

2

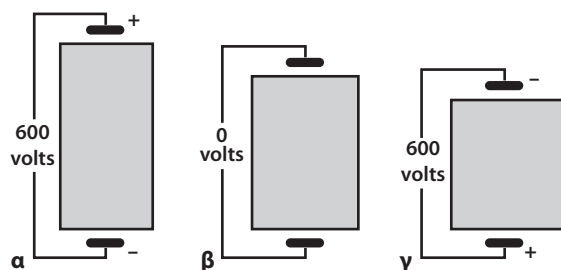
Βασικές γνώσεις από τη Φυσική των Υπερήχων και του Doppler

Βασικές γνώσεις σχετικά με τη φυσική των υπερήχων είναι απαραίτητες για την κατανόηση του φαινομένου και την εφαρμογή του στη διαγνωστική. Με τη χρήση των υπερήχων λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την υφή και τη λειτουργία διάφορων οργάνων του ανθρωπίνου σώματος. Οι πληροφορίες αυτές, που παίρνονται υπό μορφή εικόνων του σώματος σε διατομή, έχουν σχέση με τις ακουστικές ιδιότητες των ιστών. Το φαινόμενο των υπερήχων είναι παρόμοιο με εκείνο των ακουστών ήχων. Ο όρος «υπέρηχοι» χρησιμοποιείται, για να δηλώσει ήχο που το ύψος του είναι πολύ υψηλό για το ανθρώπινο αυτί, ώστε να ακουστεί. Η μέθοδος έτσι διαφέρει από τις άλλες διαγνωστικές τεχνικές όπως την αξονική τομογραφία (CT scanning), τη μαγνητική τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging – MRI), την τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (Positron Emmission Tomography – PET/CT) ή τη διαγνωστική με τα ισότοπα. Η διαγνωστική υπερηχογραφία διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα και επικράτησε ως διαγνωστική μέθοδος πρώτης γραμμής, γιατί προσφέρει αρκετές πληροφορίες, ενώ είναι μια τελείως αναίμακτη, πρακτικά ακίνδυνη και οικονομικά φθηνή μέθοδος.

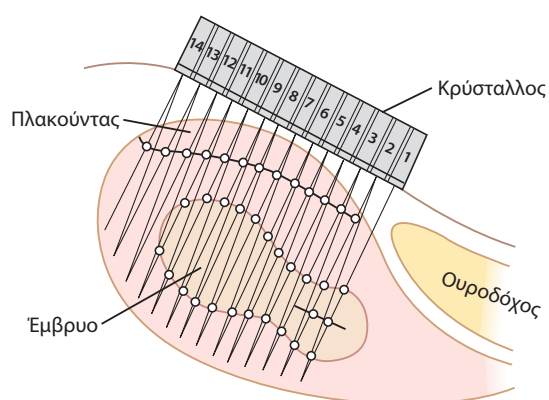
Παραγωγή Υπερήχων

Η παραγωγή των υπερήχων επιτυγχάνεται με βάση το *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο* που αφορά στην ιδιότητα μερικών κρυστάλλων που όταν πιέζονται, έτσι ώστε να αλλάξει το σχήμα τους, παράγουν ηλεκτρισμό. Αντίστροφα, όταν οι ίδιοι κρύσταλλοι βρίσκονται σε ηλεκτρικό πεδίο, παραμορφώνονται και αλλάζουν σχήμα. Αυτό το φαινόμενο έχει πολλές εφαρμογές στην καθημερινή πράξη, όπως στα παλιότερα γραμμόφωνα και τα pick-up. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν ο κρύσταλλος (π.χ. χαλαζία –ορυκτό του πυριτίου, SiO_2) βρεθεί μεταξύ μιας διαφοράς δυναμικού 300 και 700 volts, τότε αυτός διαστέλλεται αλλάζοντας σχήμα. Αν η διαφορά δυναμικού σταματήσει, ο κρύσταλλος επανέρχεται στη αρχική του μορφή, ενώ αν αντιστραφεί η πολικότητα, τότε ο

κρύσταλλος συστέλλεται. Αυτή η μικρή διαστολή και συστολή του κρυστάλλου, όταν βρίσκεται σε ηλεκτρικό πεδίο, παράγει κύματα πίεσης που μεταβιβάζονται ως κύματα υπερήχων. Οι υπέρηχοι λοιπόν είναι η *μεταφορά μηχανικών δονήσεων* διαμέσου ενός υλικού. Οι δονήσεις αυτές δεν είναι άτακτες όπως οι θερμικές δονήσεις, αλλά είναι κανονικές ταλαντώσεις. Αν ο κρύσταλλος είναι σε επαφή με το δέρμα του ανθρώπου, τότε αρχίζουν να δονούνται τα μόρια της επιφάνειας μεταβιβάζοντας τις δονήσεις σε γειτονικά μόρια και έτσι οι μηχανικές δονήσεις μεταβιβάζονται σε βαθύτερες στιβάδες ιστών σχηματίζοντας τη δέσμη των



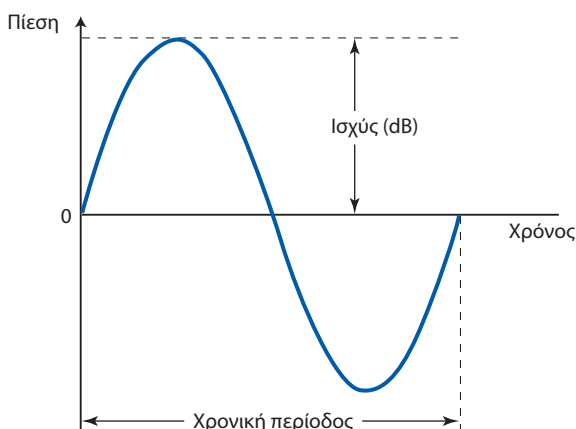
Σχήμα 2.1 α. Αν ο κρύσταλλος (π.χ. χαλαζία) βρεθεί μεταξύ μιας διαφοράς δυναμικού 300-700 volts, διαστέλλεται. β. Αν η διαφορά δυναμικού σταματήσει, ο κρύσταλλος επανέρχεται, ενώ γ. αν αντιστραφεί η πολικότητα, συστέλλεται.



Σχήμα 2.2 Ο κρύσταλλος στις σύγχρονες συσκευές υπερήχων real-time δεν είναι ένας αλλά πολλοί μικροί και ο καθένας εκπέμπει τη δέσμη του και ανιχνεύει την ηχώ από μια μικρή περιοχή.

υπερήχων. Αν το κύμα αυτό προσκρούσει σε μια επιφάνεια, τότε γίνεται αντανάκλαση, όπως ακριβώς όταν ο ακουστός ήχος προσκρούει σε έναν τοίχο και επιστρέφει ως ηχώ. Η ηχώ αυτή, που είναι πάλι ένα μηχανικό κύμα πίεσης, παραμορφώνει τον κρύσταλλο και παράγει μια διαφορά δυναμικού που μπορεί εύκολα να καταγραφεί. Βασικό λοιπόν τμήμα μιας συσκευής υπερήχων είναι αυτοί οι κρύσταλλοι (transducers), που υπάρχουν σε κάθε κεφαλή υπερήχων. Στις σύγχρονες συσκευές υπερήχων υπάρχουν αρκετές δεκάδες τέτοιοι κρύσταλλοι ο ένας δίπλα στον άλλο, ώστε να παράγεται ένα μέτωπο από πολλές δέσμες υπερήχων (Σχ. 2.2).

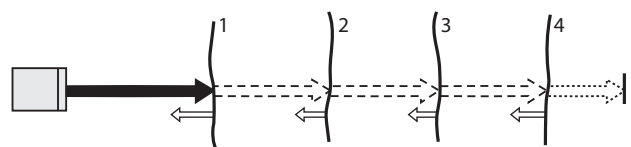
Αλλά ας εξεταστούν μερικά από τα χαρακτηριστικά μιας δέσμης υπερήχων. Η παραγωγή μιας δέσμης μπορεί να γίνεται με συνεχή δόνηση των μορίων ή με διακεκομμένη κατά κύματα. Στη διαγνωστική υπερηχογραφία οι υπέρηχοι παράγονται κατά ώσεις που είναι περίπου 1.000 ανά sec. Το κύμα που παράγεται και ταξιδεύει μπορεί να καταγραφεί ως μία *ταλάντωση*. Καθώς η ταλάντωση κινείται σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά μήκος ενός οριζώντιου άξονα, αρχίζει από το 0 και συνεχίζει ανεβαίνοντας σε μία αιχμή, επιστρέφει στο 0 και συνεχίζει σε αρνητική τιμή, για να μηδενιστεί ξανά (Σχ. 2.3). Έτσι, διακρίνεται η *χρονική περίοδος*, που είναι ο χρόνος που διαρκεί μία πλήρης ταλάντωση. Διακρίνεται επίσης το *ύψος ή η ισχύς*, που είναι η τιμή της αιχμής της πίεσης του κύματος και μετριέται σε decibel (dB) και η *ταχύτητα* του κύματος. Η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το κύμα εξαρτάται από τον τύπο του ιστού. Για τους μαλακούς ιστούς η μέση ταχύτητα είναι 1.540 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), ενώ για τον λιπώδη ιστό είναι 1.450 m/sec. Ακόμα υπάρχει η *συχνότητα των κυμάτων*, που είναι ο αριθμός των ταλαντώσεων που γίνονται σε ένα δευτερόλεπτο. Η συχνότητα είναι από τους σημαντικότερους παρά-



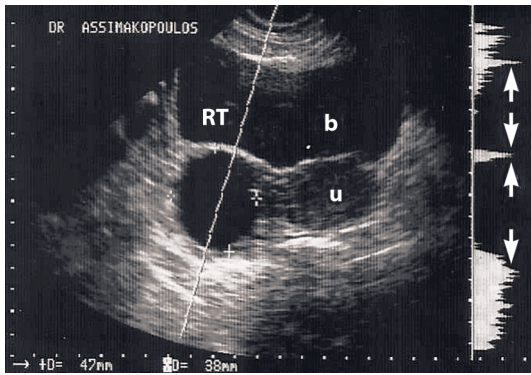
Σχήμα 2.3 Ένα κύμα υπερήχων μπορεί να καταγραφεί ως μία ταλάντωση.

γοντες, όπως θα αναφερθεί πιο κάτω. Έχει καθοριστεί 1 ταλάντωση/sec = 1 hertz (Hz), 1.000 ταλαντώσεις/sec = 1 Kilohertz (1 KHz) και 1.000.000 ταλαντώσεις/sec = 1 Megahertz (1 MHz). Μπορεί να παραχθούν ήχοι από 1 Hz μέχρι 10.000 MHz. Οι ακουστοί ήχοι έχουν εύρος 20 Hz μέχρι 18 KHz. Για ήχους πάνω από τα 18 KHz χρησιμοποιείται ο όρος «υπέρηχοι». Στη διαγνωστική υπερηχογραφία χρησιμοποιούνται υπέρηχοι από 0.5-25 MHz, πιο συχνά από 1 μέχρι 15 MHz. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται 3.5 MHz για τη διαγνωστική στην κοιλιά και την πύελο και 10 MHz για τη διαγνωστική στον οφθαλμό. Τέλος, αναφέρεται το *μήκος κύματος*, που είναι η απόσταση που το κύμα διανύει σε μία ταλάντωση. Αυτό υπολογίζεται, αν διαιρεθεί η ταχύτητα με τη συχνότητα. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, το μήκος κύματος ελαττώνεται. Η ένταση είναι ίση με την ισχύ του κύματος διαιρούμενη με την επιφάνεια στην οποία το κύμα διασκορπίζεται (εγκάρσια διατομή της δέσμης των υπερήχων).

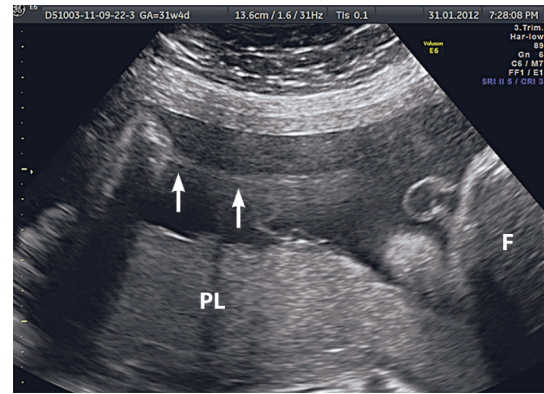
Καθώς η ταλάντωση ταξιδεύει στους ιστούς, υφίσταται *εξασθένιση*. Η εξασθένιση αυτή συμβαίνει, καθώς μέρος της ενέργειας απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο αντανάκλαται ή διασκορπίζεται στο περιβάλλον (Σχ. 2.4). Η *απορρόφηση της ενέργειας* γίνεται από τους ιστούς, αφού πρώτα μετατραπεί σε θερμότητα. Η ιδιότητα αυτή των υπερήχων χρησιμοποιείται για θεραπευτικούς σκοπούς. Στη διαγνωστική υπερηχογραφία τα επίπεδα της ενέργειας είναι πολύ χαμηλά, έτσι ώστε η βιολογική επίδραση από την απορρόφηση της ενέργειας να είναι ασήμαντη. *Αντανάκλαση* της δέσμης των υπερήχων γίνεται στις πολλαπλές επιφάνειες που συναντά το κύμα, καθώς ταξιδεύει στους ιστούς. Από μερικές περιοχές υπάρχει μικρή ή καθόλου αντανάκλαση και από άλλες έντονη. Έτσι, διακρίνονται περιοχές χωρίς αντανάκλασεις ή μη ηχογενείς και άλλες με έντονη αντανάκλαση ή ηχογενείς. *Μη ηχογενείς περιοχές* είναι αυτές που περιέχουν ομοιογενές υλικό, συνήθως με υδαρή σύσταση, όπως η ουροδόχος κύστη, το αμνιακό υγρό, οι κοιλότητες της καρδιάς ή η νεφρική πύελος (ο ήχος μεταδίδεται ταχύτερα στα υγρά από ό,τι στα στερεά και στα αέρια) (Εικ. 2.1). Σε περιοχές που υπάρχει υγρό παρατηρείται πολλές φορές καθαρά το *φαινόμενο της αντήχησης (reverbera-*



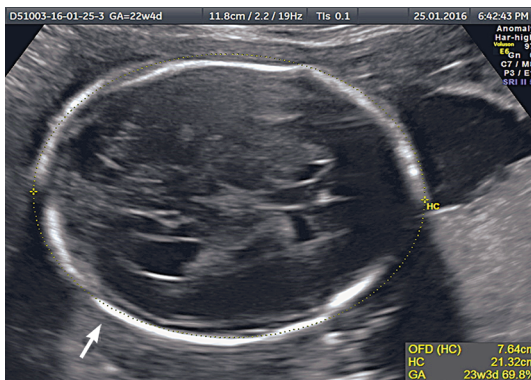
Σχήμα 2.4 Καθώς η ταλάντωση ταξιδεύει στους ιστούς, εξασθενεί. Ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο αντανάκλαται ή διασκορπίζεται στο περιβάλλον.



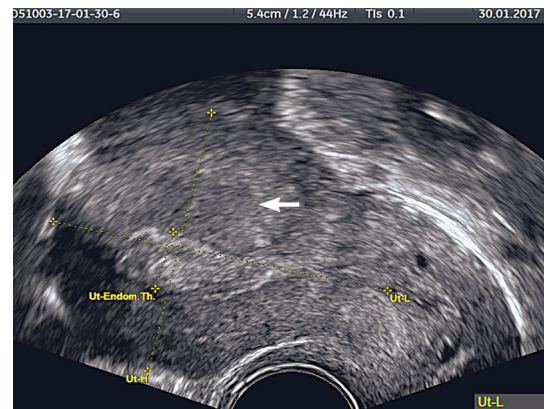
Εικόνα 2.1 Μη ηχογενείς περιοχές, (b) ουροδόχος κύστη, (u) μήτρα σε εγκάρσια διατομή. (RT) Κύστη δεξιάς ωοθήκης. Η άσπρη γραμμή είναι A scan και στα δεξιά της εικόνας καταγράφονται οι μη ηχογενείς περιοχές (μεταξύ των βελών).



Εικόνα 2.2 Το φαινόμενο της αντήρησης. Σε περιοχή με αμνιακό υγρό παρατηρείται εικόνα ιστού με έντονη αντανάκλαση (μικρά βέλη). (F) έμβρυο, (PL) πλακούντας.



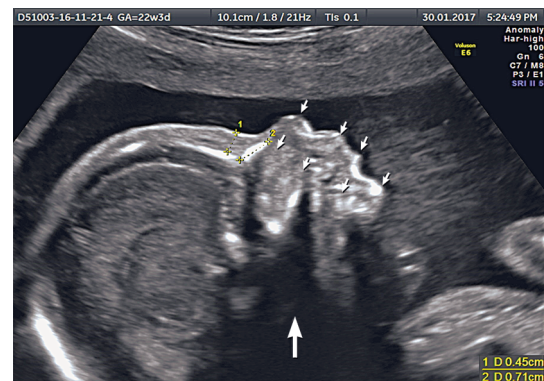
Εικόνα 2.3. Αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων, ως σε κάτοπτρο, από εμβρυϊκό κρανίο (βέλος).



Εικόνα 2.4 Αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων από ανώμαλες επιφάνειες όπως το μυομήτριο (βέλος).

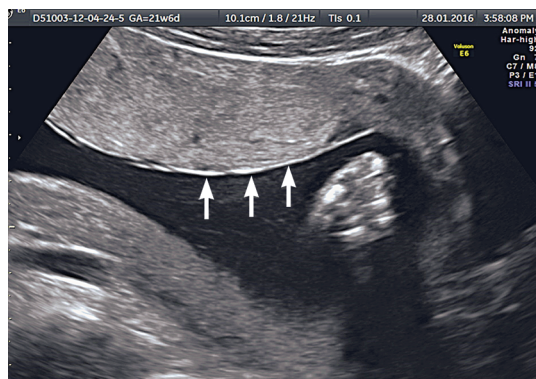
tion). Αυτό οφείλεται στο ότι ο συνθετικά συνήθως κατασκευασμένος κρύσταλλος δεν απορροφά τελείως τη δέσμη που επιστρέφει, αλλά αντανακλά ξανά ένα μέρος της. Αυτό παρουσιάζει το αποτέλεσμα που έχει η εμφάνιση ενός ειδώλου ανάμεσα σε δύο καθρέφτες. Εμφανίζεται λοιπόν στο υπερηχογράφημα σε περιοχές με υγρό εικόνα “ιστού” με έντονη αντανάκλαση, στο επάνω μέρος της περιοχής. Στην πράξη το φαινόμενο αναγνωρίζεται εύκολα μετά από κάποια εμπειρία (Εικ. 2.2).

Οι ηχογενείς περιοχές παράγουν δύο ειδών αντανακλάσεις. Αυτές που αντανακλώνται ως σε κάτοπτρο ευθέως ή από κάποια γωνία, όπως από το εμβρυϊκό κρανίο, την εμβρυϊκή σπονδυλική στήλη και τους εμβρυϊκούς υμένες (Εικ. 2.3), και αυτές που αντανακλώνονται από ανώμαλες επιφάνειες και διασκορπίζονται, όπως από τον πλακούντα, το μυομήτριο και τα εμβρυϊκά σπλάχνα (Εικ. 2.4). Πίσω από μια επιφάνεια με έντονη αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων παράγεται ακουστική σκιά. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι πλευρές, ο ομφαλός της γυναίκας και η σπονδυλική



Εικόνα 2.5 Περίγραμμα εμβρυϊκού προσώπου σε επιμήκη τομή, απεικονίζονται η κορυφή της μύτης, το άνω χείλος, το κάτω χείλος και η κάτω γνάθος. Στη δεύτερη σειρά απεικονίζεται η άνω και κάτω γνάθος (μικρά βέλη). Πίσω από μια περιοχή με έντονη αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων, όπως τα οστά του προσώπου στην εικόνα, παράγεται ακουστική σκιά (παχύ βέλος).

στήλη του εμβρύου, που παράγουν χαρακτηριστικές ακουστικές σκιές (Εικ. 2.5). Αντίθετα με ό,τι συμβαίνει με τους ήχους που μεταδίδονται στον αέρα, οι υπερήχοι, όταν συναντούν όργανα με αέρα όπως το έντερο



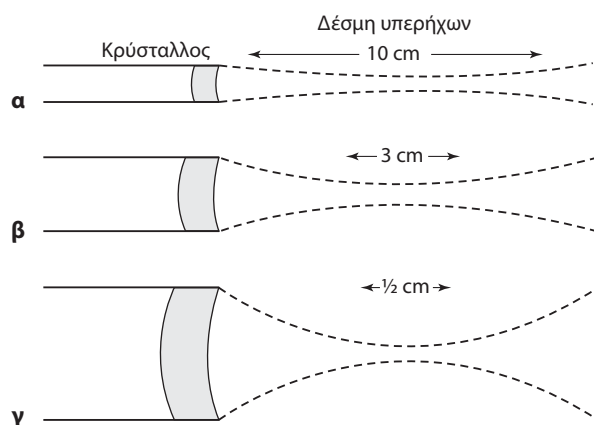
Εικόνα 2.6 Έντονη αντανάκλαση των εμβρυϊκών υμένων, λόγω διαφοράς πυκνότητας στα υλικά μεταφοράς, πλακούντας-υμένες-αμνιακό υγρό (βέλη).

και οι πνεύμονες, αντανακλώνται έντονα. Αυτό γίνεται λόγω της μεγάλης διαφοράς πυκνότητας στα υλικά μεταφοράς, μαλακοί ιστοί-αέρας στην προκειμένη περίπτωση. Σε όλες τις περιπτώσεις που υπάρχουν τέτοιες διαφορές πυκνότητας οι υπερήχοι αντανακλώνονται έντονα, όπως στην περίπτωση των εμβρυϊκών υμένων που είναι σε επαφή με το αμνιακό υγρό και παράγουν έντονη αντανάκλαση, χωρίς να είναι από συμπαγές υλικό (Εικ. 2.6).

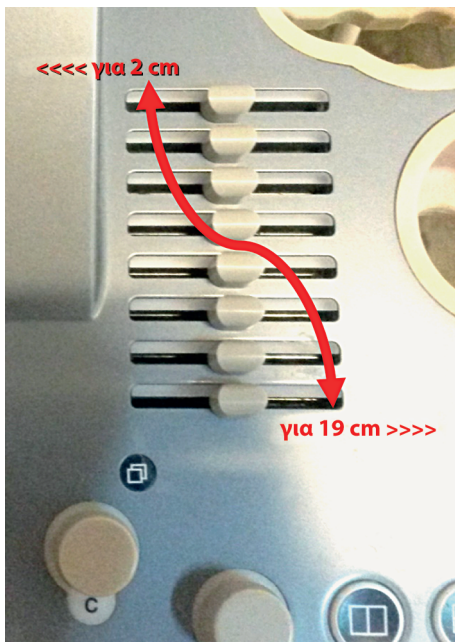
Απορρόφηση λοιπόν και αντανάκλαση προκαλούν εξασθένηση του κύματος των υπερήχων, καθώς αυτό προχωρά σε βαθύτερες στιβάδες. Η εξασθένηση αυτή είναι συνάρτηση του τύπου του ιστού, αλλά και της συχνότητας του κύματος που εκπέμπεται. Για τους μαλακούς ιστούς έχει υπολογιστεί ότι η “μέση” εξασθένηση της δέσμης των υπερήχων σε decibel ανά εκατοστό διαδρομής είναι περίπου ίση με τη συχνότητα σε MHz. Αυτό σημαίνει ότι μια δέσμη υπερήχων 1 MHz χάνει από την ισχύ της 1 dB για κάθε εκατοστό διαδρομής. Για μια δέσμη 2.5 MHz υπάρχει απώλεια 2.5 dB για κάθε εκατοστό και για μια δέσμη 5 MHz υπάρχει απώλεια 5 dB ανά εκατοστό. Για την ηχώ που λαμβάνεται μετά την αντανάκλαση η απώλεια είναι διπλάσια, αφού η δέσμη έχει να διανύσει διπλάσια διαδρομή. Έτσι, σε μια εξέταση ενός τμήματος του εμβρύου που είναι σε βάθος 10 cm από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας συχνότητα 3.5 MHz υπάρχει απώλεια ισχύος 3.5 dB ανά εκατοστό επί 20 cm (10 cm για την άφιξη και 10 cm για την επιστροφή) και συνολικά $3.5 \times 20 = 70$ dB απώλεια ισχύος. Αυξάνοντας τη συχνότητα είναι φανερό ότι σημειώνεται μεγάλη απώλεια ισχύος ήδη από τα πρώτα εκατοστά. Η απώλεια αυτή φθάνει μερικές φορές στο 99% της ισχύος. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα του κύματος των υπερήχων, τόσο μεγαλώνει η απώλεια ισχύος και η ικανότητα λήψης πληροφοριών από μεγαλύτερο βάθος. Και ενώ στην περίπτωση αντανάκλασης του ήχου σε

έναν τοίχο γίνεται αντανάκλαση του 99.9% της ενέργειας, στην περίπτωση αντανάκλασης στους μαλακούς ιστούς επιστρέφει μόνο το 1% της ενέργειας. Οι σύγχρονες συσκευές υπερήχων έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν αυτές της μικρής ισχύος αντανάκλασεις.

Η αύξηση της συχνότητας όμως, καθώς αυξάνονται οι ταλαντώσεις, επιτρέπει την καλύτερη διάκριση δύο σημείων (παραγωγή χωριστής αντανάκλασης) που βρίσκονται στην ίδια ευθεία, αλλά σε διαφορετικό βάθος. Πρόκειται για την κατά άξονα διακριτική ικανότητα (*axial resolution*), η οποία σύμφωνα με τα παραπάνω είναι ελαττωμένη, όταν χρησιμοποιούνται μικρές συχνότητες. Έτσι, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διεξόδου, αλλά και τόσο πιο ελαττωμένη η κατά άξονα διακριτική ικανότητα. Οι κρύσταλλοι που παράγουν τη δέσμη των υπερήχων έχουν μια επιφάνεια και κατά συνέπεια η δέσμη έχει και αυτή κάποια διάμετρο ανάλογη με εκείνη του κρυστάλλου. Η διάμετρος αυτή της δέσμης δεν είναι ίδια σε όλο το μήκος της, αλλά στο μέσο της μικραίνει, ώστε η δέσμη να στενεύει και μετά πάλι να επανέρχεται προοδευτικά στο αρχικό εύρος. Από τη διάμετρο της δέσμης εξαρτάται η διακριτική της ικανότητα ανάμεσα σε δύο σημεία (παραγωγή χωριστών αντανάκλασεων) που βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο, στο ίδιο βάθος και λέγεται *πλάγια διακριτική ικανότητα (lateral resolution)*. Αυτή η διάκριση γίνεται καλύτερη, όσο ελαττώνεται η διάμετρος του κρυστάλλου. Ελάττωση της διαμέτρου της δέσμης συμβαίνει προκαλώντας εστίαση της δέσμης. Εστίαση της δέσμης επέρχεται μετά την κύρτωση της επιφάνειας παραγωγής των υπερήχων του κρυστάλλου (όπως ένα κάτοπτρο) (Σχ. 2.5).



Σχήμα 2.5 Εστίαση της δέσμης των υπερήχων με κύρτωση της επιφάνειας του κρυστάλλου, **α.** ελαφρά εστίαση, **β.** μέτρια εστίαση και **γ.** έντονη εστίαση.



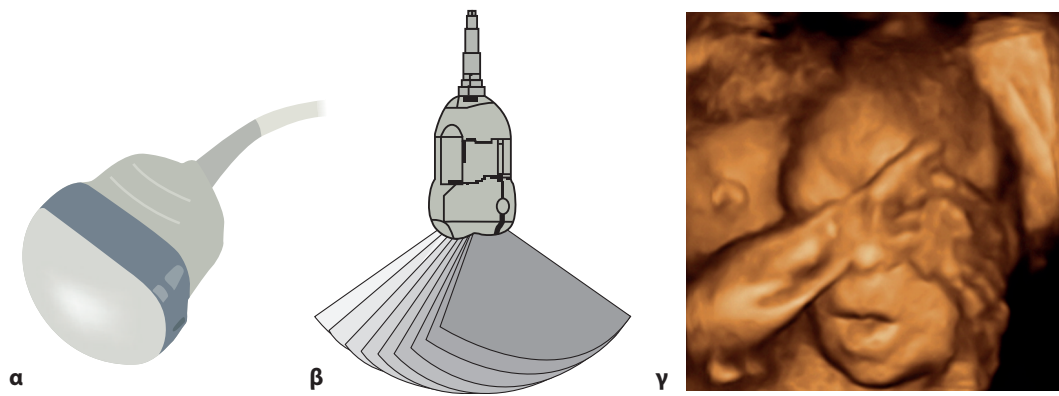
Εικόνα 2.7 Time Gain Compensation ή TGC. Οι σύγχρονες συσκευές υπερήχων έχουν την ικανότητα να ενισχύουν αντανάκλασεις που φθάνουν από μεγάλα βάθη (π.χ. 19 cm), ενώ ενισχύουν λιγότερο αντανάκλασεις από την επιφάνεια (π.χ. 2 cm), ώστε στην εικόνα να υπάρχει ομοιογένεια.

Ελαφρά εστίαση παράγει μια δέσμη που έχει ικανοποιητική πλάγια διακριτική ικανότητα σε μεγάλο βάθος (π.χ. 10 cm). Μέτρια εστίαση παράγει μια δέσμη που έχει καλύτερη πλάγια διακριτική ικανότητα σε μια περιορισμένη όμως διαδρομή (π.χ. 3 cm). Τέλος, έντονη εστίαση δίνει ακόμα καλύτερη διακριτικότητα για πολύ μικρή όμως διαδρομή (π.χ. 0.5 cm). Ο πρώτος και ο δεύτερος τύπος είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται συνήθως για διαγνωστικούς σκοπούς. Με την αντανάκλαση της δέσμης στους διάφορους ιστούς σε διάφορα βάθη επιστρέφει στον κρύσταλλο μια ασθενής δέσμη που όμως τον διεγείρει και παράγει μια ελάχιστη διαφορά δυναμικού που παραλαμβάνεται από έναν δέκτη. Ο δέκτης αυτός ενισχύει τη διαφορά δυναμικού και την κατευθύνει για αποθήκευση και απεικόνιση. Αυτή η ενίσχυση της διαφοράς δυναμικού ονομάζεται Gain και μετριέται σε dB, όπως και η εξασθένηση. Πολλές αντανάκλασεις έρχονται από μεγάλα βάθη τελείως εξασθενημένες. Μία από τις εργασίες του δέκτη είναι να ενισχύει ειδικά αυτές τις αντανάκλασεις, που κάνουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα να επιστρέψουν στον κρύσταλλο. Αυτό γίνεται ξεχωρίζοντας και ενισχύοντας ειδικά τις αντανάκλασεις από βαθύτερους ιστούς που αργούν να επιστρέψουν, ενώ μπορεί να ενισχύει πολύ λιγότερο αντανάκλασεις από την επιφάνεια, ώστε να υπάρχει μια ομοιογένεια στην απεικόνιση των αντανάκλασεων. Αυτή η λειτουργία λέγεται *Time Gain Compensation* ή *TGC*. Η όλη λει-

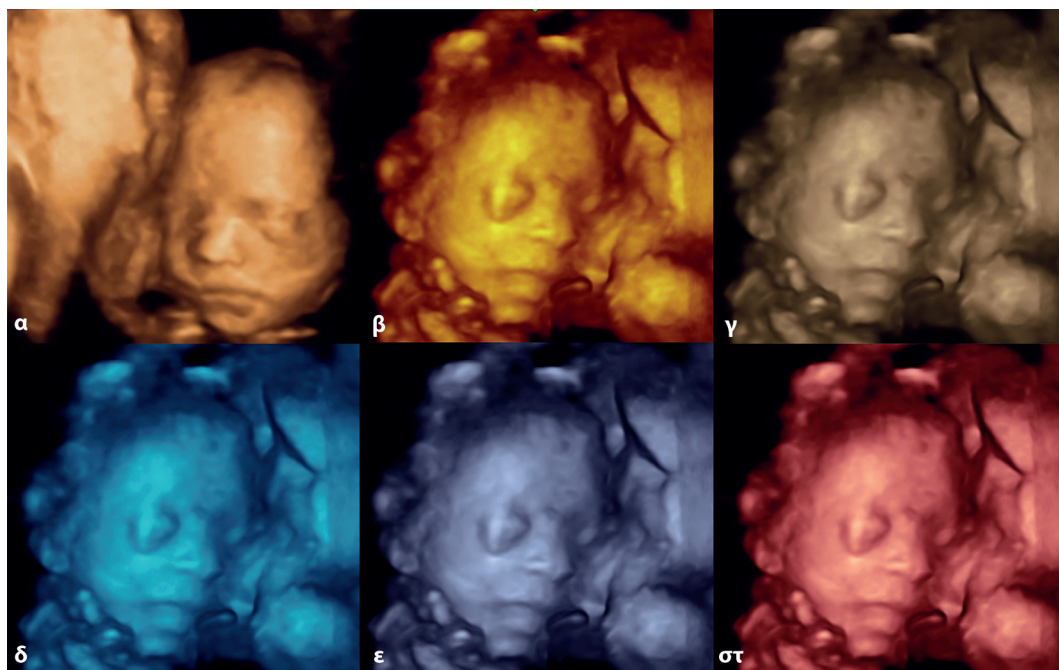
τουργία γίνεται στον δέκτη-ενισχυτή και δεν έχει σχέση με την ένταση του κύματος των υπερήχων (Εικ. 2.7).

Μετά τη γενική ενίσχυση (Total Gain) και την επιμέρους ενίσχυση (Near Gain – Far Gain) της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται στον κρύσταλλο από την αντανάκλαση των υπερήχων, αυτή μετατρέπεται σε αριθμούς και αποθηκεύεται στη μνήμη ενός ψηφιακού ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι αριθμοί που αντιστοιχούν σε διάφορες διαβαθμίσεις αντανάκλασης σχηματίζουν σε μια οθόνη (monitor) αντίστοιχη εικόνα. Η εικόνα αυτή είναι ασπρόμαυρη και περιλαμβάνει όλες τις αποχρώσεις του γκρι χρώματος (grey scale) από το τελείως άσπρο μέχρι το τελείως μαύρο. Όσο πιο καλή είναι η συσκευή, τόσο πιο πολλές διαβαθμίσεις έχει για το γκρι και έτσι παρουσιάζει πιο καλή εικόνα. Η απεικόνιση των διάφορων ιστών και οργάνων στηρίζεται ακριβώς σ' αυτή την ικανότητα των συσκευών υπερήχων να παρουσιάζουν διαφορετική απόχρωση του γκρι για τον κάθε ιστό και στην εμπειρία, στη φαντασία και στην ικανότητα για αυτοσυγκέντρωση του εξεταστή. Η απόφαση για το τι είναι και τι όχι, παίρνεται την ώρα που γίνεται η εξέταση επάνω στην οθόνη και ανήκει στον εξετάζοντα. Σε καμία περίπτωση από τις φωτογραφίες που αποθηκεύτηκαν κατά την εξέταση δεν μπορεί να τεθεί διάγνωση από άλλο εξετάζοντα, όπως π.χ. γίνεται με την ακτινογραφία θώρακα ή κρανίου. Ωστόσο, χαρακτηριστικές υπερηχογραφικές εικόνες αποθηκεύονται ψηφιακά, για τεκμηρίωση της εξέτασης, για μελλοντική σύγκριση και για τυχόν ιατρονομική εμπλοκή.

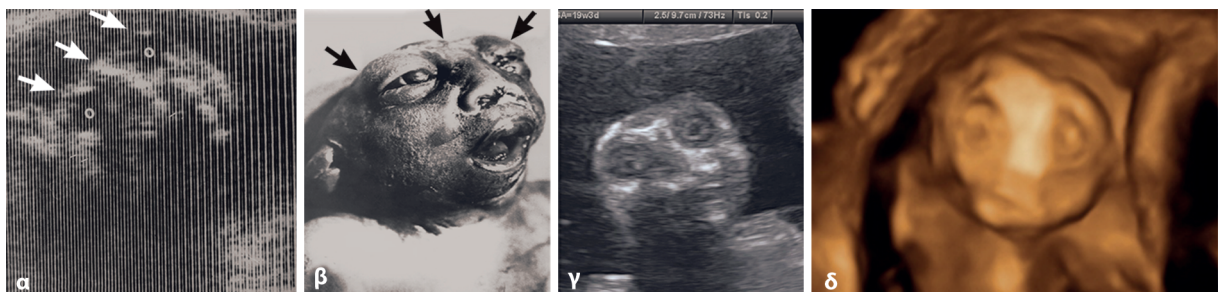
Στο *τριδιάστατο 3D υπερηχογράφημα* μια κεφαλή δύο διαστάσεων κινείται και σαρώνει ή σαρώνει ηλεκτρονικά την υπό εξέταση περιοχή, χωρίς να κινείται το χέρι του εξετάζοντος. Οι πολλαπλές τομές που λαμβάνονται αποθηκεύονται στην πολύ μεγάλης χωρητικότητας μνήμη της συσκευής και μπορεί να γίνει μεταγενέστερη επεξεργασία των δεδομένων αυτών. Μία από τις λειτουργίες αυτές είναι και η επιφανειακή απεικόνιση του προσώπου. Για να επιτευχθεί όμως μια τέτοια εικόνα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει μπροστά από το πρόσωπο αρκετό αμνιακό υγρό, να μην σκεπάζεται το πρόσωπο από τα χέρια ή τον ομφάλιο λώρο και βέβαια το έμβρυο να μην κινηθεί κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Το *τετραδιάστατο 4D υπερηχογράφημα* είναι αυτό που δείχνει την τρισδιάστατη εικόνα σε κίνηση (Εικ. 2.8). Το *έγχρωμο υπερηχογράφημα* είναι η μετατροπή του μαύρου χρώματος σε καφέ και του λευκού χρώματος σε κίτρινο και έτσι δίνεται η εντύπωση της έγχρωμης εικόνας (Εικ. 2.9). Νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις παράγουν μετά από



Εικόνα 2.8 α, β. Στο τρισδιάστατο 3D υπερηχογράφημα μια κεφαλή δύο διαστάσεων κινείται και σαρώνει ή σαρώνει ηλεκτρονικά την υπό εξέταση περιοχή, χωρίς να κινείται το χέρι του εξετάζοντος. **γ.** Για να επιτευχθεί μια τέτοια εικόνα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει μπροστά από το πρόσωπο αρκετό αμνιακό υγρό, να μην σκεπάζεται το πρόσωπο από τα χέρια ή τον ομφάλιο λώρο και βέβαια το έμβρυο να μην κινηθεί κατά τη διάρκεια της σάρωσης, κάτι που συμβαίνει στις 9 από τις 10 περιπτώσεις.



Εικόνα 2.9 α. Έμβρυο 22+2 W. Το έγχρωμο υπερηχογράφημα είναι η μετατροπή του μαύρου χρώματος σε καφέ και του λευκού χρώματος σε κίτρινο και έτσι δίνεται η εντύπωση της έγχρωμης εικόνας. **β, γ, δ, ε, στ.** Έμβρυο 22+4 W. Η απόχρωση μπορεί να αλλάξει κατά την επεξεργασία της εικόνας.

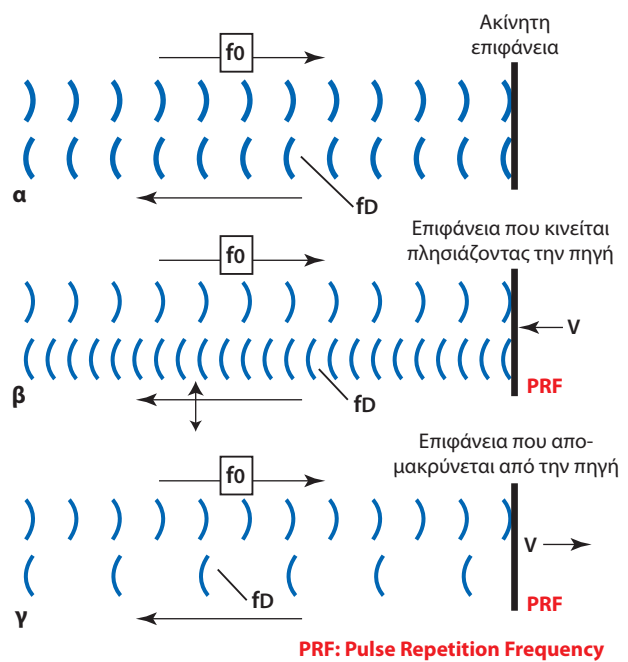


Εικόνα 2.10 Σε μια περίπτωση ανεγκεφαλίας η διάγνωση είναι ίδια, είτε **α, β.** απεικονίζεται με μια αρχέγονη συσκευή του 1984 (18 W), είτε **γ, δ.** με μια συσκευή υψηλής τεχνολογίας με τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση του 2018 (19+3 W).

επεξεργασία των υπερηχογραφικών στοιχείων ιδιαίτερα εντυπωσιακές εικόνες που συμβάλλουν κυρίως στην τεκμηρίωση των ευρημάτων παρά στην αρχική διάγνωση. Για παράδειγμα, σε μια περίπτωση ανεγκεφαλίας η διάγνωση είναι ίδια, είτε αυτή απεικονίζεται με μια αρχέγονη συσκευή είτε με μια συσκευή τελευταίας τεχνολογίας (Εικ. 2.10).

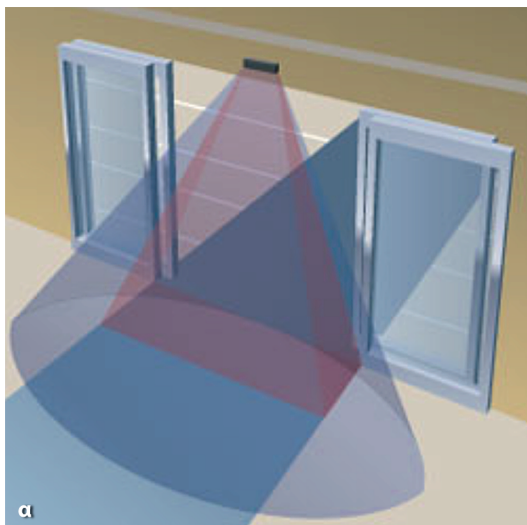
Διαφορά συχνότητας (Doppler shift)

Αν μια πηγή εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 προς μια ακίνητη επιφάνεια, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με την ίδια συχνότητα f_D . Αν εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 προς μια επιφάνεια που κινείται πλησιάζοντας την πηγή, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με αυξημένη συχνότητα f_D (positive Doppler shift). Αν εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 προς μια επιφάνεια που απομακρύνεται από την πηγή, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με ελαττωμένη συχνότητα f_D (negative Doppler shift) (Σχ. 2.6). Το φαινόμενο Doppler βρίσκει χιλιάδες εφαρμογές στην καθημερινή ζωή, από τις πόρτες που ανοίγουν αυτόματα με φωτοκύτταρο, όταν κάποιος τις πλησιάζει και τα συστήματα συναγερμού, μέχρι τους ταχογράφους της τροχαίας και βέβαια οι νυχτερίδες για εκατομμύρια χρόνια “βλέπουν” στο σκοτάδι και πιάνουν την τροφή τους εκπέμποντας και προσλαμβάνοντας δέσμες υπερήχων (Εικ. 2.11). Όλες αυτές οι εφαρμογές βασίζονται στη διαφορά συχνότητας μεταξύ εκπεμπόμενης και προσλαμβανόμενης δέσμης υπε-

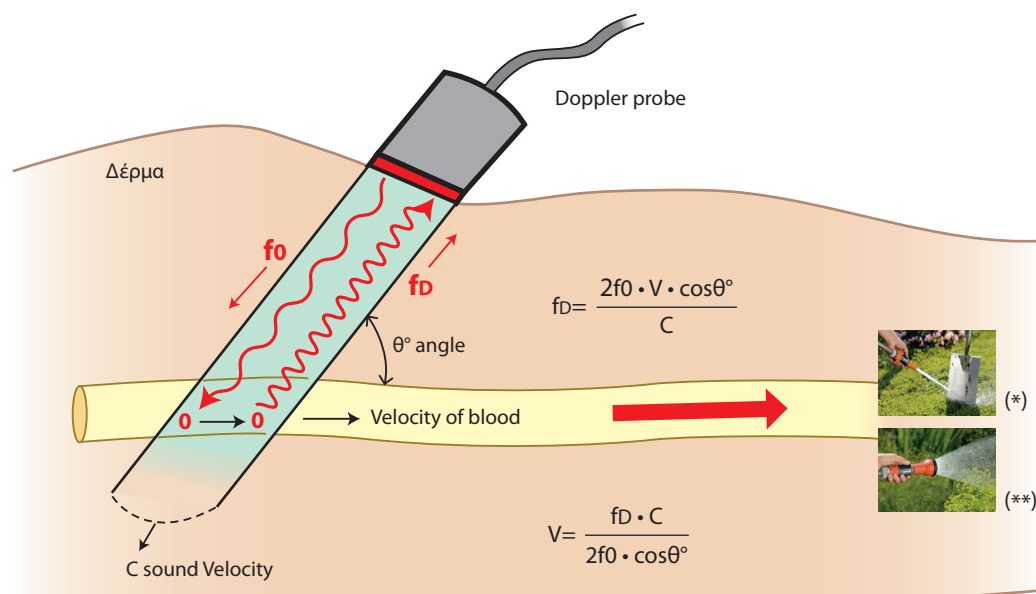


Σχήμα 2.6 Doppler shift. **α.** Αν μια πηγή εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 προς μια ακίνητη επιφάνεια, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με την ίδια συχνότητα f_D . **β.** Αν εκπέμπει μια δέσμη με συχνότητα f_0 προς μια επιφάνεια που κινείται πλησιάζοντας την πηγή, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με αυξημένη συχνότητα f_D . **γ.** Αν εκπέμπει μια δέσμη με συχνότητα f_0 προς μια επιφάνεια που απομακρύνεται από την πηγή, η δέσμη αντανακλάται και επιστρέφει στην πηγή με ελαττωμένη συχνότητα f_D .

ρήχων (Εικ. 1.6). Στην Ιατρική το φαινόμενο βρήκε εφαρμογή το 1960 από τον Ιάπωνα φυσικό Shigeo Satomura (1919-1960), με τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας ροής του αίματος σε διάφορα αγγεία του αν-



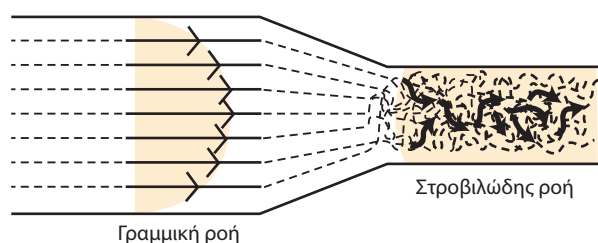
Εικόνα 2.11 Το φαινόμενο Doppler βρίσκει χιλιάδες εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. **α.** Για παράδειγμα, οι πόρτες που ανοίγουν αυτόματα με φωτοκύτταρο, όταν κάποιος τις πλησιάζει, μέχρι **(β)** τους ταχογράφους της τροχαίας. Οι συσκευές εκπέμπουν μια δέσμη υπερήχων την οποία, μετά αντανάκλαση, ο κινούμενος άνθρωπος ή το κινούμενο όχημα επιστρέφουν με διαφορετική συχνότητα και έτσι ανοίγει η πόρτα ή υπολογίζεται η ταχύτητα με την οποία κινείται το όχημα.



Σχήμα 2.7 Αν μια πηγή υπερήχων εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 στοχεύοντας ένα αγγείο, η δέσμη προσκρούει στα ερυθρά αιμοσφαίρια που κινούνται προς την πηγή πλησιάζοντάς την και με βάση τα προαναφερθέντα η δέσμη επιστρέφει με αυξημένη συχνότητα f_D (frequency shift – Doppler shift) και μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα V ροής των αιμοσφαιρίων. Αν η ροή γίνεται σε περιοχή με αντίσταση, όπως σε μια στένωση αγγείου, η ταχύτητα είναι αυξημένη (*), ενώ αντίθετα, αν γίνεται σε περιοχή χωρίς αντίσταση, όπως σε νεόπλαστα αγγεία κάποιου όγκου, είναι ελαττωμένη (**).

θρωπίου σώματος και βγάζοντας συμπεράσματα για τη δυσχερή ή ευχερή αιμάτωση των αντίστοιχων οργάνων. Αν μια πηγή εκπέμπει μια δέσμη υπερήχων με συχνότητα f_0 στοχεύοντας ένα αγγείο, η δέσμη προσκρούει στα ερυθρά αιμοσφαίρια που κινούνται προς την πηγή και πλησιάζοντάς τη, με βάση τα προαναφερθέντα, η δέσμη επιστρέφει με αυξημένη συχνότητα f_D (Σχ. 2.7).

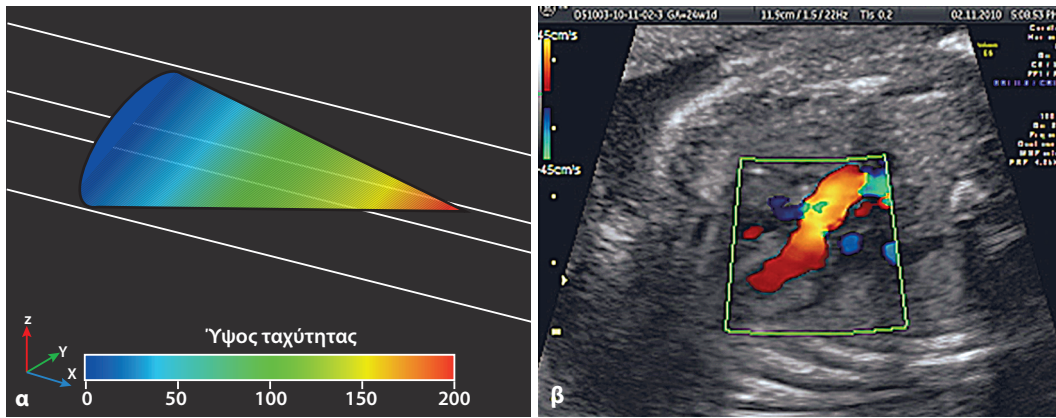
Η διαφορά συχνότητας (Doppler shift ή frequency shift) είναι ανάλογη με $2f_0 \cdot V \cdot \cos \theta^\circ$ και αντιστρόφως ανάλογη του c . Έτσι, $f_D = 2f_0 \cdot V \cdot \cos \theta^\circ / c$ (όπου f_D : η διαφορά συχνότητας, f_0 : η συχνότητα εκπομπής, V : η ταχύτητα ροής των αιμοσφαιρίων, $\cos \theta^\circ$ είναι η γωνία μεταξύ της δέσμης των υπερήχων και του άξονα της ροής στο αγγείο (angle of insonation) και c είναι η ταχύτητα του ήχου στους ιστούς (1.500 m/sec). Για τους ασχολούμενους με τα μαθηματικά δεν είναι δύσκολο να υπολογιστεί το V (η ταχύτητα ροής των αιμοσφαιρίων). Αυτή είναι $V = f_D \cdot c / 2f_0 \cdot \cos \theta^\circ$ και έτσι γίνεται γνωστή η ταχύτητα ροής του αίματος σε κάποιο αγγείο (Σχ. 2.7). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συχνότητα που επιστρέφει εξαρτάται από τη συχνότητα της προσπίπτουσας δέσμης, την ταχύτητα των κινουμένων αιμοσφαιρίων και τη γωνία πρόσπτωσης, όχι με την απόλυτη τιμή της γωνίας αλλά με το συνημίτονο της γωνίας $\cos \theta^\circ$. Γωνία 0° έχει \cos (cos value) 1 και η απόκλιση είναι 0% στην τιμή της ταχύτητας. Στις 60° η \cos είναι 0.5 και η απόκλιση είναι



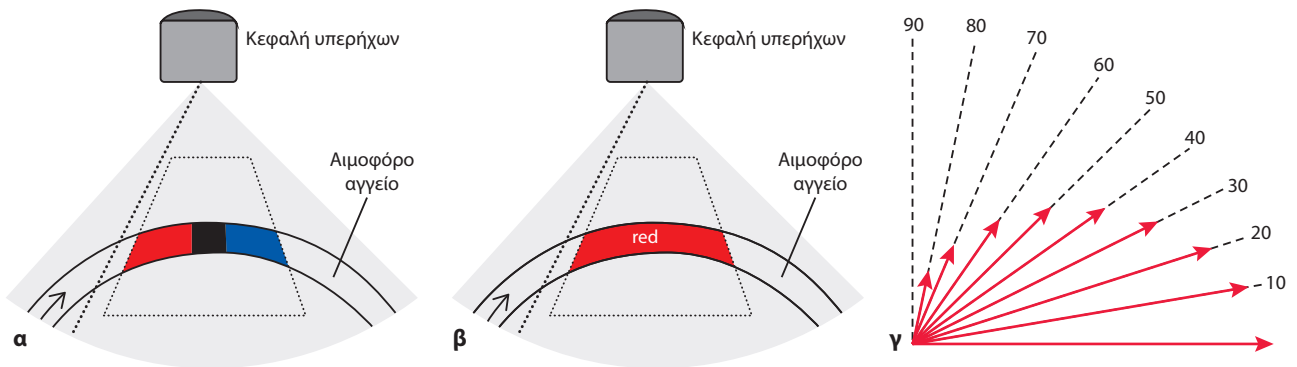
Σχήμα 2.8 Τα αιμοσφαίρια κινούνται στα αγγεία είτε με γραμμική ροή (laminar flow), σε παράλληλες γραμμές και με ταχύτητα της ροής από 0 στα τοιχώματα λόγω τριβής έως μέγιστη στο κέντρο της εγκάρσιας τομής του αγγείου, είτε με στροβιλώδη ροή (turbulent flow), όταν τα αιμοσφαίρια έχουν ακανόνιστη κίνηση με υψηλή ταχύτητα της ροής.

50%, στις 90° η \cos είναι 0 και η απόκλιση είναι 100%. Έτσι, αν η δέσμη των υπερήχων προσπίπτει σε ένα αγγείο κάθετα (με γωνία 90°), δεν δίνει καμία πληροφορία. Ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης είναι αυτή των 60° (Σχ. 2.10).

Τα αιμοσφαίρια κινούνται στα αγγεία είτε με γραμμική ροή (laminar flow), σε παράλληλες γραμμές και με ταχύτητα της ροής από 0, στα τοιχώματα λόγω τριβής, έως μέγιστη, στο κέντρο της εγκάρσιας τομής του αγγείου, είτε με στροβιλώδη ροή (turbulent flow), όταν τα αιμοσφαίρια έχουν ακανόνιστη κίνηση με υψηλή ταχύτητα της ροής (Σχ. 2.8, Σχ. 2.9). Στη συστολική φάση του καρδιακού κύκλου η ροή γίνεται με αυξημένη ταχύτητα, αφού υποχρεώνεται όλη η ποσότητα του αίματος να περάσει από κάποιο αγγείο συγκεκριμένης διαμέτρου. Στη συνέχεια κατά τη διαστολική



Σχήμα 2.9 α. Το μέγεθος της ταχύτητας ροής κυμαίνεται από 0 cm/s στα τοιχώματα (κυανό χρώμα) σε μέγιστη 200 cm/s στο κέντρο εγκάρσιας τομής του αγγείου (κίτρινο και ερυθρό χρώμα). β. Το αίμα διέρχεται με υψηλή ταχύτητα ροής από την αορτική βαλβίδα (στροβιλώδης ροή) και έτσι έχει ερυθρό και κίτρινο χρώμα.



Σχήμα 2.10 α. Στο έγχρωμο Doppler, όταν η ροή έχει κατεύθυνση προς την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή γίνεται με ερυθρό χρώμα και όταν η ροή απομακρύνεται από την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή γίνεται με κυανό χρώμα. β. Το Power Doppler κάνει καταγραφή των αγγείων ανεξάρτητα από την κατεύθυνση ροής. γ. Γωνίες πρόσπτωσης πάνω από τις 60° παράγουν κυματομορφές μη αξιοποιήσιμες και σε γωνία 90°, όταν η δέσμη προσπίπτει κάθετα στο αγγείο, δεν παράγεται καμία κυματομορφή.

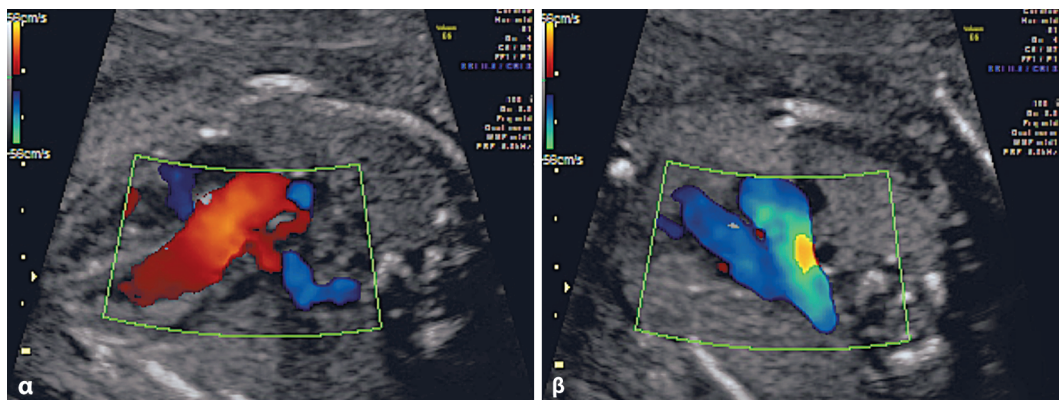
φάση, όταν η καρδιά δεν εξωθεί το αίμα, η κίνηση των αιμοσφαιρίων γίνεται με χαμηλότερη ταχύτητα ροής. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί το λάστιχο του ποτίσματος (hose), που, αν πιεστεί η άκρη του και στενέψει η διάμετρος του, το νερό εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα. Αντίθετα, αν το άκρο του αφεθεί ελεύθερο, το νερό ρέει με χαμηλή ταχύτητα. Αυτή είναι και η εφαρμογή του Doppler στην Ιατρική. Αν ένα αγγείο έχει υποστεί κάποια παθολογική στένωση του αυλού του, όπως μια αθηρωματική πλάκα στις καρωτίδες, τότε το αίμα ρέει στη συστολική φάση του καρδιακού κύκλου, με υπερβολικά υψηλή ταχύτητα πάνω από τα φυσιολογικά όρια και η διάγνωση γίνεται άμεσα και αξιόπιστα. Το ίδιο γίνεται και όταν καταγράφεται υψηλή ταχύτητα ροής στη συστολική φάση και ελλιπής ροή στη διαστολική φάση, όταν οι μητριαίες αρτηρίες αρδεύουν την κοίτη πλακούντα, όπου οι σπειροειδείς αρτηρίες δεν έχουν ανοίξει επαρκώς (μητροπλακου-

ντιακή ανεπάρκεια) και υπάρχει αντίσταση στη ροή του αίματος (Εικ. 9.6). Έτσι, έμμεσα λαμβάνονται πληροφορίες για τη θρέψη και την οξυγόνωση του εμβρύου. Αντίστοιχα σε κακοήθεις όγκους καταγράφονται πολύ χαμηλές ταχύτητες ροής στη συστολική και τη διαστολική φάση. Οι κακοήθεις όγκοι έχουν αυξημένες ανάγκες για οξυγόνο και παράγουν τους αγγειογεννητικούς παράγοντες (vascular endothelial growth factors – VEGF) που προκαλούν τη νεοαγγείωση. Τα νεόπλαστα αυτά αγγεία έχουν “πρόχειρα” και λεπτά τοιχώματα, χωρίς κάποια αντίσταση στη ροή του αίματος, όπως έχουν τα φυσιολογικά αγγεία. Έτσι, και εδώ λαμβάνονται έμμεσα πληροφορίες για την υφή κάποιου όγκου, χωρίς να γίνεται ιστολογική διάγνωση (Εικ. 2.13).

Υπάρχουν δύο τρόποι, για να γίνει η καταγραφή των ταχυτήτων ροής σε συνάρτηση με τον χρόνο στο B-mode υπερηχογράφημα, το συνεχές και το παλμικό

Doppler. Στο **συνεχές Doppler** (Continuous wave Doppler – CWD) γίνεται συνεχής εκπομπή και πρόσληψη της δέσμης των υπερήχων και καταγράφεται η ταχύτητα ροής, χωρίς να είναι δυνατή η διάκριση από ποιο αγγείο στη διαδρομή της δέσμης προέρχεται η αντανάκλαση. Είναι κατάλληλο για μελέτη σε μεγάλα αγγεία που το αίμα έχει μεγάλη ταχύτητα ροής. Στο **παλμικό Doppler** (Pulsed wave Doppler – PWD) γίνεται διακεκομμένη εκπομπή της δέσμης των υπερήχων και ο εξεταστής επιλέγει μια συγκεκριμένη περιοχή (όγκο δείγματος) στο B-mode υπερηχογράφημα και προσλαμβάνει **διαφορές συχνότητας (shift)** από ροή αιμοσφαιρίων από την περιοχή αυτή (Doppler mapping). Το **έγχρωμο Doppler** (Color Doppler) δίνει τη δυνατότητα να απεικονιστεί έγχρωμα η ροή και η ταχύτητα ροής στην περιοχή που επιλέγει ο εξεταστής στο B-mode υπερηχογράφημα. Προσλαμβάνονται **διαφορές συχνότητας (shift)** από αυτή την περιοχή, ως μικροί όγκοι δείγματος παλμικού Doppler και με προσθήκη εγχρωμών στοιχείων (pixels) στην εικόνα του B-mode, καταγράφεται η κυκλοφορία του αίματος σε διάφορα αγγεία με χρώμα (Color Flow Map). Όταν οι δύο μέθοδοι B-mode και Color Doppler μπαίνουν σε λειτουργία, τα στοιχεία της οθόνης μοιράζονται και ελαττώνεται η ποιότητα της εικόνας. Το χρώμα και η φωτεινότητα του χρώματος εξαρτάται από τις ταχύτητες ροής. Οι υψηλότερες ταχύτητες παράγουν λαμπερά χρώματα και οι χαμηλότερες ταχύτητες παράγουν χρώματα πιο σκοτεινά δίνοντας μια αδρή εικόνα της ταχύτητας ροής. Το μέγεθος της ταχύτητας ροής κυμαίνεται από 0 cm/s στα τοιχώματα σε μέγιστη 200 cm/s στο κέντρο εγκάρσιας τομής του αγγείου (Σχ. 2.9). Με ανάλογη επιλογή μπορεί, όταν η ροή έχει κατεύ-

θυνση προς την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή να γίνεται με ερυθρό χρώμα και όταν η ροή απομακρύνεται από την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή να γίνεται με κυανό χρώμα και **δεν σχετίζεται με αρτηρίες και φλέβες**, όπως μπορεί να θεωρήσει κάποιος αρχάριος. Ένα τρίτο χρώμα, συνήθως κίτρινο ή πράσινο, χρησιμοποιείται, για να επισημάνει περιοχές με υψηλή ταχύτητα λόγω στροβιλώδους ροής (Σχ. 2.10, Εικ. 2.12). Για να υπάρξει καταγραφή, πρέπει η δέσμη των υπερήχων να προσπίπτει σε κάποιο αγγείο, με γωνία κάτω των 60°. Όταν αυτή η γωνία είναι 90°, δεν λαμβάνεται καμία εικόνα και το χρώμα που απεικονίζεται είναι το μαύρο (Σχ. 2.10). Το **Power Doppler** κάνει καταγραφή ανεξάρτητα από την κατεύθυνση ροής, χωρίς να έχει σημασία η γωνία με την οποία η δέσμη των υπερήχων κατευθύνεται σε κάποιο αγγείο, έστω και αν είναι σε ορθή γωνία. Εμφανίζει ένα μόνο βαθύ πορτοκαλί χρώμα, δεν δείχνει την κατεύθυνση ροής, όμως διατηρεί την ιδιότητα οι υψηλότερες ταχύτητες να παράγουν λαμπερό χρώμα και οι χαμηλότερες ταχύτητες να παράγουν πιο σκοτεινό χρώμα, δίνοντας και πάλι μια αδρή εικόνα της ταχύτητας ροής. Απεικονίζει περισσότερες λεπτομέρειες στη διαδρομή λεπτών αγγείων και χρησιμοποιείται κυρίως στη Γυναικολογία για αξιολόγηση κακοήθων όγκων (Εικ. 2.13). Το **High-definition flow** είναι Power Doppler που όμως δείχνει διεύθυνση ροής με χρώματα ερυθρό και κυανό που διαβαθμίζονται (λαμπερό και σκοτεινό) ανάλογα με την ταχύτητα ροής των αγγείων. Υπάρχει ακόμα το **τριδιάστατο (3D) έγχρωμο Doppler** και το **τριδιάστατο (3D) Power Doppler**, όπου γίνεται η απεικόνιση των αγγείων τρισδιάστατα και βέβαια πιο εντυπωσιακά, προσθέτοντας κάποια διαγνωστικά



Εικόνα 2.12 α. Όταν η ροή έχει κατεύθυνση προς την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή συνιστάται να γίνεται με ερυθρό χρώμα, όπως η ροή στην ανιούσα αορτή. **β.** Όταν η ροή απομακρύνεται από την κεφαλή των υπερήχων, η καταγραφή συνιστάται να γίνεται με κυανό χρώμα, όπως στο αορτικό τόξο με μεγαλύτερη ταχύτητα (λαμπερή περιοχή) και στην πνευμονική αρτηρία με μικρότερη ταχύτητα, αλλά προς την ίδια απομακρυνόμενη από την κεφαλή κατεύθυνση. Ένα τρίτο χρώμα, συνήθως κίτρινο ή πράσινο, χρησιμοποιείται, για να επισημάνει περιοχές με υψηλή ταχύτητα λόγω στροβιλώδους ροής.