

**Α. Ψαρρά, Β. Καραγιάννης**

Γ'Μαιευτική- Γυναικολογική Κλινική  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Ιπποκράτειο Γενικό Νοσοκομείο

# Η συμβολή της τρισδιάστατης υπερηχογραφίας στη μαιευτική.

## Μέρος 2ο: τρισδιάστατη και τετραδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία εμβρύου

### Περίληψη

Η τελευταία δεκαετία υπήρξε μάρτυρας σημαντικών εξελίξεων σε ό,τι αφορά την τρισδιάστατη εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία. Αρχικά η τρισδιάστατη απεικόνιση της καρδιάς ήταν στατική με εικόνες που δεν κινούνταν και περιείχαν αναμειγμένα στοιχεία από διαφορετικά σημεία του καρδιακού κύκλου. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τεχνικές συντονισμού των δισδιάστατων εικόνων με το αντίστοιχο σημείο τους στον καρδιακό κύκλο (motion gating). Το αποτέλεσμα ήταν μείωση των artifacts και δυνατότητα εξέτασης ενός καρδιακού κύκλου μέσα στο σετ των τρισδιάστατων πληροφοριών. Σαν φυσική προέκταση και εξέλιξη αυτού του συντονισμού εμφανίσθηκε η τεχνολογία STIC (Spatio-Temporal Image Correlation: συσχέτιση των εικόνων στο χώρο και χρόνο) που επιτρέπει την έμμεση, ή αλλιώς offline τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία του εμβρύου. Με το STIC η απεικόνιση μπορεί να γίνει είτε σε πολλαπλά επίπεδα (multiplanar imaging) είτε σαν απόδοση όγκου (volume rendering) με δυνατότητα επιλογών όπως η απεικόνιση επιφάνειας, ελάχιστης έντασης και glass body. Η προσθήκη του έγχρωμου και power Doppler επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή της αιματικής ροής ενώ οι καινούργιες απεικονιστικές δυνατότητες (ανάστροφη απεικόνιση, B flow) καθιστούν δυνατή την δημιουργία «εκμαγείων» και αγγειογραμμάτων του εμβρυϊκού καρδιαγγειακού συστήματος με βελτιωμένο προσανατολισμό στο χώρο. Πρόσφατα περιγράφηκε και η άμεση ή αλλιώς real

Αλληλογραφία:

Α. Ψαρρά, Παύλου Μελά 10  
54622 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310-274800, Fax: 2310-240997

e-mail:  
nat@kie.gr

Κατατέθηκε 27.3.2006  
Έγινε δεκτή 25.4.2006

**time τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία του εμβρύου. Στο παρόν άρθρο περιγράφονται συνοπτικά οι κλασσικές τομές της δισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας και παρουσιάζονται οι δυνατότητες της τρισδιάστατης και τετραδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας από το δεύτερο έως το τρίτο τρίμηνο της κύησης.**

*Λέξεις - κλειδιά:* εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία, τρισδιάστατη υπερηχογραφία, τετραδιάστατη υπερηχογραφία, STIC, real time 3D

## Εισαγωγή

Οι συγγενείς καρδιοπάθειες αποτελούν τη συχνότερη σοβαρή συγγενή διαμαρτία. Αφορούν 8 σε κάθε 1000 γεννήσεις<sup>1</sup> ενώ ευθύνονται για το 20% του συνόλου των νεογνικών θανάτων και για το 50% των νεογνικών θανάτων που οφείλονται σε συγγενείς ανωμαλίες. Η αιτιολογία τους είναι ετερογενής και περιλαμβάνει γενετικούς και περιβαλλοντολογικούς παράγοντες όπως επίσης και νόσους, φάρμακα, λοιμώξεις, χρωματοσωμικές ανωμαλίες και γενετικά σύνδρομα. Το 90% πάντως των εμβρύων με συγγενή καρδιοπάθεια προέρχεται από ζευγάρια χωρίς βεβαρυσμένο ιστορικό ή παράγοντες κινδύνου.<sup>2</sup> Από την άλλη πλευρά, η προγεννητική διάγνωση συγκεκριμένων καρδιοπαθειών σε συνδυασμό με την κατάλληλη περιγεννητική φροντίδα μπορεί να μειώσει τη θνητότητα και θνησιμότητα. Εντούτοις, οι ανωμαλίες της καρδιάς του εμβρύου εξακολουθούν ακόμη να παραβλέπονται συχνά κατά το συνήθη προγεννητικό υπερηχογραφικό έλεγχο.<sup>3-5</sup>

## Εμβρυολογία<sup>6</sup>

Η ανθρώπινη οργανογένεση ολοκληρώνεται στις πρώτες 8 εβδομάδες της ζωής και αποτελεί μια στερεότυπη αλληλουχία γεγονότων με μικρές στατιστικές παραλλαγές. Η ανάπτυξη του καρδιαγγειακού συστήματος αρχίζει την 3η εβδομάδα της ενδομήτριας ζωής ενώ οι πρώτοι καρδιακοί χτύποι, το *sine qua non* της απαρχής της ζωής, μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από τις πρώτες ημέρες της 6ης εβδομά-

δας, όταν το κεφαλοουραίο μήκος του εμβρύου έχει φθάσει τα 3 χλ. Η καρδιά σχηματίζεται ουσιαστικά από έναν απλό σωλήνα, ο οποίος επιμηκύνεται και στρέφεται σε μια δεξιόστροφη αγκύλη έτσι ώστε η μελλοντική δεξιά κοιλία να βρεθεί δεξιά και μπροστά από την αριστερή. Οι κόλποι συνδέονται με την αριστερή κοιλία, τη δεξιά κοιλία και τον αρτηριακό κορμό. Στη συνέχεια σχηματίζεται το πρωτογενές μεσοκολπικό και μεσοκοιλιακό διάφραγμα και γίνεται η μετακίνηση των μηνοειδών βαλβίδων. Τέλος, οι πτυχές του αρτηριακού κορμού ενώνονται για να σχηματίσουν το πνευμονοαορτικό διάφραγμα που θα οδηγήσει στο διαχωρισμό της δεξιάς από την αριστερή κοιλία, οι οποίες επικοινωνούν με την πνευμονική αρτηρία και την αορτή αντίστοιχα. Ο σχηματισμός της καρδιάς έχει ολοκληρωθεί στις 10 εβδομάδες της κύησης.

## Ανατομία της εμβρυϊκής καρδιάς<sup>7</sup>

Η κατανόηση της ανατομίας της εμβρυϊκής καρδιάς είναι απαραίτητη για την εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία. Η καρδιά είναι τρισδιάστατα σύνθετη με τη δεξιά κοιλία και το αγγείο εξόδου αυτής (την πνευμονική δηλαδή αρτηρία) να τυλίγονται γύρω από την αριστερή κοιλία και την αορτή. Η δεξιά κοιλία είναι μπροστά και προς τα δεξιά της αριστερής, η πνευμονική αρτηρία είναι μπροστά και αριστερά από την αορτή ενώ τα μεγάλα αγγεία διασταυρώνονται στο επίπεδο των βαλβίδων τους σε ορθή γωνία.

## Οι 5 εγκάρσιες τομές της δισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να περιγραφεί μια κατανοητή και ακριβής μέθοδος ελέγχου της εμβρυϊκής καρδιάς που να μπορέσει να ενσωματωθεί στο συνήθη υπερηχογραφικό έλεγχο.<sup>8</sup> Η συνεχής εξέταση σε εγκάρσιες τομές που αρχίζει από την κοιλία, περιλαμβάνει τις 4 κοιλότητες και ανεβαίνει μέχρι το άνω τμήμα του θώρακα φαίνεται ότι απλουστεύει την εξέταση της εμβρυϊκής καρδιάς ενώ έχει μεγάλη διαγνωστική ακρίβεια. Οι 5 εγκάρσιες τομές περιλαμβάνουν τα εξής επίπεδα<sup>9</sup>:

**Άνω κοιλία: επίπεδο 1 (εικόνα 1)**

Η εγκάρσια τομή της άνω κοιλίας καταδεικνύει το στομάχο, την κοιλιακή αορτή και την κάτω κοίλη φλέβα και επιβεβαιώνει τη σωστή θέση των σπλάχνων.

**Οι 4 κοιλοότητες της καρδιάς: επίπεδο 2 (εικόνα 2)**

Αφού επιβεβαιωθεί η σωστή θέση των σπλάχνων, ακολουθεί η τομή των 4 κοιλοτήτων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί μπορεί από μόνη της να καταδείξει έως 60% των μειζόνων συγγενών καρδιοπαθειών και αποτελεί το σημείο αναφοράς και για τις υπόλοιπες σημαντικές τομές της καρδιάς. Μια ακριβής τομή στο επίπεδο των 4 κοιλοτήτων είναι απαραίτητη για μια ακριβή διάγνωση. Τα στοιχεία που διασφαλίζουν το σωστό επίπεδο είναι : 1. η τομή στο θώρακα πρέπει να είναι κυκλική και όχι ελλειψοειδής, 2. πρέπει να απεικονίζεται ολόκληρη τουλάχιστον μια πλευρά, 3. πρέπει να απουσιάζει η φυσαλίδα του στομάχου και 4. ο «σταυρός» της καρδιάς πρέπει να απεικονίζεται ακέραιος χωρίς σημεία εισόδου από τη αορτή (πολύ υψηλά) ή από τον στεφανιαίο κόλπο (πολύ χαμηλά).

Για τον προσανατολισμό στο επίπεδο των 4 κοιλοτήτων βοηθά η υπενθύμιση των εξής ανατομικών σχέσεων: Το αγγείο που βρίσκεται μπροστά από τη σπονδυλική στήλη είναι η αορτή ενώ το καρδιακό διαμέρισμα μπροστά από την αορτή είναι ο αριστερός κόλπος.

Ακριβώς απέναντι και κάτω από το πρόσθιο θωρακικό τοίχωμα είναι η δεξιά κοιλία. Έτσι είναι εύκολο να εντοπισθούν και τα υπόλοιπα διαμερίσματα (η αριστερή κοιλία βρίσκεται δίπλα στη δεξιά, ο δεξιός κόλπος δίπλα στον αριστερό όπου εκβάλλουν και οι πνευμονικές φλέβες).

Η καρδιά καταλαμβάνει φυσιολογικά το 1/3 του θώρακα ενώ ο άξονας που σχηματίζει το μεσοκοιλιακό και μεσοκολπικό διάφραγμα (ο καρδιακός δηλαδή άξονας) πρέπει να σχηματίζει γωνία 45 μοιρών με τη μέση γραμμή του σώματος. Πρέπει να απεικονίζονται δύο κόλποι και δύο κοιλίες ίσου μεγέθους και δύο κολποκοιλιακές βαλβίδες που οδηγούν σε δύο ξεχωριστές κοιλοότητες. Οι κόλποι και οι κοιλίες πρέπει να έχουν ίδια συσταλτικότητα ενώ οι δύο κολποκοιλιακές βαλβίδες πρέπει να είναι ανοιχτές και με εμπροσθεν ροή στο έγχρωμο Doppler. Το μεσοκοιλιακό διάφραγμα πρέπει να είναι ακέραιο, η πρόσφυση της τριγλώχινας βαλβίδας να είναι λίγο χαμηλότερα από αυτήν της μιτροειδούς, το ωοειδές τρήμα να είναι φυσιολογικό με κίνηση προς τα αριστερά και οι πνευμονικές φλέβες να απεικονίζονται εκβάλλοντας στον αριστερό κόλπο.

**Έξοδος αριστερής κοιλίας: επίπεδο 3 (εικόνα 3)**

Λίγο υψηλότερα από το επίπεδο των 4 κοιλοτήτων και με ελαφρά κλίση της κεφαλής των



*Εικόνα 1: Τομή άνω κοιλίας (επίπεδο 1).*



*Εικόνα 2: Τομή 4 κοιλοτήτων (επίπεδο 2).*



**Εικόνα 3:** Έξοδος αριστερής κοιλίας (επίπεδο 3).



**Εικόνα 4:** Έξοδος δεξιάς κοιλίας (επίπεδο 4).

υπερήχων προς το δεξιό εμβρυϊκό ώμο, απεικονίζεται η έξοδος της αριστερής κοιλίας. Σε αυτήν την τομή επιβεβαιώνεται πρώτα από όλα ότι το αγγείο που εξέρχεται από τα αριστερά είναι όντως η αορτή. Η αορτή, σε αντίθεση με την πνευμονική αρτηρία) δεν διχάζεται και δεν δίνει κλάδους παρά μόνο προς την κεφαλή και τον τράχηλο. Η πορεία της είναι ελαφρώς πλάγια με κατεύθυνση το δεξιό εμβρυϊκό ώμο. Το μεσοκοιλιακό διάφραγμα πρέπει να σχηματίζει συνεχή γραμμή με το στέλεχος της αορτής χωρίς διακοπή ή εφίπλευση και η αορτική βαλβίδα πρέπει να κινείται ελεύθερα.

#### Έξοδος δεξιάς κοιλίας: επίπεδο 4 (εικόνα 4)

Στο επόμενο επίπεδο απεικονίζεται η έξοδος της δεξιάς κοιλίας με το στέλεχος της πνευμονικής αρτηρίας να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από την αορτή. Η πνευμονική αρτηρία έχει ευθεία πορεία προς τη σπονδυλική στήλη και διχάζεται σε δύο πλάγιους κλάδους. Τα μεγάλα αγγεία πρέπει να διασταυρώνονται στο επίπεδο των βαλβίδων τους ενώ ποτέ δεν πρέπει να συνάγεται ότι το αγγείο που εξέρχεται από την αριστερή κοιλία είναι κατ' ανάγκη η αορτή και αυτό από τη δεξιά κοιλία η πνευμονική αρτηρία για να μην παραβλεφθούν οι περιπτώσεις μετάθεσης των μεγάλων αγγείων.

#### Τομή τριών αγγείων:επίπεδο 5 (εικόνα 5)

Η τομή των 3 αγγείων ή 3 αγγείων και τραχειάς είναι η ανώτερη εγκάρσια τομή ψηλά στο μεσοθωράκιο στην οποία απεικονίζονται από τα δεξιά προς τα αριστερά και με αυξανόμενο μέγεθος η άνω κοίλη φλέβα, η αορτή και η μετάπτωση της πνευμονικής στο βοτάνλιο πόρο.

#### Έγχρωμο Doppler

Το έγχρωμο Doppler συστήθηκε στην κλινική πράξη στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και βρήκε άμεση εφαρμογή στον τομέα της εμβρυϊκής υπερηχοκαρδιογραφίας καθώς αυξάνει τόσο την ταχύτητα όσο και την ακρίβεια της εξέτασης. Το 2001 προτάθηκε η εφαρμογή του σε τρία επίπεδα<sup>10</sup>: την τομή των 4 κοιλοτήτων, στην τομή των 5 κοιλοτήτων και τέλος στην τομή των 3 αγγείων. Η καρδιακή διαστολή στην τομή των 4 κοιλοτήτων χαρακτηρίζεται από δύο λωρίδες ίδιου χρώματος και μεγέθους που αντιπροσωπεύουν τη ροή του αίματος από τους κόλπους προς τις κοιλίες (εικόνα 6). Στην τομή των 5 κοιλοτήτων, πρέπει να υπάρχει μια μόνο λωρίδα χρώματος χωρίς στροβιλισμό που αντιπροσωπεύει την αιματική ροή στο αορτικό στέλεχος (εικόνα 7). Τέλος στην τομή των 3 αγγείων, η συρροή της πνευμονικής αρτηρίας με την αορτή αριστερά της σπονδυλικής στήλης δίνει το χαρακτηριστικό γράμμα V με σκέλη ίδιου χρώματος (εικόνα 8).



Εικόνα 5: Τομή τριών αγγείων-τραχείας (επίπεδο 5).



Εικόνα 6: Έγχρωμο Doppler: Τομή 4 κοιλοτήτων.

### Νέες διαστάσεις στην εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία

Κάθε φορά που εξετάζουμε πολλαπλές διαδοχικές τομές της καρδιάς ενώ αυτή χτυπά, αναπαριστούμε στο μυαλό μας την καρδιά στην τρίτη και τέταρτη της διάσταση. Η τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία που έχει ήδη αποδειχθεί χρήσιμη στη διάγνωση συγγενών καρδιοπαθειών σε βρέφη, παιδιά και ενήλικες<sup>11</sup>, φαίνεται ότι έχει να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της κλασσικής δισδιάστατης και να ανοίξει καινούργιους ορίζοντες στην καρδιολογία του εμβρύου. Τρεις είναι οι αρχές της τρισδιάστατης απεικόνισης: 1) σάρωση του οργάνου υπό εξέταση και συσσώρευση ογκομετρικών δεδομένων

για αυτό, 2) επεξεργασία των δεδομένων αυτών και 3) απόδοση τους σαν ανατομικά και λειτουργικά χρήσιμη πληροφορία από ένα τρισδιάστατα συγχρονισμένο σύστημα υπολογιστών.

Η τελευταία δεκαετία υπήρξε μάρτυρας σημαντικών εξελίξεων σε ότι αφορά την τρισδιάστατη εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία. Αρχικά η τρισδιάστατη απεικόνιση της καρδιάς ήταν στατική με εικόνες που δεν κινούνταν και περιείχαν αναμειγμένα στοιχεία από διαφορετικά σημεία του καρδιακού κύκλου. Ένα επιπλέον πρόβλημα ήταν ότι η κίνηση των καρδιακών τοιχωμάτων κατά τη σάρωση είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία artifacts μέσα στο συγκεντρωμένο όγκο πλη-



Εικόνα 7: Έγχρωμο Doppler: Τομή 5 κοιλοτήτων.



Εικόνα 8: Έγχρωμο Doppler: Τομή 3 αγγείων.

ροφοριών με αποτέλεσμα εικόνες μειωμένης ευκρίνειας και ακρίβειας. Για να υπερπηδηθούν τα προβλήματα αυτά αναπτύχθηκαν τεχνικές συντονισμού των δισδιάστατων εικόνων με το αντίστοιχο σημείο του καρδιακού κύκλου (gating). Το αποτέλεσμα ήταν μείωση των artifacts και δυνατότητα εξέτασης ενός καρδιακού κύκλου μέσα στο σετ των τρισδιάστατων πληροφοριών. Σαν φυσική προέκταση και εξέλιξη αυτού του συντονισμού εμφανίστηκε το 2003 η τεχνολογία STIC (ακρωνύμιο για τη συσχέτιση των εικόνων στο χώρο και χρόνο) που επιτρέπει την έμμεση υπερηχοκαρδιογραφία όγκου ή αλλιώς offline ανάλυση, ενώ το 2005 περιγράφηκε και η άμεση υπερηχοκαρδιογραφία όγκου στο έμβρυο ή αλλιώς το real time 3DE.

Το 2003 προτάθηκε μια ονοματολογία που επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των τύπων της τρισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας: 1) στατικό 3D (άμεσο υπερηχογράφημα όγκου: χωρίς συντονισμό), 2) 3D αληθούς χρόνου (άμεσο υπερηχογράφημα όγκου, αληθούς χρόνου: online 4D), και 3) STIC (έμμεσο υπερηχογράφημα όγκου, με συντονισμό: offline 4D).<sup>12</sup>

### Προκαταρκτικές μελέτες

Οι πρώτες μελέτες τρισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας σε φυσιολογικά και παθολογικά έμβρυα έγιναν χωρίς συντονισμό και παρόλο που έχουν πλέον ιστορικό μόνο ενδιαφέρον αξίζει να αναφερθούν. Το 1996 οι Meyer-Wittkopf συνέκριναν την τρισδιάστατη υπερηχοκαρδιογραφία με MRI σε 7 παθολογικές εμβρυϊκές καρδιές.<sup>13</sup> Παρόλο που επιτεύχθηκαν ικανοποιητικές τομές σε 6 από τα 7 περιστατικά, οι εικόνες της μαγνητικής τομογραφίας θεωρήθηκαν καλύτερες. Τον ίδιο χρόνο η Zosmer και συν. εξέτασαν 54 υγιείς γυναίκες με 3D και κατάφεραν να έχουν ικανοποιητικές εικόνες στο 85% των εμβρύων.<sup>14</sup> Ο επιμήκης άξονας της αριστερής κοιλίας ήταν ορατός στο 87%, ο βραχύς άξονας στο 57% και το αορτικό τόξο στο 65% των περιπτώσεων. Οι Chang και συν. έναν χρόνο αργότερα συνέκριναν την αναπαραγωγικότητα του 2D με το 3D στην εκτίμηση των

καρδιακών όγκων σε 50 φυσιολογικά έμβρυα και βρήκαν ότι το 3D υπερτερούσε.<sup>15</sup> Τέλος, οι Levental και συν. το 1998 συγκρίνοντας το 3D χωρίς συντονισμό με το 2D σε 31 ασθενείς, βρήκαν ότι το 3D υστερούσε στην ποιότητα εικόνας και στις βασικές υπερηχογραφικές τομές όπως αυτή των 4-κοιλοτήτων και των εξόδων της δεξιάς και αριστερής κοιλίας, αλλά ήταν ελαφρώς καλύτερο στην κατάδειξη του αορτικού τόξου και του βοτάλλειου πόρου.<sup>16</sup>

### 2D και 3D υπερηχοκαρδιογραφία χωρίς συντονισμό (non-gated)

Οι Bega και συν. το 2001 συνέκριναν την αναγνώριση καρδιακών πλάνων με 2D και 3D σε 18 γυναίκες ηλικίας κύησης από 16-26 εβδομάδες.<sup>17</sup> Η τομή των 4 κοιλοτήτων επιτεύχθηκε στο 93% των περιπτώσεων τόσο με 2D όσο και με 3D. Η έξοδος της αριστερής κοιλίας απεικονίστηκε με 2D στο 68% και με 3D στο 46% των περιπτώσεων με σημείο αφετηρίας τις 4 κοιλοότητες και στο 100% όταν το σημείο αφετηρίας ήταν η αριστερή παρα-επιμήκης τομή. Η έξοδος της δεξιάς κοιλίας απεικονίστηκε στο 68% με 2D και στο 71% με 3D με σημείο αφετηρίας τις 4 κοιλοότητες και την αριστερή παρα-επιμήκη τομή αντίστοιχα. Το αορτικό τόξο και ο βοτάλλειος πόρος απεικονίστηκαν με 2D στο 12% και 18% αντίστοιχα. Με 3D και σημείο αφετηρίας τις 4 κοιλοότητες η απεικόνιση του αορτικού τόξου και του βοτάλλειου πόρου ήταν επιτυχής στο 66% και 86% των περιπτώσεων αντίστοιχα. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τρισδιάστατη υπερηχογραφία διευκόλυνε την λήψη περισσότερων καρδιακών τομών από ότι η δισδιάστατη.

### 2D και 3D υπερηχοκαρδιογραφία με συντονισμό (motion-gated)

Στην υπερηχοκαρδιογραφία χωρίς συντονισμό παράγεται ένας μόνο όγκος πληροφοριών με αναμειγμένα στοιχεία από πολλά σημεία του καρδιακού κύκλου και αποτέλεσμα εικόνες περιορισμένης ακρίβειας και ευκρίνειας. Η καρδιακή συσχέτιση αφορά την ταυτόχρονη επιπλέον καταγραφή χωρο-

χρονικών πληροφοριών έτσι ώστε κάθε ένας όγκος πληροφοριών να περιέχει στοιχεία από ένα δεδομένο σημείο του καρδιακού κύκλου.

Μετά τη γέννηση του νεογνού, ο συντονισμός των εικόνων με τον καρδιακό κύκλο είναι σχετικά απλή διαδικασία που διευκολύνεται από το ηλεκτροκαρδιογράφημα. Η ίδια διαδικασία προγεννητικά είναι πολύ πιο επίπονη. Στις πρώτες μελέτες χρησιμοποιήθηκε για τη διάσταση του χρόνου η μετατροπή Fourier<sup>9</sup> που βοηθούσε να υπολογισθεί η βασική καρδιακή συχνότητα ενώ αργότερα για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιήθηκε το M mode<sup>18</sup> και η Doppler κυματομορφή.<sup>19</sup> Οι Sklansky και συν το 1998 συνέκριναν την υπερηχοκαρδιογραφία με συντονισμό με την υπερηχοκαρδιογραφία χωρίς συντονισμό και κατέληξαν ότι στην πρώτη η απεικόνιση και η κατανόηση των καρδιακών δομών είναι σαφώς καλύτερη.<sup>20</sup> Η ανωτερότητα των συστημάτων με συντονισμό σε σχέση με αυτά χωρίς έγκειται στη μεγαλύτερη ευκρίνεια και τη δυνατότητα απεικόνισης της καρδιακής κίνησης. Το 2001 οι Meyer-Wittkopf εξέτασαν τις δυνατότητες της 3D υπερηχοκαρδιογραφίας με συντονισμό σε έμβρυα με συγγενείς καρδιοπάθειες.<sup>21</sup> Μετά την εξέταση με 2D, τα τρισδιάστατα στοιχεία συλλέγονταν προοπτικά σε 22 έμβρυα με διάφορες καρδιακές ανωμαλίες. Οι βασικές υπερηχοκαρδιογραφικές δομές των φλεβοκολπικών, κολποκοιλιακών και κοιλιοαρτηριακών συνδέσεων εξαγόταν από τα σετ των πληροφοριών όγκου και επιλέγονταν για 3D ανακατασκευή και ανάλυση. Η 3D υπερηχοκαρδιογραφία με συντονισμό επέτρεπε τη διαγνωστικά αποδεκτή απεικόνιση όλων των καρδιακών δομών σε 7 από τα 22 έμβρυα. Παρόλη την ανεπαρκή ποιότητα εικόνων και την κατωτερότητα του 3D στις περισσότερες καρδιοπάθειες, οι ερευνητές κατόρθωσαν να αποκομίσουν μια καρδιοπαθολογοανατομική εικόνα των ανωμαλιών σε ορισμένους ασθενείς και να την παρουσιάσουν στα μέλη εκείνα της περιγεννητικής ομάδας που συμμετείχε στην παρακολούθηση και θεραπεία των νεογνών. Τα αρχικά τους αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αλλά ανά-

μικτα και υπογράμμιζαν την ανάγκη για βελτίωση της ευκρίνειας των εικόνων.

### **Συσχέτιση απεικονίσεων στο χώρο και στο χρόνο: STIC (Spatio-Temporal Image Correlation)**

Το 2003 εισήχθη μια καινούρια μέθοδος εκτίμησης της εμβρυϊκής καρδιάς το λεγόμενο STIC, ή αλλιώς η συσχέτιση των απεικονίσεων στο χώρο και στο χρόνο.<sup>22</sup> Η διάρκεια της απεικόνισης ποικίλλει από 7.5-15 δευτερόλεπτα και επιτρέπει τη συλλογή πληροφοριών από έναν ολόκληρο καρδιακό κύκλο. Το STIC υπολογίζει τη μέση καρδιακή συχνότητα και οι εικόνες μέσα στον όγκο που αποδόθηκε ταξινομούνται ανάλογα με την χρονική τους συσχέτιση με τον καρδιακό κύκλο. Το αποτέλεσμα είναι η απεικόνιση ενός ολόκληρου καρδιακού κύκλου σε κίνηση σε ένα ατελείωτο τρισδιάστατο cineloop.

Το STIC γίνεται σε δύο βήματα: πρώτα συλλέγονται με την τρισδιάστατη κεφαλή των υπερήχων στοιχεία που περιέχουν μεγάλο αριθμό δισδιάστατων εικόνων, τη μια πίσω από την άλλη. Στη συνέχεια το σύστημα οργανώνει αυτά τα στοιχεία με βάση τη συσχέτισή τους στο χώρο και στο χρόνο. Εάν το 3D αρχίσει στο επίπεδο των 4 κοιλοτήτων και επιλεχθεί γωνία σάρωσης από 15-40 μοίρες, τότε τα στοιχεία που θα περιλαμβάνονται στο STIC θα περιέχουν την άνω κοιλία, τις 4, τις 5 κοιλοότητες, τα τρία αγγεία και το αορτικό τόξο.

Ο καρδιακός κύκλος μπορεί να μεγεθυνθεί, να ειδωθεί frame by frame, να περιστραφεί και να εξετασθεί σε όλον τον όγκο που αποδόθηκε. Τα κύρια πλεονεκτήματα του STIC είναι η καλύτερη απεικόνιση, η δυνατότητα εξέτασης της καρδιάς από σημεία κατώτερα και υψηλότερα σημεία της τομής των 4 κοιλοτήτων, και η εύκολη απεικόνιση των μεγάλων αγγείων με απλή περιστροφή γύρω από ένα σημείο αναφοράς κατά τον x, y και z άξονα. Τα στοιχεία μπορούν να αποθηκευθούν ψηφιακά, να αναδημιουργηθούν και να αποσταλούν σε απομακρυσμένα σημεία για εκτίμηση από ειδικό στην εμβρυϊκή καρδιολογία.

Το 2003 οι Vinals και συν δημοσιεύθηκαν

προοπτική μελέτη 100 εμβρύων ηλικίας 18-37 εβδομάδων με STIC και αναφέρουν ποσοστό επιτυχούς πλήρους απεικόνισης της καρδιάς της τάξης του 95%.<sup>23</sup> Το 2005 η ίδια ομάδα ερευνητών δημοσίευσε προοπτική μελέτη 50 εγκύων γυναικών πάνω στη χρήση και αποστολή του STIC με τηλεϊατρική.<sup>24</sup> Η σάρωση της καρδιάς γινόταν από 2 εξεταστές χωρίς εμπειρία στην εμβρυϊκή υπερηχοκαρδιογραφία. Στη συνέχεια τα στοιχεία αποστέλλονταν με το διαδίκτυο σε τρίτο εξεταστή έμπειρο στην υπερηχοκαρδιογραφία. Ο τελευταίος μπόρεσε να προβεί σε πλήρη καρδιακή εξέταση στο 86% και 95% των περιπτώσεων (από τα στοιχεία του πρώτου και δεύτερου εξεταστή αντίστοιχα), να διαγνώσει δύο περιπτώσεις μειζόνων συγγενών καρδιοπαθειών, να χαρακτηρίσει ένα τρίτο ύποπτο περιστατικό σαν φυσιολογικό και να προβεί τέλος σε συμβουλευτική των γονέων.

### Σάρωση της καρδιάς<sup>25</sup>

Η υψηλής ποιότητας λήψη είναι απαραίτητη για την επιτυχή 4D εξέταση της καρδιάς. Έτσι, η 2D εικόνα, το έγχρωμο και power Doppler πρέπει να έχουν προσαρμοσθεί με τρόπο τέτοιο που να επιτρέπει την καλύτερη δυνατή απεικόνιση πριν αρχίσει η τρισδιάστατη σάρωση. Η περιοχή ενδιαφέροντος (region of interest: ROI) επιλέγεται από τον εξεταστή, και τοποθετείται έτσι ώστε να περιέχει την καρδιά ή και άλλα όργανα (π.χ. στόμαχο, σπονδυλική στήλη) πριν αρχίσει η σάρωση (εικόνα 9). Για την εξέταση των 4 και 5 κοιλοτήτων, των τριών αγγείων και της τραχείας η σάρωση γίνεται με εγκάρσια τομή στον εμβρυϊκό θώρακα ενώ για την εξέταση του αορτικού τόξου και του βοτάλλειου πόρου, η σάρωση γίνεται κατά τον επιμήκη άξονα. Η περιοχή ενδιαφέροντος καθορίζει το εύρος και ύψος του σετ των ογκομετρικών πληροφοριών (πλάνα x- και y) ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή ενδιαφέροντος τόσο μικρότερη είναι η ευκρίνεια. Η γωνία σάρωσης καθορίζει το βάθος (πλάνο z-). Για έμβρυα στο δεύτερο τρίμηνο της κύησης γωνίες σάρωσης μεταξύ 20ο και 25ο επαρκούν συνήθως για να περιληφθεί ο στόμαχος, η καρδιά

και τα μεγάλα αγγεία μέσα στο σετ των τρισδιάστατων πληροφοριών. Η διάρκεια της σάρωσης επιλέγεται από τον εξεταστή και κυμαίνεται συνήθως από 7.5-15 s. Η διάρκεια της σάρωσης καθορίζει την ταχύτητα με την οποία η κεφαλή σαρώνει την περιοχή ενδιαφέροντος. Όσο πιο παρατεταμένη είναι η διάρκεια σάρωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ευκρίνεια, αλλά και τόσο αυξάνει η πιθανότητα κίνησης του εμβρύου και εισαγωγής artifacts.

Το STIC επιτρέπει την απεικόνιση σε πολλαπλά επίπεδα (multiplanar imaging) αλλά και την απόδοση όγκου (volume rendering) της καρδιάς.<sup>26,27</sup>

### Απεικόνιση σε πολλαπλά επίπεδα (multiplanar imaging)

Στην απεικόνιση σε πολλαπλά επίπεδα τα τρισδιάστατα σετ πληροφοριών εμφανίζονται στην οθόνη σαν τρία κάθετα μεταξύ τους πλάνα (A, B και C) που εκπροσωπούν τα επίπεδα X, Y και Z αντίστοιχα (εικόνα 10). Η πιο απλή προσέγγιση ενός όγκου πληροφοριών του STIC είναι η εκτύλιξη (scrolling) μέσα στον όγκο από τα κάτω προς τα πάνω κατά μήκος του αρχικού επιπέδου σάρωσης. Η εκτύλιξη αυτή επιτρέπει τον γρήγορο προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ της κορυφής της καρδιάς και του στομάχου, την εκτίμηση των 4 κοιλοτήτων και, στις περισσότερες περιπτώσεις, των 5 κοιλοτήτων και των τριών αγγείων. Η διαδικασία αυτή έγινε πρόσφατα αυτόματη με την ταυτόχρονη απεικόνιση πολλαπλών τομών που ενσωματώθηκε στη συσκευή των τρισδιάστατων υπερηχοτομογράφων και ονομάστηκε Τομογραφική Υπερηχογραφική Απεικόνιση (TUI). Με την τεχνική αυτή, που είναι γνωστή από την αξονική και μαγνητική τομογραφία, ο εξεταστής μπορεί να εξετάσει ταυτόχρονα παράλληλες τομές της παλλόμενης καρδιάς. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών πλάνων μπορεί να προσαρμοσθεί από 0.1-10 mm. Η TUI μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο με B-mode όσο και με Doppler ενώ επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση των διαστάσεων των καρδιακών διαμερισμάτων και μεγάλων αγγείων είτε σε τελο-



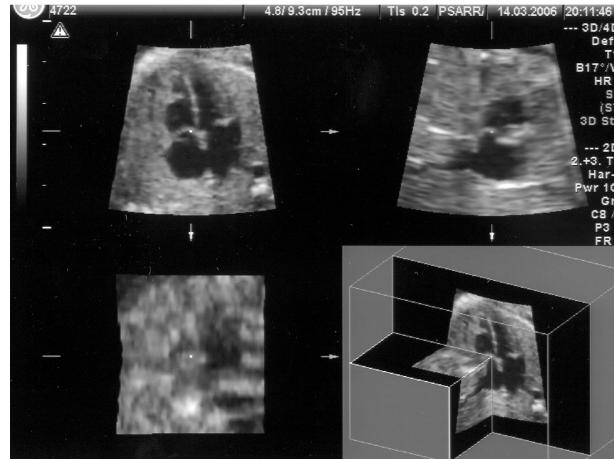


**Εικόνα 9:** Περιοχή ενδιαφέροντος (ROI).

διαστολική είτε σε τελο-συστολική φάση. Η πρόσφατη αυτή τεχνολογική εξέλιξη οδήγησε ορισμένους ερευνητές στην πεποίθηση ότι στο μέλλον θα υπάρξει δυνατότητα η ανάλυση των καρδιακών πλάνων να γίνεται αυτόματα.<sup>28</sup>

**Απεικόνιση μεγάλων αγγείων, αορτικού τόξου και βοτάλλειου πόρου**

Το 2003, προτάθηκε και αργότερα αξιολογήθηκε μια τεχνική απεικόνισης των εξόδων της δεξιάς και αριστερής κοιλίας από σετ πληροφοριών όγκου που λήφθηκαν με STIC.<sup>29,30</sup> Η εξέταση αρχίζει με την απεικόνιση στο πλάνο A (εγκάρσια τομή) των 4 κοιλοτήτων (ο άξονας της καρδιάς είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση πρόπτωσης των υπερήχων ενώ η αριστερή πλευρά της καρδιάς βρίσκεται στο αριστερό τμήμα της οθόνης). Η κουκίδα αναφοράς (reference dot) τοποθετείται στον σταυρό της καρδιάς τόσο στο πλάνο A όσο και στο πλάνο B (επιμήκης τομή) και η εικόνα συστρέφεται κατά τον z-άξονα κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού μέχρι να σχηματισθεί γωνία 30-40° μεταξύ της κορυφής της καρδιάς και της κεφαλής των υπερήχων. Στη συνέχεια η κουκίδα αναφοράς τοποθετείται στο κέντρο του μεσοκοιλιακού διαφράγματος και η εικόνα στρέφεται κατά τον γ-άξονα καταδεικνύοντας την έξοδο της αριστερής κοιλίας με το στέλεχος της αορτής να συνεχεται με το μεσοκοιλιακό διά-



**Εικόνα 10:** Απεικόνιση σε πολλαπλά επίπεδα.

φραγμα προς τα μπρος και τη μιτροειδή βαλβίδα προς τα πίσω. Εάν, στη συνέχεια, η κουκίδα αναφοράς τοποθετηθεί πάνω από την αορτική βαλβίδα, τότε στο πλάνο B θα απεικονισθεί ο βραχύς άξονας της εξόδου της δεξιάς κοιλίας με το στέλεχος της πνευμονικής αρτηρίας.

**Απεικόνιση αορτικού τόξου και βοτάλλειου πόρου**

Η απεικόνιση του αορτικού τόξου και του βοτάλλειου πόρου γίνεται καλύτερα με επιμήκεις τομές στον εμβρυϊκό θώρακα (πλάνο A). Η τεχνική συστηματικής απεικόνισης των καρδιακών τόξων από τρισδιάστατο σετ πληροφοριών περιγράφηκε για πρώτη φορά το 2001.<sup>17</sup> Η τοποθέτηση της κουκίδας αναφοράς στο κέντρο της κατιούσας αορτής μπροστά από την σπονδυλική στήλη στο πλάνο B (εγκάρσια τομή) έχει σαν αποτέλεσμα την απεικόνιση του αορτικού τόξου στο πλάνο A. Για την κατάδειξη του βοτάλλειου πόρου αρκεί η συστροφή του πλάνου B κατά τον z-άξονα με κατεύθυνση όμοια με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

**Τεχνική συστροφής (the "spin" technique)**

Το 2004 οι DeVore και συν. πρότειναν μια απλή τεχνική απεικόνισης οποιασδήποτε καρδιακής δομής.<sup>31</sup> Η κουκίδα αναφοράς τοποθετείται στο κέντρο της καρδιακής δομής και το σετ των τρισδιάστατων πληροφοριών

συστρέφεται κατά τον γ-άξονα μέχρι να απεικονισθεί η ολότητα της υπό εξέταση καρδιακής δομής. Για παράδειγμα: στην τομή των 5 κοιλοτήτων προσδιορίζεται η αορτή, η αορτική βαλβίδα και τα αριστερά και δεξιά διαμερίσματα της καρδιάς. Για να «ανοίξει» το αορτικό τόξο, η κουκίδα αναφοράς τοποθετείται πάνω από την αορτική βαλβίδα. Η περιστροφή της εικόνας κατά τον γ-άξονα καταλήγει στην απεικόνιση του αορτικού τόξου χωρίς όμως να αναγνωρίζονται εύκολα οι κλάδοι του προς την κεφαλή και τα άνω άκρα. Για να αναγνωρισθούν τα αγγεία αυτά, η κουκίδα αναφοράς πρέπει να τοποθετηθεί πάνω στο εγκάρσιο αορτικό τόξο και να περιστραφεί μέχρι το τόξο να αναγνωρισθεί σε εγκάρσια τομή του θώρακα. Ακολουθεί στροφή μέχρι το εγκάρσιο τόξο να είναι παράλληλο προς τον γ-άξονα. Στη συνέχεια η κουκίδα αναφοράς τοποθετείται στο κέντρο του εγκάρσιου τόξου και η εικόνα περιστρέφεται πάλι κατά τον γ-άξονα. Στην τομή αυτή εύκολα αναγνωρίζονται οι κλάδοι του αορτικού τόξου προς την κεφαλή και τα άνω άκρα. Για να αναγνωρισθούν οι κλάδοι της πνευμονικής αρτηρίας, η κουκίδα αναφοράς τοποθετείται στη δεξιά πνευμονική αρτηρία και περιστρέφεται κατά τον γ-άξονα. Στη συνέχεια η κουκίδα τοποθετείται στο κύριο στέλεχος της πνευμονικής αρτηρίας και συστρέφεται μέχρι να αναγνωρισθεί ο διχασμός αυτής. Από το σημείο αυτό και εκτυλίσσοντας την εικόνα

προς τα πάνω μπορεί να απεικονισθεί ο βοτάνειος πόρος σε όλο του το μήκος καθώς αυτός συνδέεται με την κατιούσα αορτή.

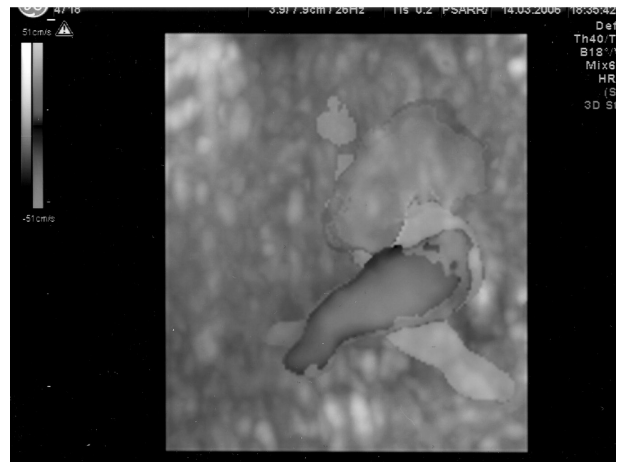
### Απόδοση όγκου (volume rendering)

Ο τρόπος αυτός απεικόνισης προσφέρει πολλές επιλογές ανάλογα με τον τύπο πληροφοριών που αναζητούνται. Έτσι με την απεικόνιση επιφανείας (surface rendering) οι εικόνες μπορεί να είναι παρόμοιες με αυτές της δισδιάστατης υπερηχοκαρδιογραφίας (εικόνα 11) ή εντελώς καινούργιες όπως η en face ή η βασική απεικόνιση της καρδιάς (γνωστή σαν ματιά του χειρουργού).<sup>32</sup> Ένας άλλος ενδιαφέρον τρόπος απεικόνισης είναι αυτός της ελάχιστης έντασης (minimum intensity mode) με τον απεικονίζονται μόνο οι ελάχιστες φαιές τιμές της υπό εξέταση περιοχής. Με τον τρόπο αυτό οι ανηχοϊκές δομές εμφανίζονται σαν μαύρη τρισδιάστατη προβολή μέσα σε έναν περισσότερο ηχογενή ιστό. Οι εικόνες είναι παρόμοιες με αυτές μιας ακτινογραφίας ή μιας μαγνητικής τομογραφίας.<sup>33</sup>

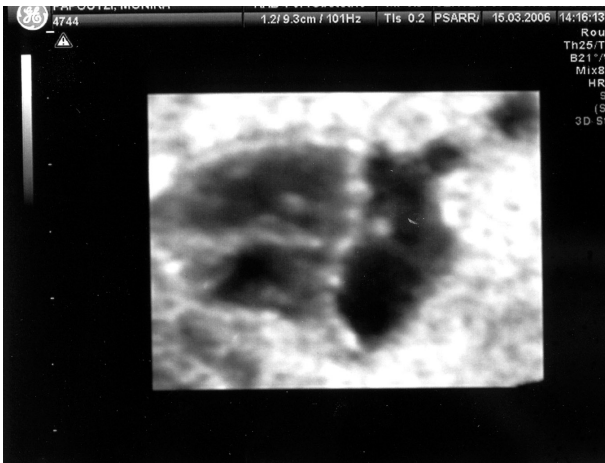
Η χρήση του έγχρωμου και power Doppler επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή της αιματικής ροής. Στην glass body απεικόνιση καταδεικνύονται ταυτόχρονα έγχρωμες και ασπρόμαυρες πληροφορίες (εικόνα 12) ενώ με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία (ανάστροφη και B-flow απεικόνιση) μπορούν να παραχθούν «πλαστικά εκμαγεία» και αγγειογράμματα της αιματικής ροής στην



Εικόνα 11: Απεικόνιση επιφανείας.



Εικόνα 12: Glassbody απεικόνιση.



**Εικόνα 13:** Απεικόνιση επιφανείας 4 κοιλοτήτων.

καρδιά, στα μεγάλα αγγεία και στο φλεβικό σύστημα με βελτιωμένο προσανατολισμό στο χώρο.

#### Απεικόνιση ενδοκαρδιακών δομών

Η απεικόνιση επιφανείας (surface tendering) των τεσσάρων κοιλοτήτων μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε τις εν τω βάθει σχέσεις στην καρδιά. Η απεικόνιση μπορεί να γίνει σαν μια παχιά φέτα των τεσσάρων κοιλοτήτων (εικόνα 13) ή να περιλαμβάνει όλο το πάχος των καρδιακών διαμερισμάτων με απεικόνιση του οπίσθιου τοιχώματος. Η τομή των τεσσάρων κοιλοτήτων μπορεί να είναι παθολογική σε δομικές ανωμαλίες που μεταβάλλουν την αιματική ροή σε κάποια από τα καρδιακά διαμερίσματα ή σε περιπτώσεις παθολογικής ανατομίας. Όταν ανιχνεύεται μία συγγενής διαμαρτία είναι απαραίτητη η ακριβής διάγνωση για την κατάλληλη συμβουλευτική. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να χρειασθούν ώρες για να επιτευχθούν όλες οι απαραίτητες τομές για τη σωστή διάγνωση. Η αιτία γι αυτό είναι ότι πρέπει να εξετασθεί ξεχωριστά κάθε σημείο της καρδιάς και των μεγάλων αγγείων όπως επίσης η σχέση τους με τις υπόλοιπες καρδιακές δομές. Το STIC μπορεί να ελαττώσει τον απαιτούμενο χρόνο εξέτασης και να βελτιώσει την ικανότητα προσδιορι-



**Εικόνα 14:** Απεικόνιση της διασταύρωσης των μεγάλων αγγείων με έγχρωμο Doppler. Η πνευμονική αρτηρία (το αγγείο που διχάζεται και απεικονίζεται με μπλέ χρώμα) βρίσκεται μπροστά από την αορτή (απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα).

σμού σύνθετων ενδοκαρδιακών σχέσεων. Το 2003 οι Concalves και συν δημοσίευσαν τα αποτελέσματά τους σε 69 έμβρυα, 18 από τα οποία είχαν καρδιακές ανωμαλίες 133. Τόσο η απεικόνιση σε πολλαπλά επίπεδα όσο και η απεικόνιση επιφανείας ήταν εφικτή με την τεχνολογία STIC. Πραγματώθηκαν καινούργιες λήψεις συγκεκριμένων καρδιακών δομών, όπως π.χ. η επιμήκης απεικόνιση του μεσοκοιλιακού διαφράγματος που διευκόλυνε την εκτίμηση της θέσης και έκτασης ενός μεσοκοιλιακού ελλείμματος, ενώ η απεικόνιση επιφανείας των κολποκοιλιακών βαλβίδων βοήθησαν στο διαχωρισμό φυσιολογικών από παθολογικές καταστάσεις.

#### Έγχρωμο Doppler

Η εξέταση των μεγάλων αγγείων είναι αναπόσπαστο στοιχείο του υπερηχογραφικού ελέγχου. Φυσιολογικά, η αορτή συνδέεται με την αριστερή κοιλία και η πνευμονική αρτηρία με την δεξιά ενώ τα αγγεία διασταυρώνονται στο επίπεδο των βαλβίδων τους. Η διασταύρωση των μεγάλων αγγείων εξετάζεται με διαδοχικά πλάνα με το 2D και αναπαριστάται αυτόματα στο μυαλό του εξεταστή. Η διασταύρωση των μεγάλων αγγείων μπορεί να εκτιμηθεί με το 3D και με επιπρόσθετη χρήση του έγχρωμου Doppler με τρόπο που

δεν έχει περιγραφεί μέχρι τώρα στην προγεννητική διάγνωση<sup>35,36</sup> (εικόνα 14). Σε έμβρυο με μετάθεση μεγάλων αγγείων, η παράλληλη πορεία τους μπορεί να καταδειχθεί ενώ με την χρήση της ανάστροφης απεικόνισης μπορεί να επιτευχθεί αναπαράσταση των σχέσών τους στο χώρο.<sup>37</sup>

Το 2004 οι Chaoui και συν δημοσίευσαν προοπτική μελέτη 35 φυσιολογικών εμβρύων και 27 εμβρύων με συγγενείς καρδιοπάθειες. Στόχος της μελέτης ήταν να εκτιμηθούν οι δυνατότητες του έγχρωμο Doppler STIC στην εξέταση τόσο της φυσιολογικής όσο και της παθολογικής καρδιάς. Η εξέταση ήταν δυνατή σε όλες τις περιπτώσεις. Τα τρία συνιστώμενα επίπεδα για το έγχρωμο Doppler (4, 5 κοιλότητες, τρία αγγεία) μπόρεσαν να καταγραφούν σε 31 από τα 35 φυσιολογικά έμβρυα και σε 24 από τα 27 έμβρυα με συγγενή καρδιοπάθεια.<sup>38</sup>

Οι Concalves και συν τον ίδιο χρόνο δημοσίευσαν στο Journal of Ultrasound in Medicine τα αποτελέσματά τους σε 7 έμβρυα (2 από τα οποία είχαν συγγενή καρδιοπάθεια).<sup>39</sup> Το συμπέρασμά τους ήταν ότι το έγχρωμο Doppler STIC μπορεί να διευκολύνει την απεικόνιση των μεγάλων αγγείων και να βελτιώσει την εκτίμηση της θέσης και έκτασης των μεσοκοιλιακών ελλειμμάτων. Παρόμοιες παρατηρήσεις με πολύ εντυπωσιακές εικόνες για τη χρησιμότητα του STIC στη διάγνωση και εκτίμηση του μεγέθους των μεσοκοιλιακών ελλειμμάτων, που συχνά παραβλέπονται με την κλασική δισδιάστατη υπερηχογραφία, δημοσιεύθηκαν το 2005 από δύο άλλες ανεξάρτητες ομάδες ερευνητών στο Ισραήλ και στην Ιταλία αντίστοιχα.<sup>40,41</sup>

### Ανάστροφη απεικόνιση

Η ανάστροφη απεικόνιση έχει εισαχθεί πρόσφατα στην κλινική πράξη σαν καινούριο εργαλείο για την τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας των δομών που είναι γεμάτες με υγρό. Πρόκειται για ένα αλγόριθμο που μεταμορφώνει τις ηχοδιαφανείς δομές σε στερεά voxel. Έτσι, ανηχοϊκές δομές όπως τα διαμερίσματα της καρδιάς, ο αυλός των αγγείων, ο στόμαχος και η ουροδόχος κύστη εμφανίζο-

νται υπερηχογενείς ενώ δομές που είναι φυσιολογικά υπερηχογενείς (π.χ. τα οστά) γίνονται ανηχοϊκές. Η εφαρμογή της αντίστροφης απεικόνισης στα μεγάλα αγγεία αποδίδει εκμαγεία που αντιστοιχούν στις σχέσεις στο χώρο των αγγείων τόσο μεταξύ τους όσο και με τα διαμερίσματα της καρδιάς<sup>42,43</sup> (εικόνες 15-16). Καθώς η τεχνική δεν χρησιμοποιεί έγχρωμο ή power Doppler δεν επηρεάζεται από παράγοντες όπως η γωνία πρόπτωσης των υπερήχων, ή η ένταση του Doppler. Η τεχνική αυτή δεν διαφοροποιεί τα αγγεία από άλλα κοίλα σπλάγχνα και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν οι σχέσεις της καρδιάς και των μεγάλων αγγείων με σπλάγχνα όπως ο οισοφάγος και το στομάχι. Είναι χρήσιμη στη προγεννητική διάγνωση συγγενών διαμαρτιών που απαιτούν ακριβή περιγραφή της θέσης των σπλάγχων όπως τα σύνδρομα ετεροταξίας. Το 2005 δημοσιεύθηκαν 3 περιπτώσεις διακοπτόμενης κάτω κοίλης φλέβας με άζυγο ή ημιάζυγο φλέβα που αναπαραστάθηκαν με 3D ανάστροφη απεικόνιση.<sup>44</sup> Η ανάστροφη απεικόνιση με STIC είναι επίσης χρήσιμη στην απεικόνιση VSD καθώς μπορεί να καταγραφεί η ανώμαλη διαφυγή αίματος από το μεσοκοιλιακό διάφραγμα.<sup>41</sup> Το μειονέκτημα της μεθόδου παραμένει το γεγονός ότι μπορεί να επηρεασθεί από εξωτερικούς παράγοντες όπως κινήσεις της μητέρας ή του εμβρύου, ή διαταραχές του καρδιακού ρυθμού.

### B- flow

Η B-flow απεικόνιση αποτελεί μέθοδο καταγραφής της αιματικής ροής χωρίς χρήση Doppler, η οποία σε συνδυασμό με την τεχνολογία STIC μπορεί να παράγει αγγειογράμματα του εμβρυϊκού καρδιαγγειακού συστήματος. Το 2005 δημοσιεύθηκαν από τους PooH και Kogai τα πρώτα αποτελέσματα με τη χρήση της σε 65 έμβρυα ηλικίας 21-39 εβδομάδων.<sup>45</sup> Σε 38 από 65 περιπτώσεις ήταν δυνατή η ανίχνευση όλων των εξωκαρδιακών τμημάτων του αορτικού τόξου, της κατιούσης αορτής, της κάτω κοίλης φλέβας, του φλεβώδους πόρου και της ηπατικής φλέβας στις ανακατασκευασμένες τρισδιάστατες εικόνες.



**Εικόνα 15:** Ανάστροφη απεικόνιση των 4-κοιλοτήτων.

Και στις 65 περιπτώσεις ήταν δυνατή η αναγνώριση δύο τουλάχιστον πνευμονικών φλεβών, ενώ τρεις φλέβες ανιχνεύθηκαν σε 28 έμβρυα (43%) και τέσσερις φλέβες σε 3 (4.6%). Οι ερευνητές καταλήγουν ότι η B-flow απεικόνιση προσφέρει μεγάλες δυνατότητες στη διάγνωση ανωμαλιών μικρών καρδιακών αγγείων όπως και σε περιπτώσεις ολικής ανώμαλης επαναφοράς των πνευμονικών φλεβών. Την ίδια χρονιά οι Goncalves και συν δημοσιεύουν την εμπειρία τους με την B-flow και την ανάστροφη απεικόνιση σε 23 έμβρυα με συγγενείς καρδιοπάθειες.<sup>43</sup> Οι δύο αυτές απεικονιστικές μέθοδοι είχαν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή «ψηφιακών εκμαγείων» στα οποία καταδεικνύονταν οι σχέσεις στο χώρο των καρδιακών εξόδων όπως επίσης και οι συνδέσεις των μεγάλων αγγείων με τις κοιλίες. Οι σχέσεις στο χώρο και οι επικοινωνίες των καρδιακών δομών δεν μπορούν να καταδειχθούν με την κλασσική 2D υπερηχοκαρδιογραφία.

#### **Υπερηχοκαρδιογραφία αληθούς χρόνου : Real time 3DE**

Πέρα από τις τεχνικές ανακατασκευής όπως το STIC, έχει περιγραφεί πρόσφατα και η τρισδιάστατη live υπερηχοκαρδιογραφία. Σε αυτή χρησιμοποιείται κεφαλή matrix που μεταδίδει ταυτόχρονα πολλαπλές δέσμες και καταλήγει στην απεικόνιση πυραμοειδών όγκων σε αληθή χρόνο. Δεν υπάρχει ανάγκη



**Εικόνα 16:** Ανάστροφη απεικόνιση του αορτικού τόξου.

για συντονισμό των εικόνων με τον καρδιακό κύκλο ενώ η πιθανότητα artifacts που οφείλονται σε κινήσεις του εμβρύου ή της μητέρας είναι μειωμένη.

Τον Μάιο του 2005 δύο ανεξάρτητες ομάδες δημοσίευσαν τις δυνατότητες της live 3D υπερηχοκαρδιογραφίας στο έμβρυο. Η πρώτη ομάδα από την Γαλλία εξέτασε 60 έμβρυα (44 φυσιολογικά και 16 μη φυσιολογικά) με κεφαλή matrix.<sup>46</sup> Η απεικόνιση της καρδιάς ήταν δυνατή στο 93% και γίνονταν είτε σε δύο πλάνα (bi-plane) είτε σε real time. Ο πρώτος τρόπος επιτρέπει με χρήση πλάγιας και κάθετης περιστροφής να απεικονισθούν οι φυσιολογικές καρδιακές δομές από ένα επίπεδο αναφοράς. Ο δεύτερος τρόπος επιτρέπει την απεικόνιση επιφάνειας της εμβρυϊκής καρδιάς σε real time. Κόβοντας μέσα στην πυραμίδα του όγκου, μετά από την απεικόνιση του αορτικού τόξου, μπορεί να καταδειχθεί ο επιμήκης άξονας των κοιλίων ή να παραχθούν en face τομές των βαλβίδων. Οι ερευνητές αυτοί βρήκαν ότι το live 3D είναι χρήσιμο στην εκτίμηση πολλαπλών όγκων σε δύο περιπτώσεις ραβδομυοσαρκωμάτων, στην εκτίμηση του μεγέθους και της λειτουργίας των κοιλίων σε περιπτώσεις μυοκαρδιακής δυσλειτουργίας και στην ανάλυση του μηχανισμού παλινδρόμησης και απόφραξης της πνευμονικής αρτηρίας σε δύο περιπτώσεις Ebstein.

Η δεύτερη ομάδα από την Β. Καλιφόρνια δη-

μοσίευσε την ίδια χρονιά τα δικά της αποτελέσματα με 3DE.<sup>47</sup> Εξετάστηκαν από τέσσερις εξεταστές 18 έμβρυα (11 φυσιολογικά και 7 μη φυσιολογικά) ενώ η δισδιάστατη υπερηχογραφία θεωρήθηκε το χρυσό μέτρο σύγκρισης. Σαν μέθοδος η μελέτη αυτή βρήκε ότι η live 3DE έχει 93% ευαισθησία για την διάγνωση συγγενών καρδιοπαθειών αλλά πολύ χαμηλή ειδικότητα (45%) και υψηλά ψευδώς θετικά αποτελέσματα. Οι μελετητές καταλήγουν ότι υπάρχει ανάγκη να περιορισθούν τα artifacts που σχετίζονται με την γωνία απεικόνισης και την επεξεργασία του live 3D, να ολοκληρωθεί μεγαλύτερη προοπτική μελέτη και υπογραμμίζουν ότι θα υπάρξει μεγάλη καμπύλη εκμάθησης μέχρι η τεχνική αυτή να μπορέσει να ενσωματωθεί στην καθημερινή κλινική πράξη.

### Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν μάρτυρες σημαντικών εξελίξεων στην εξέταση της εμβρυϊκής καρδιάς. Οι νέες τεχνικές που είναι σε κλινική δοκιμή αφορούν βελτιωμένη απεικόνιση με εξελιγμένες κεφαλές υπερήχων και χρήση αρμονικής. Η καλύτερη αυτή απεικόνιση είχε σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση της διάγνωσης προς τις 12-14 εβδομάδες της κύησης και αναμένεται ότι στο μέλλον η προγεννητική διάγνωση θα είναι δυνατή κατά το στάδιο της εμβρυολογικής ανάπτυξης (πριν τις 10 εβδομάδες). Το έγχρωμο Doppler έχει καταστεί αναπόσπαστο στοιχείο της εμβρυϊκής υπερηχοκαρδιογραφίας ενώ καταβάλλονται προσπάθειες η μαγνητική τομογραφία να ενσωματωθεί στην εμβρυϊκή καρδιολογία. Σε ένα πρόσφατο άρθρο τους οι Bhat και Sahn δηλώνουν ότι το «3D και το 4D αποτελούν πολλά υποσχόμενες τεχνικές».<sup>48</sup> Οι καινούριες τεχνικές μπορούν τώρα ή στο άμεσο μέλλον να αποτελέσουν ένα καινούργιο μέσο όχι μόνο απεικόνισης της εμβρυϊκής καρδιάς αλλά και μελέτης της. Η χρησιμοποίηση των καινούργιων πολυδιάστατων μέσων σε συνδυασμό με τις κλασσικές μεθόδους περιμένουμε ότι θα προσφέρει συνεργικά αποτελέσματα έτσι ώστε το όνειρο της παρουσίας της εμβρυϊκής καρδιάς με σαφείς μορφολογι-

κές και λειτουργικές πληροφορίες για τους κλινικούς ιατρούς να γίνει κάποτε πραγματικότητα.

## Three dimensional ultrasound application in obstetrics. Part 2: 3D and 4D ultrasonography of the fetal heart

A. Psara, B. Karagiannis

3rd Obstetrics and Gynecological Clinic,  
Aristotle University of Thessaloniki  
Hipokratio General Hospital

Correspondence: A. Psara, 10 Pavlou Mela str.,  
54622 Thessaloniki  
Tel.: 2310-274800, Fax: 2310-240997  
E-mail: nat@kie.gr

### Summary

Major advances in 3D ultrasonography of the fetal heart have taken place during the last decade. Initially, 3D imaging of the fetal heart was static with images that did not move and contained information from various parts of the cardiac cycle. Then, gating techniques developed that reduced artifacts and allowed the examination of one heart cycle in the 3D data set. The STIC (Spatio-Temporal Imaging) technology enables the indirect, offline analysis of the fetal heart and gives the possibility for multiplanar analysis as well as volume rendering. Color and power Doppler allow the simultaneous display of blood flow while new techniques such as the inversion mode and B-flow result in digital casts and angiograms of the fetal cardiovascular system with improved spatial orientation. In the present article, the principles of classic 2D echocardiography as well as the possibilities of 3D and 4D ultrasonography in the examination of the fetal heart are presented.

*Key words:* fetal echocardiography, 3D ultrasonography, 4D ultrasonography, STIC, real time 3D

## Βιβλιογραφία

1. Hoffman JIE, Christianson R. Congenital heart disease in a cohort of 19,502 births with long-term follow-up. *Am J Cardiol.* 1978 Oct;42(4):641-7.
2. Allan LD. Fetal cardiology. *Ultrasound Obstet Gynecol* 1994;4:441.
3. Buskens E, Grobbee DE, Frohn-Mulder IM, Stewart PA, Juttman RE, Wladimiroff JW, Hess J. Efficacy of routine fetal ultrasound screening for congenital heart disease in normal pregnancy. *Circulation* 1996;94:67.
4. Grandjean H, Larroque D, Levi S. The performance of routine ultrasonographic screening of pregnancies in the Eurofetus Study. *Am J Obstet Gynecol.* 1999 Aug;181(2):446-54.
5. Garne E, Stoll C, Clementi M; Euroscan Group. Evaluation of prenatal diagnosis of congenital heart diseases by ultrasound: experience from 20 European registries. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2001 May;17(5):386-91.
6. Sadler T.W: Langman's Medical Embryology. Lippincott Williams & Wilkins eds 2004; 223-274
7. Huggon IC. Practical guide to fetal echocardiography. *Prenat Neonat Med* 2001;6:38-53.
8. Allan L. Technique of fetal echocardiography. *Pediatr Cardiol* 2004;25:223-33.
9. Yagel S, Cohen SM, Achiron R. Examination of the fetal heart by five short-axis views: a proposed screening method for comprehensive cardiac evaluation. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2001;17:367-9.
10. Chaoui R, McEwing R. Three cross-sectional planes for fetal color Doppler echocardiography. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003;22:3-10.
11. Nelson TR, Pretorius DH, Sklansky M, Hagen-Ansert S. Three-dimensional echocardiographic evaluation of fetal heart anatomy and function: acquisition, analysis, and display. *J Ultrasound Med.* 1996 Jan;15(1):1-9.
12. Deng J. Terminology of three-dimensional and four-dimensional ultrasound imaging of the fetal heart and other moving body parts. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003;22:336e44.
13. Meyer-Wittkopf M, Cook A, McLennan A, Summers P, Sharland GK, Maxwell DJ. Evaluation of three-dimensional ultrasonography and magnetic resonance imaging in assessment of congenital heart anomalies in fetal cardiac specimens. *Ultrasound Obstet Gynecol* 1996;8:303-308.
14. Zosmer N, Jurkovic D, Jauniaux E, Gruboeck K, Lees C, Campbell S. Selection and identification of standard cardiac views from three-dimensional volume scans of the fetal thorax. *J Ultrasound Med.* 1996 Jan;15(1):25-32.
15. Chang FM, Hsu KF, Ko HC, Yao BL, Chang CH, Yu CH, Liang RI, Chen HY. Fetal heart volume assessment by three-dimensional ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 1997 Jan;9(1):42-8.
16. Levental M, Pretorius DH, Sklansky MS, Budorick NE, Nelson TR, Lou K. Three-dimensional ultrasonography of normal fetal heart: comparison with two-dimensional imaging. *J Ultrasound Med.* 1998 Jun;17(6):341-8.
17. Bega G, Kuhlman K, Lev-Toaff A, Kurtz A, Wapner R. Application of three-dimensional ultrasonography in the evaluation of the fetal heart. *J Ultrasound Med.* 2001 Apr;20(4):307-13.
18. Deng J, Gardener JE, Rodeck CH, Lees WR. Fetal echocardiography in three and four dimensions. *Ultrasound Med Biol.* 1996;22(8):979-86.
19. Deng J, Birkett AG, Kalache KD, Hanson MA, Peebles DM, Linney AD. Conversion of umbilical arterial Doppler waveforms to cardiac cycle triggering signals: a preparatory study for online motion-gated three-dimensional fetal echocardiography. *Ultrasound Med Biol* 2001;27:51-9.
20. Sklansky MS, Nelson TR, Pretorius DH. Three-dimensional fetal echocardiography: gated versus nongated techniques. *J Ultrasound Med.* 1998 Jul;17(7):451-7.
21. Meyer-Wittkopf M, Cooper S, Vaughan J, Sholler G. Three-dimensional (3D) echocardiographic analysis of congenital heart disease in the fetus: comparison with cross-sectional (2D) fetal echocardiography. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2001;17:485-492.
22. Devore GR, Falkensammer P, Sklansky MS, Platt LD. Spatio-temporal image correlation (STIC): new technology for evaluation of the fetal heart. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003;22:380-7.
23. Vinals F, Poblete P, Guiliano A. Spatio-temporal image correlation (STIC): a new tool for the prenatal screening of congenital heart defects. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003;22:388-94.
24. Vinals F, Mandujano L, Vargas G, Giuliano A. Prenatal diagnosis of congenital heart disease using

- four-dimensional spatio-temporal image correlation (STIC) telemedicine via an Internet link: a pilot study. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2005;25:25-31.
25. Goncalves LF, Lee W, Espinoza J, Romero R. Examination of the fetal heart by four-dimensional (4D) ultrasound with spatio-temporal image correlation (STIC). *Ultrasound Obstet Gynecol* 2006;27:336-348.
  26. Devore GR. Three-dimensional and four-dimensional fetal echocardiography: a new frontier. *Curr Opin Pediatr* 2005;17:592-604.
  27. Chaoui R, Heling KS. New developments in fetal heart scanning: Three-and four-dimensional fetal echocardiography. *Sem Fetal Neonat Med* 2005;10:567-577.
  28. Abuhamad A. Automated multiplanar imaging: a novel approach to ultrasonography. *J Ultrasound Med* 2004;23: 573e6.
  29. Goncalves LF, Lee W, Chaiworapongsa T, Espinoza J, Schoen ML, Falkensammer P, Treadwell M, Romero R. Four-dimensional ultrasonography of the fetal heart with spatiotemporal image correlation. *Am J Obstet Gynecol* 2003;189: 1792-1802.
  30. Goncalves LF, Lee W, Espinoza J, et al. Four-dimensional fetal echocardiography with spatio-temporal image correlation (STIC): a systematic study of standard cardiac views assessed by different observers. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003;22(Suppl.):50.
  31. Devore GR, Polanco B, Sklansky MS, Platt LD. The 'spin' technique: a new method for examination of the fetal out-flow tracts using three-dimensional ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2004;24:72-82.
  32. Chaoui R, Hoffmann J, Heling KS. Basal cardiac view on 3D/4D fetal echocardiography for the assessment of AV valves and great vessels arrangement. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2004;22:228.
  33. Espinoza J, Goncalves LF, Lee W, et al. The use of the minimum projection mode in 4-dimensional examination of the fetal heart with spatiotemporal image correlation. *J Ultrasound Med* 2004;23:1337-48.
  34. Goncalves LF, Lee W, Chaiworapongsa T, Espinoza J, Schoen ML, Falkensammer P, Treadwell M, Romero R. Four-dimensional ultrasonography of the fetal heart with with spatiotemporal image correlation. *Am J Obstet Gynecol* 2003;189(6):1792-802.
  35. Chaoui R, Kalache KD, Hartung J. Application of three dimensional power Doppler ultrasound in prenatal diagnosis. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2001;17:22-9.
  36. Chaoui R, Kalache KD. Three-dimensional power Doppler ultrasound of the fetal great vessels. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2001;17:455-6.
  37. Goncalves LF, Espinoza J, Romero R, Lee W, Beyer B, Treadwell MC, Humes R. A systematic approach to prenatal diagnosis of transposition of the great arteries using 4-dimensional ultrasonography with spatiotemporal image correlation. *J Ultrasound Med* 2004;23:1225-31.
  38. Chaoui R, Hoffmann J, Heling KS. Three-dimensional (3D) and 4D Doppler fetal echocardiography using spatio-temporal image correlation (STIC). *Ultrasound Obstet Gynecol* 2004;23:535-45.
  39. Goncalves LF, Romero R, Espinoza J, Lee W, Treadwell M, Chintala K, Brandl H, Chaiworapongsa T. Four-dimensional ultrasonography of the fetal heart using color Doppler spatiotemporal image correlation. *J Ultrasound Med* 2004 23(4):473-81.
  40. Yagel S, Valsky DV, Messing B. Detailed assessment of fetal ventricular septal defect with 4D color Doppler ultrasound using spatio-temporal image correlation technology. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2005;25:97-8.
  41. Ghi T, Cera E, Segata M, Michelacci L, Pilu G, Pelusi G. Inversion mode spatio-temporal image correlation (STIC) echocardiography in three-dimensional rendering of fetal ventricular septal defects. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2005;26:679-8.
  42. Goncalves LF, Espinoza J, Lee W, Mazor M, Romero R. Three- and four-dimensional reconstruction of the aortic and ductal arches using inversion mode: a new rendering algorithm for visualization of fluid-filled anatomical structures. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2004;24:696-8.
  43. Goncalves LF, Espinoza J, Lee W, Nien JK, Hong JS, Santolaya-Forgas J, Major M, Romero R. A new approach to fetal echocardiography: digital casts of the fetal cardiac chambers and great vessels for detection of congenital heart disease. *J Ultrasound Med* 2005;24(4):415-24.
  44. Espinoza J, Goncalves LF, Lee W, Mazor M, Romero R. A novel method to improve prenatal diagnosis of abnormal systemic venous connections using three-



- and four-dimensional ultrasonography and "inversion mode". *Ultrasound Obstet Gynecol* 2005;25:428-434.
45. Pooh RK, Korai A. B-flow and B-flow spatio-temporal image correlation in visualizing fetal cardiac blood flow. *Croat Med J* 2005; 46(5):808-11.
  46. Acar P, Dulac Y, Taktak A, Abadir S. Real-time three-dimensional fetal echocardiography using matrix probe. *Prenat Diagn* 2005;25(5):370-5.
  47. Sklansky M, Miller D, Devore G, et al. Prenatal screening for congenital heart disease using real-time three-dimensional echocardiography and a novel 'sweep volume' acquisition technique. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2005;25:435-43.
  48. Bhat AH, Sahn DJ. Latest advances and topics in fetal echocardiography. *Curr Opin Cardiol* 2004;19:97e103.