοκές και το κόστος, ενώ παράλληλα φέρνει επανάσταση στις δυνατότητες της ιατρικής, ιδιαίτερα της χειρουργικής και επεμβατικής καρδιολογικής εκπαίδευσης.

## Βιβλιογραφία

1. Kim MS, Hansgen AR, Wink O, Quaipe RA, Carroll JD. Rapid prototyping: A new tool in understanding and treating structural heart disease. *Circulation*. 2008.
2. Mankovich NJ, Cheeseman AM, Stoker NG. The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models. *J Digit Imaging*. 1990;
3. Anwar S, Singh GK, Miller J, Sharma M, Manning P, Bil-

- ladello JJ, et al. 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. *JACC: Basic to Translational Science*. 2018.
- P. T, J. V, P. G, L. A. 3D-printing techniques in a medical setting: A systematic literature review. *Biomed Eng Online*. 2016;
  - Vesalius 1514-1564 A. *De humani corporis fabrica* : Basel, 1543 [Internet]. Octavo edition. Palo Alto, CA : Octavo, [1998] ©1998; Available from: <https://search.library.wisc.edu/catalog/999877146002121>
  - Glasser 1895-1964 O. Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Roentgen rays [Internet]. San Francisco: Norman Pub., 1993.; 1993. Available from: <https://search.library.wisc.edu/catalog/999614816502121>
  - Bhattacharyya KB. Godfrey Newbold Hounsfield (1919-2004): The man who revolutionized neuroimaging. *Ann Indian Acad Neurol* [Internet]. 2016;19(4):448–50. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27994351>
  - Farooqi KM, Sengupta PP. Echocardiography and three-dimensional printing: Sound ideas to touch a heart. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2015.
  - Vukicevic M, Mosadegh B, Min JK, Little SH. Cardiac 3D Printing and its Future Directions. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2017.
  - Byrne N, Velasco Forte M, Tandon A, Valverde I, Husain T. A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system. *JRSM Cardiovasc Dis*. 2016;
  - Greil GF, Wolf I, Kuettner A, Fenchel M, Miller S, Martirosian P, et al. Stereolithographic reproduction of complex cardiac morphology based on high spatial resolution imaging. *Clin Res Cardiol*. 2007;
  - Knox K, Kerber CW, Singel SA, Bailey MJ, Imbesi SG. Rapid prototyping to create vascular replicas from CT scan data: Making tools to teach, rehearse, and choose treatment strategies. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2005;
  - 3D Life. No Title [Internet]. Available from: <http://www.3dlife.gr/categories.php>
  - Saito N, Tatsushima S, Tazaki J, Toyota T, Imai M, Watanabe S, et al. Patient-specific three-dimensional aortocoronary model for percutaneous coronary intervention of a totally occluded anomalous right coronary artery. *J Invasive Cardiol*. 2015;
  - Otton JM, Spina R, Sulas R, Subbiah RN, Jacobs N, Muller DWM, et al. Left Atrial Appendage Closure Guided by Personalized 3D-Printed Cardiac Reconstruction. *JACC: Cardiovascular Interventions*. 2015.
  - Sodian R, Schmauss D, Schmitz C, Bigdeli A, Haeberle S, Schmoeckel M, et al. 3-Dimensional Printing of Models to Create Custom-Made Devices for Coil Embolization of an Anastomotic Leak After Aortic Arch Replacement. *Ann Thorac Surg*. 2009;
  - Levy M, Lillehei W, Anderson R, Amplatz K, Edwards J. Aortico-Left Ventricular Tunnel. *Circulation* [Internet]. 1963 Apr 1;27(4):841–53. Available from: <https://doi.org/10.1161/01.CIR.27.4.841>
  - O'Neill B, Wang DD, Pantelic M, Song T, Guerrero M, Greenbaum A, et al. Transcatheter caval valve implantation using multimodality imaging: Roles of TEE, CT, and 3D printing. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2015.
  - Maragiannis D, Jackson MS, Igo SR, Schutt RC, Connell P, Grande-Allen J, et al. Replicating Patient-Specific Severe Aortic Valve Stenosis with Functional 3D Modeling. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2015;
  - Sarris GE, Polimenakos AC. Three-Dimensional Modeling in Congenital and Structural Heart Perioperative Care and Education: A Path in Evolution. *Pediatric Cardiology*. 2017;
  - Feins RH, Burkhart HM, Conte J V., Coore DN, Fann JI, Hicks GL, et al. Simulation-Based Training in Cardiac Surgery. In: *Annals of Thoracic Surgery*. 2017.
  - Yoo S-J, Thabit O, Kim EK, Ide H, Yim D, Dragulescu A, et al. 3D printing in medicine of congenital heart diseases. *3D Print Med*. 2015;
  - WAS A. Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPCC).
  - Bompotis G, Meletidou M, Karakanas A, Sotiriou S, Sachpekidis V, Konstantinidou M, et al. Transcatheter Aortic Valve Implantation using 3-D printing modeling assistance. A single center experience. *Hell J Cardiol* [Internet]. 2019; Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1109966618305967>
  - Kossivas F, Angeli S, Kafouris D, Patrickios CS, Tzagarakis V, Constantinides C. MRI-based morphological modeling, synthesis and characterization of cardiac tissue-mimicking materials. *Biomed Mater*. 2012;
  - Kurup HKN, Samuel BP, Vettukattil JJ. Hybrid 3D printing: A game-changer in personalized cardiac medicine? *Expert Review of Cardiovascular Therapy*. 2015.