

Κεφάλαιο 1

Βασικές γνώσεις από τη φυσική των υπερήχων

ΜΗΝ ΠΡΟΣΠΕΡΝΑΤΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ είναι η παρότρυνση που δίνουν μερικοί συγγραφείς και που και εμείς την υιοθετούμε. Βασικές γνώσεις που αφορούν τη φυσική των υπερήχων είναι απαραίτητες για την κατανόηση του φαινομένου και την εφαρμογή του στη διαγνωστική.

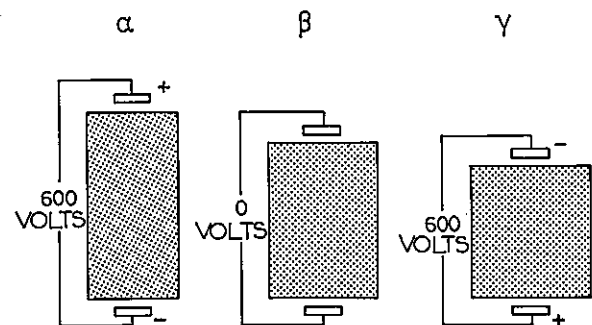
Οι διάφορες τεχνικές της υπερηχογραφίας εφαρμόζονται ευρύτατα στη σύγχρονη ιατρική και σε όλες τις ειδικότητες. Με τη χρήση των υπερήχων λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την υφή και τη λειτουργία διάφορων οργάνων του ανθρωπίνου σώματος. Οι πληροφορίες αυτές, που παίρνονται υπό μορφή εικόνων του σώματος 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 η αξονική τομογραφία (CT scanning), το NMR (nuclear magnetic resonance) ή τη διαγνωστική με τα ισότοπα. Για την ώρα υπάρχει μεγάλος συναγωνισμός για να επικρατήσει η μία ή η άλλη μέθοδος. Η διαγνωστική υπερηχογραφία διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα για να επικρατήσει στο συναγωνισμό, γιατί προσφέρει αρκετές πληροφορίες, ενώ είναι μία τελείως ανώδυνη και πρακτικά ασφαλής μέθοδος.

Παραγωγή υπερήχων

Η παραγωγή των υπερήχων επιτυγχάνεται με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό αφορά την 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,

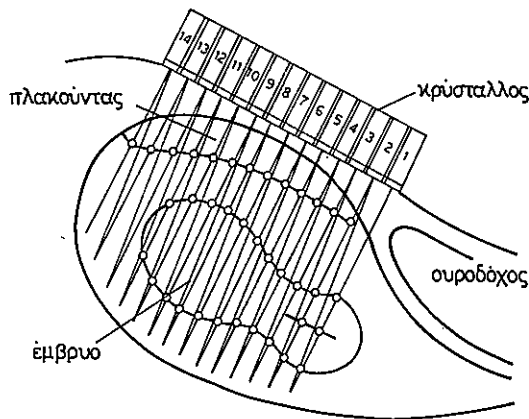
όπως στα παλιότερα γραμμόφωνα και τα σύγχρονα pick-up. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν ο κρύσταλλος (π.χ. χαλαζίου) βρεθεί μεταξύ μιας διαφοράς δυναμικού 300 και 700 volts, τότε αυτός διαστέλεται αλλάζοντας σχήμα.

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 υπερήχων. Αν το κύμα αυτό προσκρούσει σε μία επι-



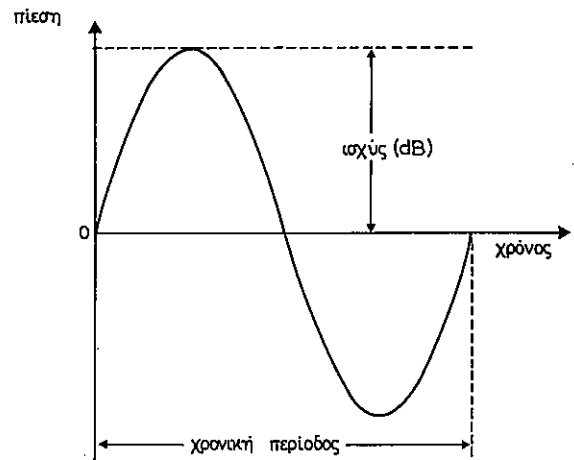
Σχ. 1.1. (α) Αν ο κρύσταλλος (π.χ. χαλαζίου) βρεθεί μεταξύ μιας διαφοράς δυναμικού 300-700 volts διαστέλεται. (β) Αν η διαφορά δυναμικού σταματήσει ο κρύσταλλος επανέρχεται και (γ) αν αντιστραφεί η πολικότητα συστέλλεται.

φάνειά, 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 μία 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 άλλον, ώστε να παράγεται ένα μέτωπο από πολλές δέσμες υπερήχων (Σχ. 1.2).



Σχ. 1.2. 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 μία μικρή περιοχή.

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 1000 ανά sec. Το κύμα που παράγεται και ταξιδεύει μπορεί να καταγραφεί ως μία *ταλάντωση*. Καθώς η ταλάντωση κινείται σε συνάρτηση με το χρόνο κατά μήκος ενός οριζόντιου άξονα, αρχίζει από το 0 και συνεχίζει ανεβαίνοντας σε μία αιχμή, επιστρέφει στο 0 και συνεχίζει σε αρνητική τιμή για να μηδενιστεί ξανά (Σχ. 1.3). Έτσι διακρίνεται η *χρονική περίοδος*, που είναι ο χρόνος που διαρκεί μία πλήρης ταλάντωση. Διακρίνεται το *ύψος ή 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 1540 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), ενώ για το λιπώδη ιστό είναι 1450 m/sec.



Σχ. 1.3. Ένα κύμα υπερήχων μπορεί να καταγραφεί ως μία ταλάντωση.

Ακόμα υπάρχει η *συχνότητα των κυμάτων* που είναι ο αριθμός των ταλαντώσεων που γίνονται σε ένα δευτερόλεπτο. Η συχνότητα είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες όπως θα αναφερθεί πιο κάτω.

$$1 \text{ ταλάντωση/sec} = 1 \text{ hertz (Hz)}$$

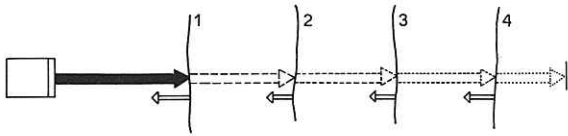
$$1000 \text{ ταλαντώσεις/sec} = 1 \text{ Kilo hertz (1 KHz)}$$

$$1000000 \text{ ταλαντώσεις/sec} = 1 \text{ Mega hertz (1 Mhz)}$$

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. Υπολογίζεται αυτό, 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 *εξασθένηση*. Η εξασθένηση αυτή γίνεται γιατί μέρος της ενέργειας *απορροφάται*, ενώ το υπόλοιπο *αντανάκλαται* ή *διασκορπίζεται* στο περιβάλλον (Σχ. 1.4).

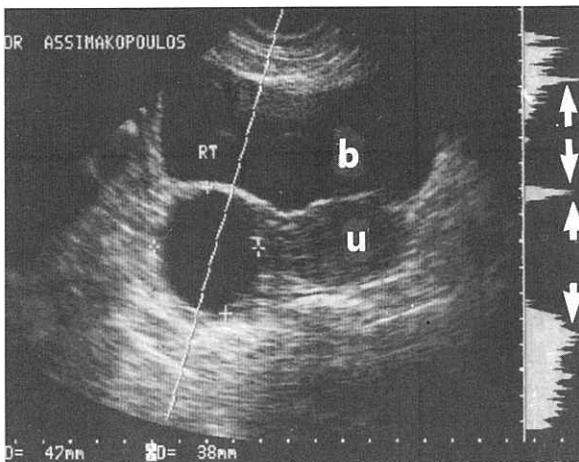
Η *απορρόφηση της ενέργειας* γίνεται από τους ιστούς, αφού πρώτα μετατραπεί σε θερμότητα. Η ιδιότητα αυτή των υπερήχων χρησιμοποιείται για θεραπευτικούς σκοπούς. Στη διαγνωστική υπερηχογρα-



Σχ. 1.4. Καθώς η ταλάντωση ταξιδεύει στους ιστούς εξασθενεί. Ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο αντανακλάται ή διασκορπίζεται στο περιβάλλον.

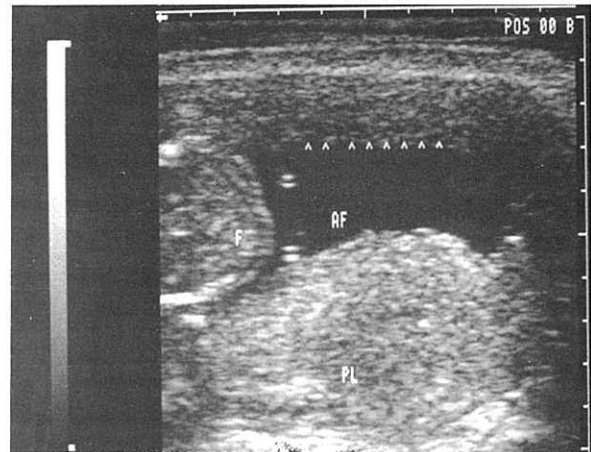
φία τα επίπεδα της ενέργειας είναι πολύ χαμηλά, έτσι ώστε η βιολογική επίδραση από την απορρόφηση της ενέργειας να είναι ασήμαντη. **Αντανάκλαση** της δέσμης των υπερήχων γίνεται στις πολλαπλές επιφάνειες, που συναντά το κύμα καθώς ταξιδεύει στους ιστούς. Από μερικές περιοχές υπάρχει μικρή ή καθόλου 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. 1.1).

Σε περιοχές που υπάρχει υγρό παρατηρείται πολλές φορές καθαρά το **φαινόμενο της αντήχησης**. Αυτό οφείλεται στο ότι ο συνθετικά συνήθως κατασκευασμένος κρύσταλλος, δεν απορροφά τελείως τη δέσμη που επιστρέφει, αλλά ένα μέρος της το αντα-



Εικ. 1.1. Μη ηχογενείς περιοχές. (b) ουροδόχος κύστη, (u) μήτρα σε εγκάρσια διατομή. (RT) Κύστη δεξιάς ωθήκης. Η άσπρη γραμμή είναι A scan και στα δεξιά της εικόνας καταγράφονται οι μη ηχογενείς περιοχές (μεταξύ των βελών).

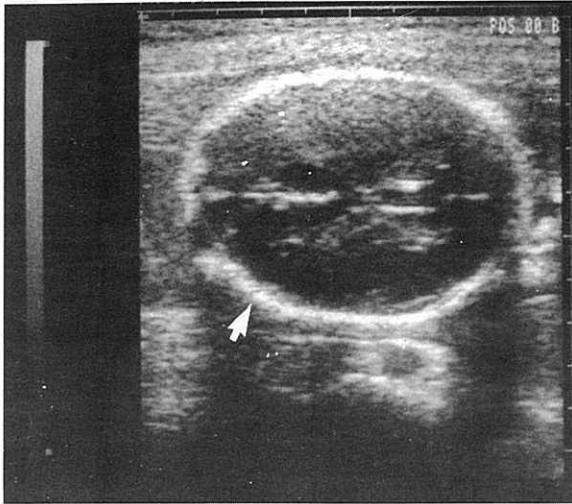
νακλά ξανά. Αυτό παρουσιάζει το αποτέλεσμα που έχει η εμφάνιση ενός ειδώλου ανάμεσα σε δύο καθρέφτες. Εμφανίζεται λοιπόν στο υπερηχογράφημα σε περιοχές με υγρό, εικόνα ιστού με έντονη αντανάκλαση, στο πάνω μέρος της περιοχής. Στην πράξη το φαινόμενο αναγνωρίζεται εύκολα ύστερα από κάποια εμπειρία (Εικ. 1.2).



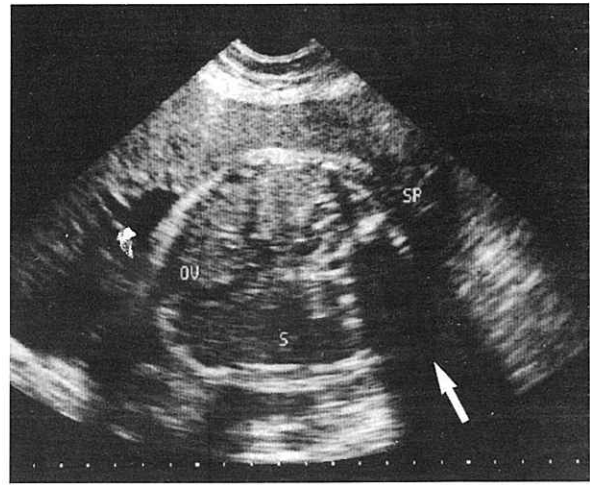
Εικ. 1.2. Το φαινόμενο της αντήχησης. Σε περιοχή με αμνιακό υγρό (AF) παρατηρείται εικόνα ιστού με έντονη αντανάκλαση (μικρά βέλη). (F) έμβryo, (PL) πλακούντας.

Οι ηχογενείς περιοχές παράγουν δύο ειδών αντανάκλασεις. 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. 1.3) και αυτές που αντανακλώνται *από ανώμαλες επιφάνειες* και διασκορπίζονται όπως από τον πλακούντα, το μυομήτριο και τα εμβρυϊκά σπλάχνα (Εικ. 1.4). Πίσω από μία επιφάνεια με έντονη αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων παράγεται **ακουστική σκιά**. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι πλευρές, ο ομφαλός της γυναίκας και η σπονδυλική στήλη του εμβρύου, που παράγουν χαρακτηριστικές ακουστικές σκιές (Εικ. 1.5).

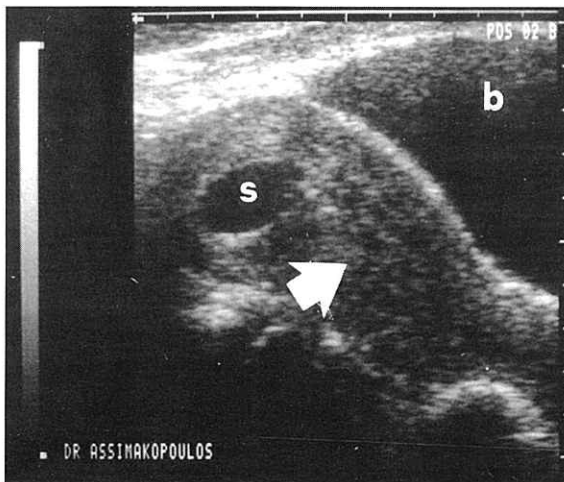
Αντίθετα με ό,τι συμβαίνει με τους ήχους που μεταδίδονται στον *αέρα*, οι υπέρηχοι, όταν συναντούν όργανα με αέρα όπως το έντερο και οι πνεύμονες, αντανακλώνονται έντονα. Αυτό γίνεται λόγω της μεγάλης διαφοράς πυκνότητας στα υλικά μεταφοράς, μαλακοί ιστοί-αέρας στην προκειμένη περίπτωση. Σε όλες τις περιπτώσεις που υπάρχουν τέτοιες διαφορές πυκνότητας, οι υπέρηχοι αντανακλώνονται έντονα όπως στην περίπτωση των εμβρυϊκών



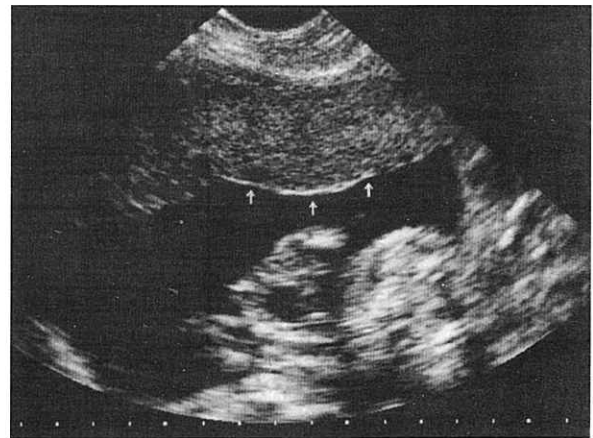
Εικ. 1.3. Αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων ως σε κάτοπτρο, από εμβρυϊκό κρανίο (βέλος).



Εικ. 1.5. Εγκάρσια διατομή κοιλίας του εμβρύου. Μετά μία επιφάνεια με έντονη αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων, παράγεται ακουστική σκιά (βέλος). (SP) σπονδυλική στήλη, (S) στόμαχος, (OV) ομφαλική φλέβα.



Εικ. 1.4. Αντανάκλαση της δέσμης των υπερήχων από ανώμαλες επιφάνειες όπως το μομήτριο (βέλος). (b) Ουροδόχος κύστη, (S) εμβρυϊκός σάκος 6ης εβδομάδας.



Εικ. 1.6. Έντονη αντανάκλαση των εμβρυϊκών υμένων, λόγω διαφοράς πυκνότητας στα υλικά μεταφοράς, πλακούντας - υμένες - αμνιακό υγρό (βέλη).

υμένων που είναι σε επαφή με το αμνιακό υγρό και παράγουν έντονη αντανάκλαση, χωρίς να είναι από συμπαγές υλικό (Εικ. 1.6).

Απορρόφηση λοιπόν και αντανάκλαση, προκαλούν εξασθένιση του κύματος των υπερήχων καθώς αυτό προχωρά σε βαθύτερες στιβάδες. Η εξασθένιση αυτή είναι συνάρτηση του τύπου του ιστού, αλλά και της συχνότητας του κύματος που εκπέμπεται. Για τους μαλακούς ιστούς έχει υπολογιστεί ότι η "μέση" εξασθένιση της δέσμης των υπερήχων σε decibel ανά εκατοστό διαδρομής είναι περίπου ίση

με τη συχνότητα σε MHz. Αυτό σημαίνει ότι μία δέσμη υπερήχων 1 MHz χάνει από την ισχύ της 1 dB για κάθε εκατοστό διαδρομής. Για μία δέσμη 2,5 MHz, υπάρχει απώλεια 2,5 dB για κάθε εκατοστό και για μία 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 μία 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