

Τεχνικές βασισμένες στις ακτίνες-X

Η παραγωγή και η φύση των ακτίνων-X

Οι ακτίνες-X καλύπτουν ένα ορισμένο εύρος εντός του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα για τους σκοπούς της διαγνωστικής απεικόνισης, το χρήσιμο μήκος κύματος κυμαίνεται μεταξύ των 0,06 και 0,006 nm. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με το ορατό φως, οι ακτίνες-X δεν μπορούν να εκτραπούν από φακούς ή αντίστοιχες διατάξεις και, ως εκ τούτου, η περίθλαση και η κυματική οπτική είναι δυνατόν να αγνοηθούν. Επομένως, οι ακτίνες-X μπορούν να θεωρηθούν ως μια γραμμικά διαδιδόμενη ροή αδιάσπαστων κβάντων ενέργειας που ονομάζονται *φωτόνια*. Κατά συνέπεια, οι ακτίνες-X χαρακτηρίζονται από τις ενέργειες των φωτονίων και όχι από το μήκος κύματός τους ή τη συχνότητα των κυμάτων. Επιπροσθέτως, λόγω του ότι οι ακτίνες-X παράγονται από μετατροπή ενέργειας επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων εντός ηλεκτρικού πεδίου της τάξης των κιλοβόλτ (kV), η κατάλληλότερη μονάδα μέτρησης της ενέργειας των φωτονίων είναι το κιλοηλεκτρονιοβόλτ (keV)· με εύρος από 20–200keV (Εικόνα 1).

Η λυχνία ακτίνων-X

Στη διαγνωστική απεικόνιση, η *πηγή* των ακτίνων X είναι η ακτινολογική λυχνία (Εικόνα 2) εντός της οποίας μια στενή

Η ταχύτητα διάδοσης (c) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερή (στο κενό): $3 \times 10^{17} \text{ nm} \times \text{sec}^{-1}$, και σχετίζεται με το μήκος κύματος (λ) και τη συχνότητά του (ν) σύμφωνα με τη σχέση:
 $c = \lambda \times \nu$.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται ως διακριτά κβάντα ενέργειας (φωτόνια). Η ενέργεια (E) του φωτονίου σχετίζεται με τη

συχνότητά του (ν) σύμφωνα με τη σχέση: $E = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$, όπου

h είναι η σταθερά του Planck. Εάν η ενέργεια εκφράζεται σε keV

και το μήκος κύματος (λ) σε νανόμετρα, η σχέση γίνεται: $E = \frac{1,24}{\lambda}$.

Ένα ηλεκτρονιοβόλτ (eV) είναι το ποσό της κινητικής ενέργειας που αποκτάται από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο όταν αυτό επιταχύνεται εντός διαφοράς δυναμικού ενός βολτ στο κενό. $1.000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$.

δέσμη ηλεκτρονίων, εκπεμπόμενη από ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου (κάθοδος), επιταχύνεται στο κενό και εστιάζεται ηλεκτροστατικά, προκειμένου να προσπέσει ακολούθως στον στόχο της ανόδου, και στη συνέχεια να εκπεμφθεί ένα μικρό ποσοστό (0,2-2%) από την προσπίπτουσα ενέργεια των ηλεκτρονίων ως ακτίνες-X. Η εναπομένουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στην άνοδο, η οποία διαθέτει υψηλή θερμοχωρητικότητα και κατασκευάζεται συνήθως από κράμα βολφραμίου. Επιπροσθέτως, η άνοδος έχει σχήμα δίσκου ο οποίος και περιστρέφεται με σκοπό την κατανομή του θερμικού φορτίου σε ακόμα μεγαλύτερη επιφάνεια.

Η ενέργεια των ακτίνων-X ελέγχεται πρωτίστως από την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, *την τάση επιτάχυνσης*. Η υψηλή αυτή τάση παράγεται μέσω ανόρθωσης και μετασχηματισμού υψηλής τάσης του κοινού εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) καθώς και αλλαγής της συχνότητάς του από τα 50–60 Hz στα 50.000 Hz AC. Παρ' όλα αυτά, η εξομάλυνση δεν είναι πλήρης και, ως εκ τούτου, η υψηλή τάση

εμφανίζει διακυμάνσεις. Ο παράγοντας διακύμανσης (ripple) αποδίδεται ως η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής εκφρασμένη ως ποσοστό της μέγιστης τιμής τάσης, και ανέρχεται σε 5–10% στις περισσότερες γεννήτριες υψηλής τάσης. Η επιλογή υψηλής τάσης σε μια μονάδα ακτίνων-X συνήθως αναφέρεται στη μέγιστη τιμή τάσης και εκφράζεται σε kVp ούτως ώστε να υποδεικνύεται η προαναφερθείσα διακύμανση.

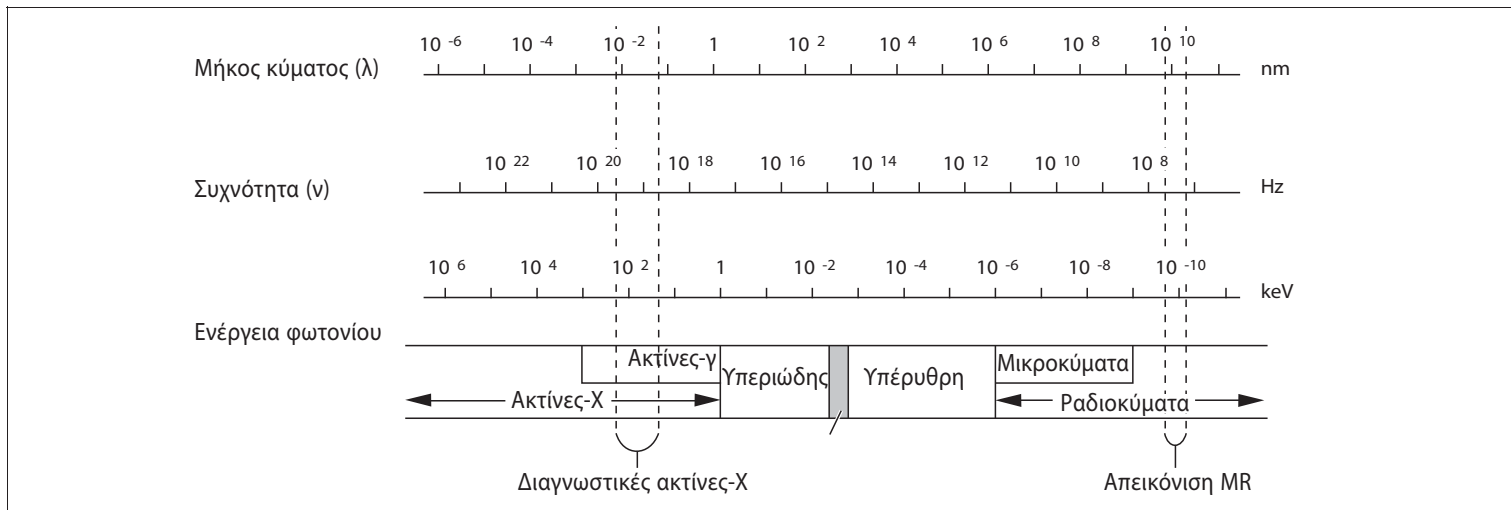
Η ένταση των ακτίνων-X για συγκεκριμένη τιμή τάσης καθορίζεται από τον αριθμό των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων στην άνοδο, δηλαδή του ρεύματος που μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια διαμέσου του κενού από την άνοδο στην κάθοδο, το *ρεύμα λυχνίας* δηλαδή το οποίο εκφράζεται σε milliamperes (mA). Για τάση επιτάχυνσης πάνω από 40 kV (τάση κορεσμού), το ρεύμα της λυχνίας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του νήματος της καθόδου, η οποία με τη σειρά της ρυθμίζεται από ένα άλλο ρεύμα (το *ρεύμα του νήματος*) το οποίο διαρρέει το νήμα της λυχνίας.

Η ποσότητα των παραγόμενων ακτίνων-X είναι ανάλογη του χρόνου ροής των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο και εκφράζεται σε milliampere \times seconds (*mAs*).

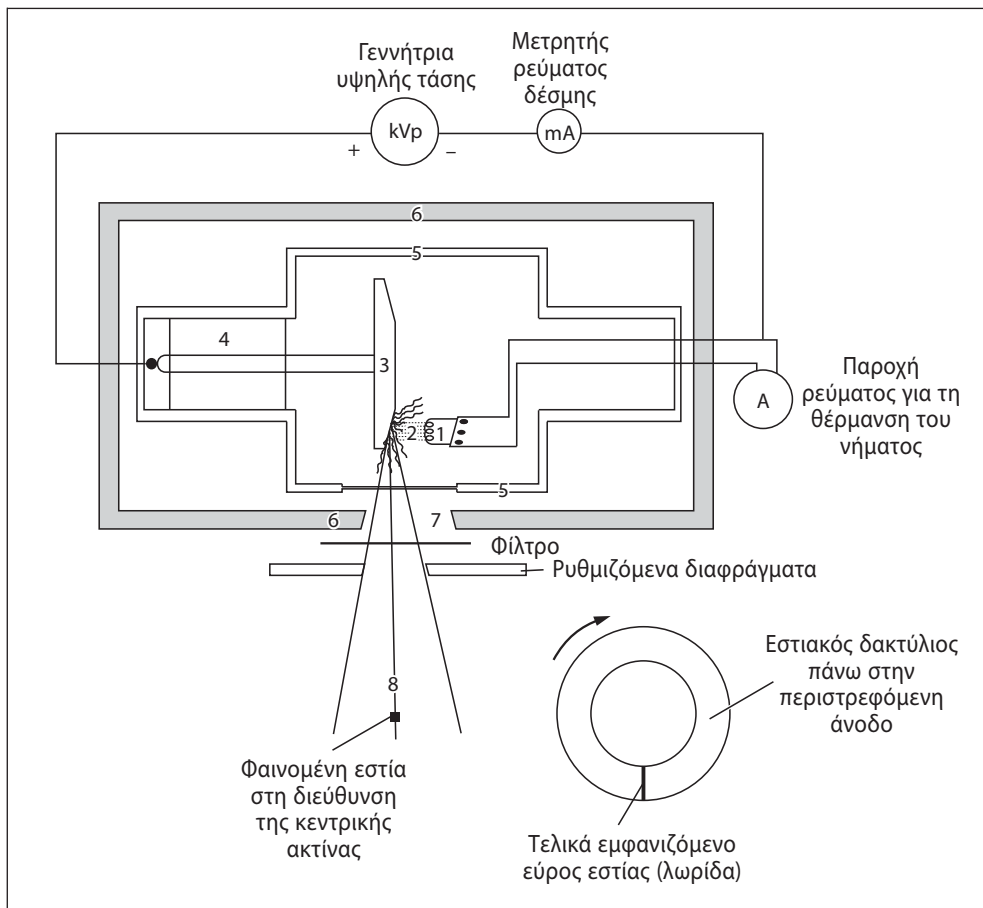
Τα εκπεμπόμενα από την άνοδο φωτόνια κατανέμονται με μεταβλητή ένταση επί ενός φάσματος που έχει μέγιστη τιμή προσδιοριζόμενη από την τάση επιτάχυνσης. Επομένως, η δέσμη των ακτίνων-X είναι πολυχρωματική. Δηλαδή, ακόμα και αν η τάση επιτάχυνσης είναι σταθερή (χωρίς διακυμάνσεις), η δέσμη των ακτίνων-X εξακολουθεί να είναι πολυχρωματική λόγω της παραγωγής ακτινοβολίας πέδησης (*bremsstrahlung*). Η ακτινοβολία αυτή είναι αποτέλεσμα της επιβράδυνσης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τα ηλεκτρικά πεδία των ατόμων του υλικού της ανόδου.

Φωτόνια με ενέργειες μικρότερες των 20 keV δεν συμβάλλουν στις περισσότερες ακτινολογικές εξετάσεις επειδή δεν διαπερνούν το εξεταζόμενο μέρος του σώματος. Επιπροσθέτως, τα φωτόνια αυτά είναι και επιζήμια επειδή η ενέργειά τους απορροφάται επιφανειακά από τον ακτινοβολούμενο ιστό και ειδικά το δέρμα. Η εξουδετέρωση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας επιτυγχάνεται με την παρεμβολή *φίλτρων* αλουμινίου ή χαλκού στη δέσμη (Εικόνα 3). Η παρεμβολή των εν λόγω φίλτρων αυξάνει τη μέση ενέργεια των φωτονίων, με αποτέλεσμα τη *σκληρυνση* της δέσμης. Στη μαστογραφία αξιοποιούνται τα χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια της διαγνωστικής απεικόνισης, περίπου 25-30 keV, για την ανίχνευση πολύ μικρών διαφορών στην απορρόφηση ακτίνων-X μεταξύ φυσιολογικού και καρκινικού ιστού.

Η λυχνία ακτίνων-X περιβάλλεται από ένα θωρακισμένο μολύβδινο περίβλημα, επιτρέποντας τη διέλευση των ακτίνων-X μέσω ενός παραθύρου. Το σχήμα και το μέγεθος του παραθύρου καλείται *άνοιγμα* (*aperture*) και μπορεί να μεταβάλλεται μέσω ρυθμιζόμενων *διαφραγμάτων* (Εικόνα 2). Οι ακτίνες-X εξέρχονται από τη λυχνία ως μια αποκλίνουσα δέσμη προερχόμενη από την περιοχή όπου η δέσμη των ηλεκτρονίων προσέκρουσε στην άνοδο, την *εστία*, και περιορίζονται από το άνοιγμα εξόδου της λυχνίας. Ο άξονας της δέσμης καλείται *κεντρική ακτίνα*, και η προβολή της εστίας στη διεύθυνση της κεντρικής ακτίνας καλείται *ενεργός εστιακή κηλίδα* ή *φαινομένη εστία* (*effective focal spot*). Όσο μικρότερες οι διαστάσεις της εστίας, τόσο καλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα της ακτινογραφικής εικόνας. Το σύνηθες εμβαδόν της είναι 1 mm^2 ή και μικρότερο, ενώ στη μαστογραφία είναι $0,1 \text{ mm}^2$ ώστε να μπορούν να ανιχνεύονται μικροσκοπικές εναποθέσεις ασβεστίου που συχνά εμπεριέχονται σε κακοήθεις όγκους του μαστού.



Εικόνα 1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, για δεδομένο μήκος κύματος, συχνότητα και ενέργεια φωτονίων.



Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών στοιχείων μιας διαγνωστικής λυχνίας ακτίνων-Χ.

Δεν παρέχονται οι λεπτομέρειες του κυκλώματος.

- 1: Νήμα καθόδου
- 2: Δέσμη ηλεκτρονίων
- 3: Περιστρεφόμενη άνοδος
- 4: Άξονας – οδηγός περιστροφής της ανόδου
- 5: Σωλήνας κενού
- 6: Θωράκιση μολύβδου
- 7: Παράθυρο
- 8: Κεντρική ακτίνα

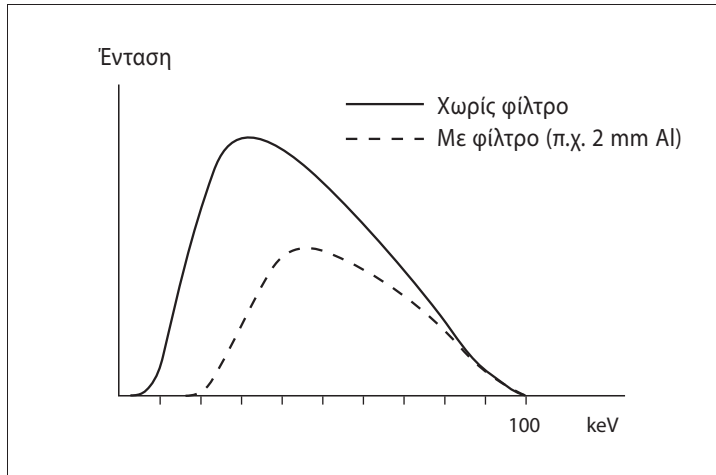
Η δέσμη των ακτίνων-Χ πρέπει πάντα να περιορίζεται από τα *διαφράγματα βάθους*, γνωστά και ως *κατευθυντήρες* (*collimators*), ώστε να ακτινοβολείται μόνο η απαιτούμενη για διαγνωστικούς σκοπούς ανατομική περιοχή και να ελαχιστοποιείται κατά αυτόν τον τρόπο η ακτινολογική έκθεση. Η προσαρμογή αυτή καλείται *ευθυγράμμιση* (*collimation*).

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

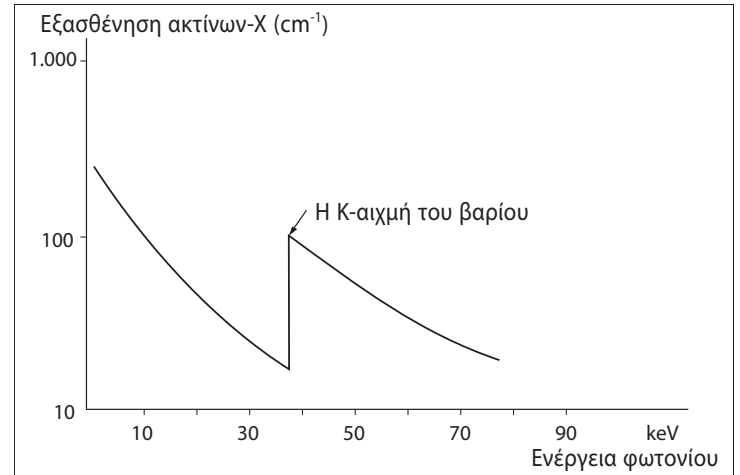
Στις χρησιμοποιούμενες από τη διαγνωστική απεικόνιση ενέργειες διακρίνονται τρεις μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη: η ελαστική σκέδαση, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η ανελαστική (Compton) σκέδαση.

Ελαστική σκέδαση είναι εκείνη η αλληλεπίδραση όπου τα φωτόνια υφίστανται αλλαγή διεύθυνσης χωρίς απώλεια ενέργειας. Το είδος αυτής της σκέδασης συναντάται σε όλες τις ενέργειες που χρησιμοποιούνται στην ακτινοδιαγνωστική αλλά καταλαμβάνει ένα μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής σκέδασης.

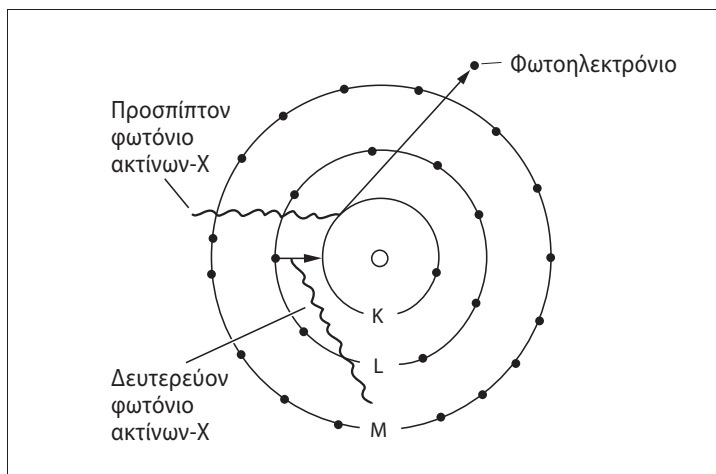
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Εικόνα 4) είναι εκείνη η αλληλεπίδραση όπου το προσπίπτον φωτόνιο αποδίδει όλη του την ενέργεια σε ένα άτομο της ύλης, το οποίο με τη σειρά του απελευθερώνει την προσλαμβάνουσα ενέργεια με τη μορφή ενός ηλεκτρονίου, το *φωτοηλεκτρόνιο*, το οποίο εξέρχεται από εσωτερική στιβάδα του ατόμου με υψηλή ταχύτητα. Η κενή θέση του φωτοηλεκτρονίου καταλαμβάνεται από ένα ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας εκπέμποντας ένα νέο φωτόνιο ακτίνων-Χ σε τυχαία



Εικόνα 3 Η επίδραση του φίλτρου στην κατανομή των φωτονιακών ενεργειών σε μια δέσμη ακτίνων-X παραγόμενη από τάση 100 kVp. Ακόμη και χωρίς φίλτρο η δέσμη «φιλτράρεται» κατά το πέρασμά της από το τοίχωμα της λυχνίας ακτίνων-X οπότε και απορρίπτονται οι χαμηλότερες ενέργειες. Επιπρόσθετο φίλτρο μειώνει τη συνολική ένταση της δέσμης αλλά αυξάνει τη μέση ενέργεια των φωτονίων.



Εικόνα 5 Το φαινόμενο της K-αίχμης. Η απορρόφηση των ακτίνων-X αυξάνεται απότομα όταν, για δεδομένο στοιχείο, η ενέργεια των φωτονίων είναι ίση με την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων της K-στιβάδας του συγκεκριμένου στοιχείου.



Εικόνα 4 Η φωτοηλεκτρική αλληλεπίδραση.

διεύθυνση και με ενέργεια χαρακτηριστική για το συγκεκριμένο στοιχείο. Το δευτερεύον φωτόνιο είναι χαμηλότερης ενέργειας από το προσπίπτον, εμφανίζεται ως δευτερεύουσα ακτινοβολία και απορροφάται κυρίως από νέες αλληλεπιδράσεις. Το άτομο παραμένει ιονισμένο, ενώ το απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο συγκρούεται με άλλα άτομα και προκαλεί ένα μεγάλο αριθμό από δευτερογενείς ιονισμούς. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου εσωτερικής στιβάδας. Πιο συγκεκριμένα, εντός του ακτινοδιαγνωστικά σχετιζόμενου εύρους ενεργειών, μόνο τα δύο ηλεκτρόνια της εσωτερικής K-στιβάδας έχουν ενέργεια σύνδεσης επαρκώς υψηλή ώστε να δεσμεύσουν τις φωτοηλεκτρικές αντιδράσεις. Η ενέργεια του φωτονίου που είναι μόλις επαρκής ώστε να απελευθερωθεί ένα φωτοηλεκτρόνιο από την K-στιβάδα συμβολίζεται ως *K-αίχμη* επειδή η εξασθένηση των ακτίνων-X αυξάνεται απότομα στο συγκεκριμένο ενεργειακό επίπεδο (Εικόνα 5). Οι *K-αίχμες* έχουν χαρακτηριστική τιμή για κάθε διαφορετικό στοιχείο (Πίνακας 1). Λόγω της σύστασης των μαλακών ιστών από ελαφρά στοιχεία (C, N, O), η φωτοηλεκτρική απορρόφηση γίνεται ποσοτικά ασήμαντη για ενέργειες πάνω από τα 35 keV. Όμως, επειδή η ενέργεια σύν-

Πίνακας 1

Στοιχείο	K-αίχμη (keV)
Άνθρακας	0,3
Αζωτο	0,4
Οξυγόνο	0,5
Φώσφορος	2,1
Ασβέστιο	4,0
Ιώδιο	33,2
Βάριο	37,4
Μόλυβδος	88,1
Σίδηρος	7,1

δεσης των ηλεκτρονίων της K-στιβάδας είναι υψηλότερη σε βαρύτερα στοιχεία (όπως το ασβέστιο), το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παραμένει ποσοτικά σημαντικό κατά την απεικόνιση οστών με ενέργειες έως τα 50 keV. Το βάριο και το ιώδιο έχουν την K-αίχμη στην ενέργεια των 37 keV και 33 keV, αντίστοιχα, και είναι αυτές οι υψηλές K-αίχμες που αξιοποιούνται όταν το βάριο και το ιώδιο χρησιμοποιούνται ως σκιαγραφικά μέσα.

Η *ανελαστική (Compton) σκέδαση* (Εικόνα 6) είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των προσπίπτοντων φωτονίων με τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου τα οποία και αποβάλλονται (ηλεκτρόνια ανάκρουσης) ενώ το άτομο ιονίζεται. Κατά την ανελαστική σκέδαση, το προσπίπτον φωτόνιο, μετά τη μεταφορά μέρους της ενέργειάς του στο ηλεκτρόνιο, συνεχίζει την πορεία του με ελαττωμένη ενέργεια και αλλαγή διεύθυνσης. Κάθε φωτόνιο μπορεί να συμμετέχει σε αρκετές τέτοιες διαδικασίες ανελαστικής σκέδασης κατά τη διαδρομή του εντός του ακτινοβολούμενου ιστού μέχρι τελικά να αποδώσει όλη του την ενέργεια και να απορροφηθεί από αυτόν. Η ανελαστική σκέδαση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο σκέδασης στην ακτινοδιαγνωστική. Εξαρτάται πρωτίστως από τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου ιστού και σχετίζεται σχεδόν γραμμικά με την πυκνότητα μάζας των ιστών. Είναι ανεξάρτητο του ατομικού αριθμού, γι' αυτό και η αντίθεση μεταξύ οστού και μαλακού ιστού ελαττώνεται σε υψηλότερες ενέργειες, όπου και εκλείπει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Τεχνικές βασισμένες στην ανάκλαση υπερήχων

Η κλινική απεικόνιση με υπερήχους, *υπερηχοτομογραφία* (υπερηχογραφία/διαγνωστικός υπέρηχος), βασίζεται στην εκπομπή υψηλής συχνότητας ηχητικών κυμάτων με σκοπό την καταγραφή της ηχούς που παράγεται από την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων καθώς αυτά διαδίδονται μέσα στους ιστούς και στα υπό εξέταση όργανα. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος υπερηχογραφήματος είναι ένας *μεταλλάκτης* (*transducer*) που λειτουργεί τόσο ως πομπός όσο και ως δέκτης των υπερηχητικών κυμάτων, μια *γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών παλμών* (*ultrasound pulse generator*), ένας *διαμορφωτής υπερηχητικής δέσμης* (*ultrasound beam former*), ένας διακόπτης εκπομπής/λήψης, ένας επεξεργαστής των λαμβανομένων σημάτων και μια μονάδα προβολής εικόνας.

Η παραγωγή και η φύση των υπερήχων

Τα υπερηχητικά κύματα είναι *μηχανικά* κύματα, τα οποία διαδίδονται στην ύλη. Η διάδοσή τους μέσα σε ένα υλικό βασίζεται στη σύμφωνη (εξαναγκασμένη) ταλάντωση των μορίων (σωματιδίων) του μέσου διάδοσης παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του μετώπου του κύματος (διαμήκη κύματα). Το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μικρές μονάδες ύλης, *σωματίδια ήχου*, που δεν χρειάζεται να έχουν ομοιόμορφη μοριακή σύνθεση (την οποία ούτως ή άλλως σπάνια έχουν). Τα μεμονωμένα σωματίδια ταλαντώνονται γύρω από μια θέση ισορροπίας καθορισμένη στον χώρο, σαν μικρά σφαιρικά σώματα που ταλαντώνονται ελαστικά μεταξύ δύο ελατηρίων. Ο αριθμός των ταλαντώσεων των σωματιδίων σε ένα δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα του ήχου και μετρείται σε μονάδες *Hertz* (Hz). Οι σύμφωνες ταλαντώσεις των σωματιδίων διαδίδονται εντός του υλικού μέσω μηχανικής μεταφοράς κινητικής ενέργειας από το ένα σωματίδιο στο επόμενο δημιουργώντας εναλλασσόμενες ζώνες πυκνωμάτων και αραιωμάτων τα οποία διαδίδονται εντός του υλικού με *ταχύτητα διάδοσης* που είναι σταθερή και συγκεκριμένη για το υλικό. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών πυκνωμάτων (ή αραιωμάτων) ορίζει το *μήκος κύματος* του ήχου. Έτσι, τα διαδιδόμενα ηχητικά κύματα χαρακτηρίζονται από τη συχνότητά τους (ν), το μήκος κύματος (λ) και την ταχύτητα διάδοσης (c) μέσω της σχέσης $c = \nu \times \lambda$, όπως και τα άλλα είδη κυμάτων.

Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στην υπερηχογραφία βρίσκονται στην περιοχή 2 MHz με 18 MHz (1 MHz = 10^6 Hz), ενώ για ειδικούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα στην οφθαλμολογία και τη δερματολογία, η συχνότητα φτάνει έως 40 MHz. Η ταχύτητα διάδοσης (η ταχύτητα του ήχου) στους μαλακούς ιστούς, στο αίμα και στο νερό ποικίλλει κατά ένα μικρό ποσοστό από τη μέση τιμή των $1.540 \text{ m} \times \text{sec}^{-1}$, με αντίστοιχο μήκος κύματος περίπου $\lambda = 0,75 \text{ mm}$ σε συχνότητα 2 MHz, και $\lambda = 0,1 \text{ mm}$ σε συχνότητα 16 MHz. Η ταχύτητα διάδοσης είναι πολύ υψηλότερη σε πυκνά οστά (περίπου $3.500 \text{ m} \times \text{sec}^{-1}$) και πολύ χαμηλότερη στον αέρα ($300 \text{ m} \times \text{sec}^{-1}$).

Η ιδιότητα ενός υλικού που καθορίζει την ταχύτητα (c) είναι η *ακουστική εμπέδηση* (*impedance*) (Z) η οποία σχετίζεται με την *πυκνότητα* (ρ) του υλικού και το *μέτρο ελαστικότητας* (E) μέσω της σχέσης:

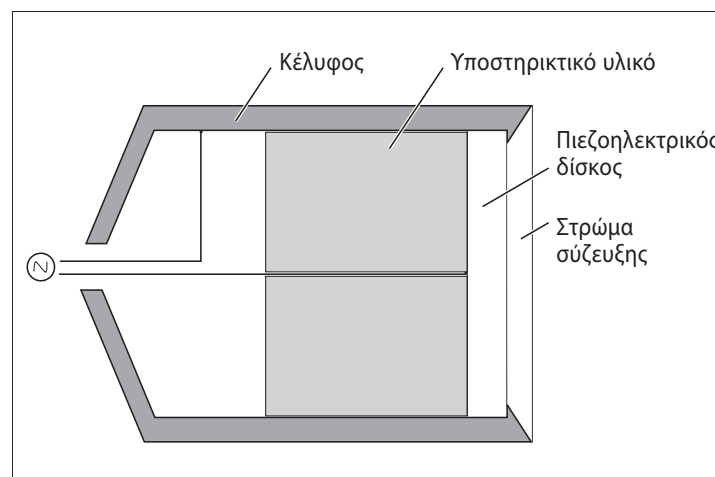
$$Z = \sqrt{\rho \times E} = \rho \times c$$

Οι διαφορές στην ακουστική εμπέδηση (Z) μεταξύ διαφορετικών μαλακών ιστών είναι μικρές και αυτή είναι η ιδιότητα που χρησιμοποιείται στην υπερηχογραφία.

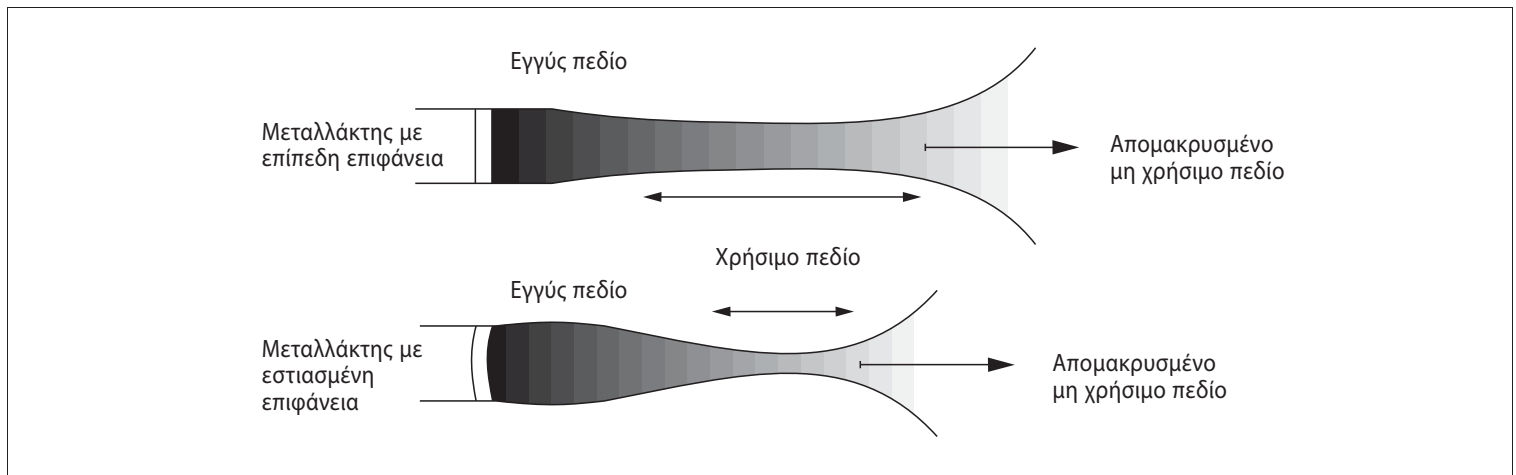
Είναι σημαντικό επίσης να γίνει διάκριση της διάδοσης μεταξύ του ακουστικού κύματος και των σύμφωνων ταλαντώσεων των μεμονωμένων σωματιδίων του υλικού. Η μέγιστη ταχύτητα των σωματιδίων, όταν διέρχονται από τις θέσεις ισορροπίας τους, σχετίζεται με την ενέργεια που μεταφέρεται από το ακουστικό κύμα μέσω του υλικού. Στις ενέργειες που εφαρμόζονται στην υπερηχογραφία, η μέγιστη ταχύτητα των σωματιδίων σε μαλακούς ιστούς είναι μόλις $3-4 \text{ cm} \times \text{sec}^{-1}$ ή μικρότερη, και η απόσταση από τη θέση ισορροπίας μέχρι τη θέση μέγιστης απομάκρυνσης ονομάζεται *πλάτος* και είναι της τάξης των 2 nm (νανόμετρα) ή και λιγότερο. Το πλάτος δεν πρέπει να συγχέεται με το μήκος κύματος (λ) του ήχου.

Μεταλλάκτης υπερήχων

Η πηγή των υπερήχων για διαγνωστική απεικόνιση είναι ο *πιεζοηλεκτρικός μεταλλάκτης υπερήχων* (Εικόνα 44). Το βασικό στοιχείο αυτού του συστήματος είναι ένας δίσκος από ειδικό κεραμικό υλικό που αποτελείται από ομαλά ευθυγραμμισμένα μόρια, τα οποία έχουν την ιδιότητα να είναι ηλεκτρικά δίπολα. Ένα λεπτό στρώμα από ηλεκτρικά αγωγίμο μέταλλο τοποθετείται πάνω και στις δύο πλευρές του δίσκου ούτως ώστε ένα ηλεκτρικό πεδίο (που προκαλείται από τάση της τάξης των 150 volts) να μπορεί να διαδοθεί εντός του δίσκου. Η όλη διάταξη (δίσκος και αγωγίμες μεταλλικές επιφάνειες) ονομάζεται *κρύσταλλος*. Πίσω από τον κρύσταλλο υπάρχει ένα απορροφητικό υλικό. Όταν εφαρμοστεί το ηλεκτρικό πεδίο, τα μοριακά δίπολα αναπροσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα να αλλάξει το πάχος του δίσκου. Όταν εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας, ο δίσκος ταλαντώνεται και η ταλάντωση αυτή γίνεται ιδιαίτερα ισχυρή και ομοιόμορφη σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, τη *συχνότητα συντονισμού*. Όταν η εναλλασσόμενη τάση διακόπτεται, ο κρύσταλλος εξακολουθεί να ταλαντώνεται στη συχνότητα συντονισμού, η οποία καθορίζεται από το πάχος του δίσκου. Ο ρόλος του «υλικού υποστήριξης» (απορροφητικό υλικό) του μεταλλάκτη είναι να συντομεύσει άμεσα τη διάρκεια δόνησης του κρυστάλλου. Αυξάνοντας τη χρονική διάρκεια και επομένως το *χωρικό μήκος* (*spatial pulse length*) του παλμού υπερήχων μειώνεται η αξονική διακριτική ικανότητα, κατά συνέπεια είναι σημαντικό η χρονική διάρκεια των υπερήχων να είναι εξαιρετικά



Εικόνα 44 Βασικό σχηματικό διάγραμμα μεταλλάκτη.



Εικόνα 45 Σχήμα δέσμης υπερήχων προερχόμενης από εστιασμένο ή μη εστιασμένο μεταλλάκτη.

μικρή (της τάξης του 1 μsec). Η μείωση του μήκους κύματος (δηλαδή η αυξημένη συχνότητα) μειώνει επίσης το χωρικό μήκος του παλμού και βελτιώνει τη διακριτική ικανότητα.

Ο μεταλλάκτης καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα υλικού (υλικό σύζευξης) με ακουστική εμπέδηση μεταξύ αυτής του κεραμικού δίσκου και του δέρματος. Όταν ο μεταλλάκτης συγκρατείται στην επιφάνεια του δέρματος, η ακουστική εμπέδηση βελτιώνεται περαιτέρω από ένα υδατώδες υγρό (gel), το οποίο έχει απλωθεί εκ των προτέρων πάνω στο δέρμα.

Ο πιεζοηλεκτρικός μεταλλάκτης λειτουργεί και στην αντίθετη κατεύθυνση, ως δέκτης της υπερηχητικής ηχώ (δηλαδή ως δέκτης των ανακλώμενων υπερηχητικών κυμάτων). Ο χρόνος λήψης είναι πολύ μεγαλύτερος (μερικές εκατοντάδες μsec) από τον χρόνο εκπομπής, λόγω του χρόνου που απαιτείται να φτάσει η ηχώ στον μεταλλάκτη από δομές σε μεγάλο βάθος. Όταν ο μεταλλάκτης λειτουργεί ως δέκτης και δεχθεί («ακούσει») τα εισερχόμενα κύματα υπερήχων, ο δίσκος παραμορφώνεται μηχανικά και αναπτύσσεται ηλεκτρικό δυναμικό της τάξης των 2 μvolts στην επιφάνειά του. Τα εν λόγω ηλεκτρικά σήματα είναι αυτά που αξιοποιούνται για τη δημιουργία εικόνας.

Για λόγους απλότητας θα αναλύσουμε αρχικά έναν σαρωτή με έναν μεταλλάκτη. Ο κεραμικός δίσκος του μεταλλάκτη ενεργεί ως δονούμενο έμβολο που παράγει μια δέσμη υπερηχητικών κυμάτων (Εικόνα 45). Εάν ο δίσκος είναι κυκλικού σχήματος και επίπεδος, η δέσμη γίνεται σχεδόν ραβδόμορφου σχήματος σε συγκεκριμένη απόσταση από τον δίσκο, το *εγγύς πεδίο* ή *ζώνη Fresnel*, και η ένταση της δέσμης πέφτει απότομα κατά μήκος των ορίων της δέσμης. Αυτό αποτελεί το χρήσιμο μέρος της δέσμης. Σε μια ορισμένη απόσταση από τον κρύσταλλο η δέσμη αρχίζει να αποκλίνει παίρνοντας σχήμα κώνου, το *απώτερο πεδίο* ή *ζώνη Fraunhofer*, η οποία δεν είναι χρήσιμη για την απεικόνιση. Η φυσική που διέπει το σχήμα της δέσμης είναι μάλλον πολύπλοκη, αλλά εξαρτάται πρωτίστως από τη διάμετρο του κρυστάλλου και τη συχνότητα του ήχου. Ο δίσκος μπορεί να έχει κοίλο σχήμα ή να χρησιμοποιηθεί ένας ακουστικός φακός για να κάνει τη δέσμη συγκλίνουσα προς την εστία, αλλά αυτό μειώνει το μήκος του χρήσιμου πεδίου (Εικόνα 45). Η πλευρική διακριτική ικανότητα (lateral resolution) εξαρτάται από το πλάτος της δέσμης. Με την εστίαση της δέσμης βελτιώνεται η διακριτική ικανότητα, αλλά μειώνεται το πάχος του ιστού που απεικονίζεται.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν ο μεταλλάκτης χρησιμοποιείται για απεικόνιση, τα κύματα εκπέμπονται διαδοχικά σε μικρούς συρμούς οι οποίοι ακολουθούνται από μία παύση κατά τη διάρκεια της οποίας ο μεταλλάκτης λαμβάνει την ηχώ. Το

χωρικό μήκος των συρμών είναι 2 mm ή και λιγότερο, αλλά ακολουθεί τη διαδρομή της συνεχούς δέσμης σαν μια διατομή της η οποία διαδίδεται στο υλικό μέσον.

Αλληλεπιδράσεις μεταξύ υπερήχων και ύλης

Σε όλες τις συχνότητες και την ένταση των υπερήχων που εφαρμόζονται στη διαγνωστική απεικόνιση, υπάρχουν τρία είδη αλληλεπιδράσεων: Η *απορρόφηση* (absorption), η *ανάκλαση* (reflection) και η *διάχυτη σκέδαση* (diffuse scatter), φαινόμενα που συμβάλλουν στην εξασθένηση της έντασης της δέσμης υπερήχων. Άλλα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η διάθλαση και η περίθλαση, αλλά αποτελούν φαινόμενα μικρής πρακτικής σημασίας. Οι πολύ υψηλότερης έντασης δέσμες και μεγαλύτερης διάρκειας από εκείνες που χρησιμοποιούνται για απεικόνιση επιφέρουν διάφορες βλάβες στον ιστό, και δεν αναλύονται στο παρόν κείμενο.

Απορρόφηση

Η απορρόφηση των υπερήχων από ιστούς σημαίνει μεταφορά κινητικής ενέργειας από τη σύμφωνη ταλάντωση των σωματιδίων σε κίνηση χωρίς τάξη, δηλαδή σε ανάπτυξη *θερμότητας*, η οποία προκαλείται από την εσωτερική τριβή μεταξύ των συστατικών μορίων του ιστού. Η απορρόφηση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο της εξασθένησης της δέσμης υπερήχων. Η ένταση της δέσμης εξασθενεί εκθετικά με την απόσταση και εκφράζεται σε *decibels* (dB). Επιπλέον, η απορρόφηση αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα μέσα στους μαλακούς ιστούς. Κατά μέσο όρο, η απορρόφηση φτάνει σε $1 \text{ dB cm}^{-1} \text{ MHz}^{-1}$. Έτσι, σε βάθος 10 cm η ένταση μιας δέσμης 5 MHz έχει μειωθεί κατά 50 dB, δηλαδή έχει υποστεί μείωση κατά 100.000 φορές.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι μια ηχώ από αυτό το βάθος θα πρέπει να κάνει μια διαδρομή άλλων 10 cm μέχρι τον μεταλλάκτη, το σήμα θα έχει μειωθεί κατά περίπου 100 dB σε σχέση με μια ηχώ προερχόμενη από μια επιφανειακή δομή. Ένα τόσο πολύ μειωμένο σήμα είναι σχεδόν πρακτικά άχρηστο. Ως εκ τούτου, για την απεικόνιση δομών σε μεγάλο βάθος, όπως για παράδειγμα στο υπογάστριο, χρησιμοποιούνται χαμηλότερες συχνότητες, κάτι το οποίο μειώνει όμως τη διακριτική ικανότητα. Η απορρόφηση στα ούρα είναι σημαντικά χαμηλότερη απ' ό,τι στους μαλακούς ιστούς. Μια γεμάτη κύστη μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως *ακουστικό παράθυρο* για την πύελο.

Το decibel (dB) είναι ένα μέτρο των σχετικών εντάσεων του ήχου και δίνεται από τη σχέση: $dB = 10 \times \log \frac{I_2}{I_1}$, όπου I_1 είναι η ένταση της δέσμης του εκπεμπόμενου από τον μεταλλάκτη ηχητικού κύματος και I_2 είναι η ένταση της δέσμης του ανακλώμενου από το εξεταζόμενο μέρος του σώματος ηχητικού κύματος που προσπίπτει στον μεταλλάκτη.

Η ένταση της δέσμης του ήχου είναι η ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στη δέσμη και εκφράζεται συνήθως σε watt (W) cm^{-2} . $1 W = 1 \text{ joule} \times sec^{-1}$.

Ανάκλαση

Όταν το διαδιδόμενο μέτωπο του υπερηχητικού κύματος συναντά μια διεπαφή μεταξύ δύο ιστών διαφορετικής ακουστικής εμπέδησης (δηλαδή όταν μεταβαίνει από ένα μέσον σε ένα άλλο), μέρος της ενέργειας ανακλάται ως ηχώ. Εάν οι ακουστικές εμπεδήσεις των δύο ιστών είναι πανομοιότυπες, δεν παράγεται ηχώ. Αν η διαφορά των ακουστικών εμπεδήσεων είναι μεγάλη, όπως μεταξύ των μαλακών ιστών και των οστών ή του αέρα, σχεδόν όλη η ενέργεια των κυμάτων ανακλάται, παράγοντας μια ισχυρή ηχώ και μια *ακουστική σκιά* πίσω από το οστό ή το γεμάτο με αέρα όργανο. Αυτή η επίδραση καθιστά αδύνατη την απεικόνιση του ενήλικου εγκέφαλου μέσα από το κρανίο, ενώ ο εγκέφαλος νεογνού μπορεί να απεικονιστεί άριστα διαμέσου των κρανιακών πηγών. Επίσης καθίσταται αδύνατη η απεικόνιση των πνευμόνων και του γεμάτου αέρα εντέρου.

Στην υπερηχογραφία χρησιμοποιούνται οι ανακλάσεις της ηχούς από τις διεπαφές μεταξύ των ιστών με μικρές ή μέτριες διαφορές στην ακουστική εμπέδηση. Αν η διεπαφή είναι απόλυτα ομαλή και επαρκούς μεγέθους, το κύμα ανακλάται σαν από καθρέφτη, ανάκλαση η οποία ονομάζεται *κατοπτρική ανάκλαση* (*specular reflection*) (Εικόνα 46Α). Αυτό σημαίνει ότι, εάν η διεπαφή σχηματίζει γωνία με την ακτίνα της δέσμης, η ηχώ μπορεί να μη φτάσει στον μεταλλάκτη. Έτσι, από ομοιόμορφες επιφάνειες, όπως για παράδειγμα ένας ομφάλιος λώρος, θα

απεικονιστούν μόνο τμήματα της επιφάνειας που είναι κάθετα ως προς τη δέσμη. Εάν, ωστόσο, η επιφάνεια είναι ανομοιογενής (τραχεία-κυματιστή), το κύμα ανακλάται προς διαφορετικές κατευθύνσεις, και μέρος μόνον αυτού μπορεί να φθάσει στον μεταλλάκτη (Εικόνα 46Β). Αυτός είναι ο λόγος που τα όργανα με καμπύλη επιφάνεια απεικονίζονται, αν και με αντίθεση η οποία μειώνεται όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με τη δέσμη.

Οι δομές που παράγουν ηχώ παρουσιάζονται φωτεινές και ονομάζονται ηχογενείς (*echogenic*). Οι ιστοί με μεγαλύτερη ηχογένεια (*echogenicity*) σε σχέση με τους περιβάλλοντες ιστούς ονομάζονται *υπερηχογενείς*, ενώ οι ιστοί με την αντίθετη ιδιότητα καλούνται *υποηχογενείς/υπόηχοι*.

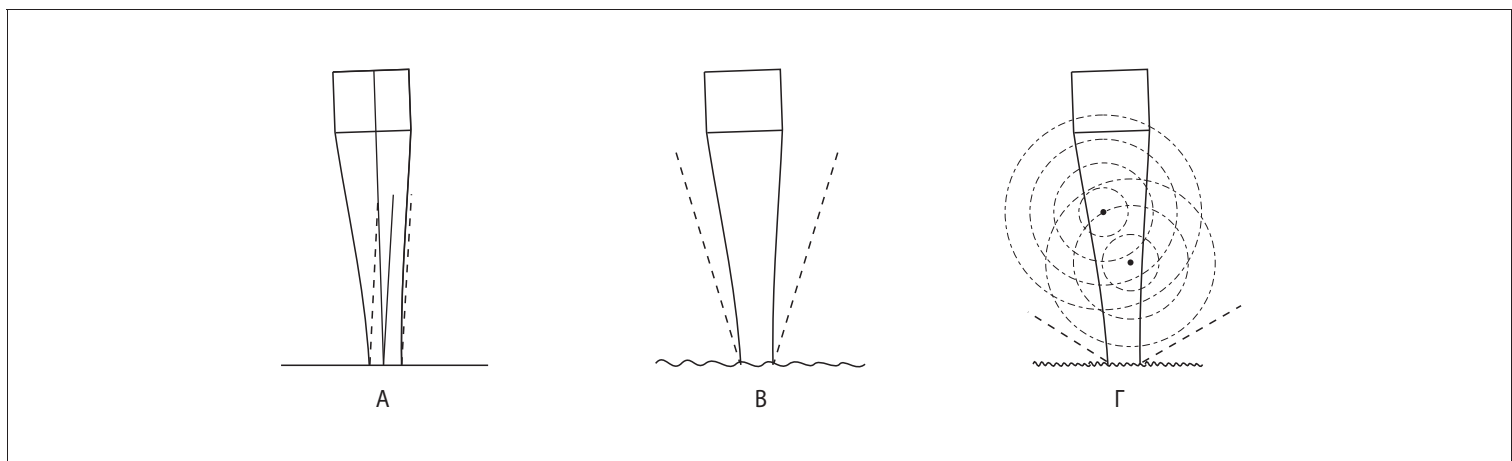
Διάχυτη σκέδαση

Όταν ένα υπερηχητικό κύμα συναντά μια έντονα κυματοειδή επιφάνεια ή σωματίδια τα οποία είναι μικρού μεγέθους σε σχέση με το μήκος κύματος, για παράδειγμα μικρά αιμοφόρα αγγεία, και η ακουστική εμπέδηση αυτών διαφέρει από τους περιβάλλοντες ιστούς, τα σωματίδια προκαλούν διάχυτη σκέδαση υπό τη μορφή σφαιρικών κυμάτων (Εικόνα 46Γ). Αν και μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτών των κυμάτων φτάνει στον μεταλλάκτη, εν τούτοις συμβάλλουν στην απεικόνιση παρεγχυματώδων οργάνων, όπως το ήπαρ, ο σπλήνας, οι νεφροί και η μήτρα, καθώς επίσης και οι σκελετικοί μύες.

Επίσης και οι μικρές αέριες φυσαλίδες είναι αποτελεσματικές στην παραγωγή διάχυτης σκέδασης. Μετά τη συμπίεση από το εισερχόμενο ηχητικό κύμα δονούνται και παράγουν ηχητικά κυκλικά κύματα των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του κύματος από τον μεταλλάκτη και καλούνται *αρμονικές συνιστώσες*.

Τρόποι απεικόνισης με υπερήχους (Modes)

Θεωρώντας σταθερή την ταχύτητα του ήχου ($1.540 \text{ m} \times \text{sec}^{-1}$) σε μαλακούς ιστούς, το οποίο σχεδόν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή της



Εικόνα 46

(Α) Κατοπτρική ανάκλαση.

Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης. Εάν η γωνία αποκλίνει σημαντικά από την κάθετο, τα ανακλώμενα ηχητικά κύματα δεν θα φτάσουν στον μεταλλάκτη.

(Β) Αντανάκλαση από μη ομαλή επιφάνεια.

Τα ανακλώμενα κύματα διαδίδονται εντός ενός γωνιακού εύρους, οπότε μόνο ένα μικρό ποσοστό καταλήγει στον μεταλλάκτη.

(Γ) Διάχυτη σκέδαση.

Μικρά αιμοσφαίρια ή μια απαλά κυματοειδής επιφάνεια θα διαδώσει τα ηχητικά κύματα σε όλες τις κατευθύνσεις, οπότε μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό επιστρέφει στον μεταλλάκτη.

εκπομπής έως τη στιγμή της λήψης της ηχούς ενός παλμού του 1 msec στον μεταλλάκτη μπορεί να μεταφραστεί απευθείας σε διπλάσια απόσταση από (και προς) την ανακλαστική επιφάνεια. Κάτι το οποίο είναι ανάλογο με αυτό που κάνει ένας ψαράς όταν υπολογίζει το βάθος ενός κοπαδιού ρέγγας με το υποβρύχιο ραντάρ του. Ο χρόνος για τη λήψη ηχούς από βάθος 10 cm θα είναι περίπου 130 msec, οπότε η χρονική διακριτική ικανότητα είναι αναγκαίο να είναι ακριβής.

Η ηχώ που λαμβάνεται από στατικό μεταλλάκτη μπορεί να παρουσιαστεί με τη μορφή επαρμάτων σε παλμογράφο με ύψος ανάλογο προς την ένταση της ηχούς. Ο συγκεκριμένος τρόπος απεικόνισης ονομάζεται *A-τρόπος απεικόνισης (A-mode)* (Εικόνα 47A). Στον *B-τρόπο απεικόνισης (B-mode, brightness mode)*, αντί να απεικονίζονται τα επιστρέφοντα ηχητικά σήματα ως επαρμάτα, απεικονίζονται ως κηλίδες διαφορετικής φωτεινότητας στην οθόνη (Εικόνα 47B). Αν το ανακλώμενο αντικείμενο κινείται (αλλάζοντας απόσταση από τον μεταλλάκτη) με την πάροδο του χρόνου, τότε οι κηλίδες κινούνται εμπρός ή πίσω κατά μήκος του ίχνους του παλμογράφου. Έτσι, αν το ίχνος καταγράφεται σε μια ταινία, θα ληφθεί ένα διάγραμμα γραμμής στο οποίο οι καμπύλες δείχνουν την κίνηση των ανακλαστικών κυμάτων ως συνάρτηση του χρόνου. Ο εν λόγω τρόπος απεικόνισης χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στην καρδιολογία, για παράδειγμα στη μελέτη της κίνησης των βαλβίδων, και καλείται *απεικόνιση κίνησης ή απεικόνιση M (M-mode)* (Εικόνα 47M).

Κανένας όμως από τους παραπάνω τρόπους απεικόνισης δεν παράγει πραγματικές εικόνες. Εάν, ωστόσο, η δέσμη από τον μεταλλάκτη σαρώνει έναν τομέα μετακινούμενη παλινδρομικά (Εικόνα 47 Τομέας) με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, περίπου 20 φορές ανά δευτερόλεπτο, και εάν η ηχώ απεικονίζεται με τον B-τρόπο απεικόνισης κατά μήκος μιας γραμμής η οποία σαρώνει την οθόνη σε συγχρονισμό με τον μεταλλάκτη, τότε παράγεται μια τομογραφική εικόνα σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή μια δισδιάστατη εικόνα. Ο τρόπος αυτός καλείται *δισδιάστατος B-τρόπος απεικόνισης (B-mode imaging)*.

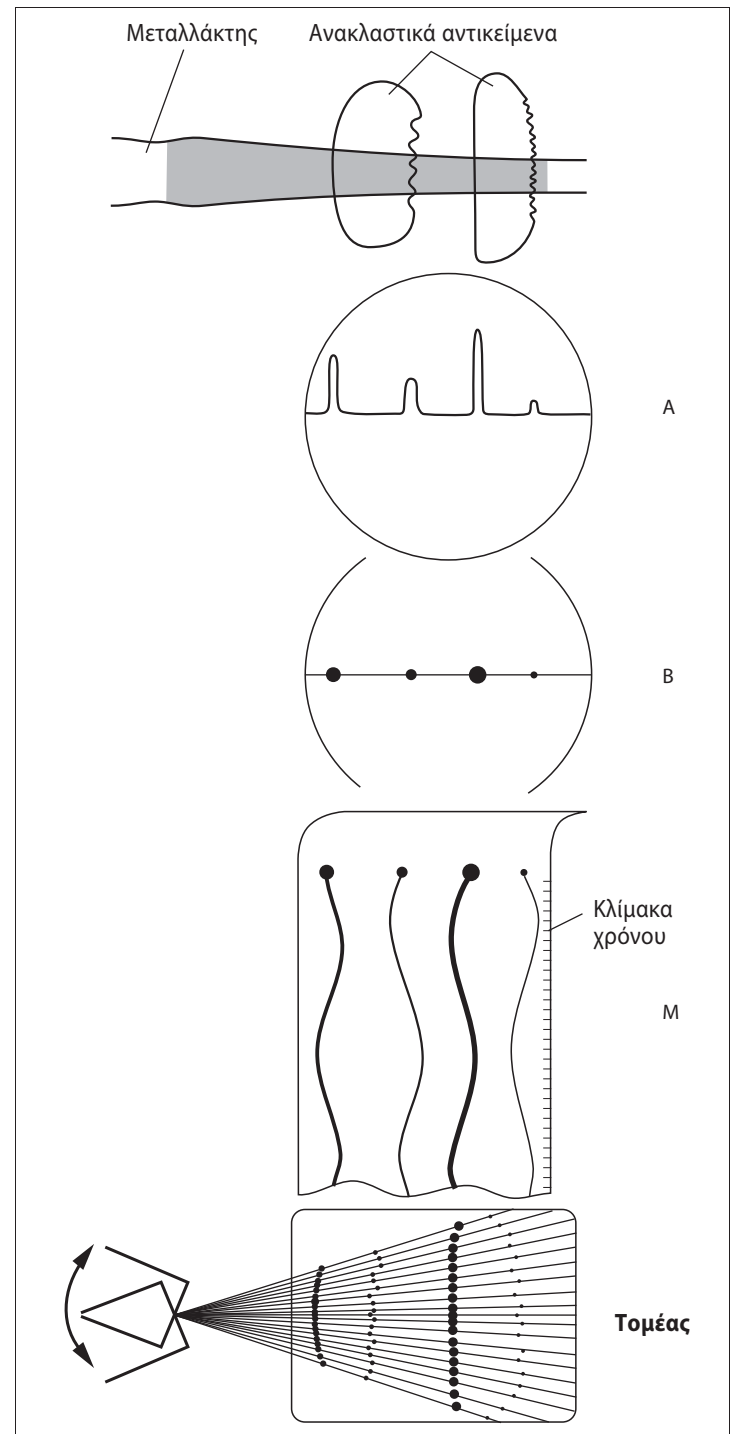
Διάταξη του μεταλλάκτη

Ο τρόπος σάρωσης γωνιακού τομέα επιτυγχάνεται μέσω μιας μηχανικής διάταξης που περιλαμβάνει κινούμενα μέρη (Εικόνα 48A), η οποία πλέον έχει σχεδόν καθολικά αντικατασταθεί από διατάξεις πολλαπλών κρυστάλλων στερεάς κατάστασης, και είναι η λεγόμενη *γραμμική (ή καμπύλη) διάταξη μεταλλακτών (linear or curvilinear array transducers)*. Ο στοιχειώδης κρυστάλλος είναι ορθογώνιος και πολύ λεπτός (τυπικά μικρότερος από το μισό του μήκους κύματος του ήχου που παράγεται) ούτως ώστε ένας μεγάλος αριθμός (π.χ. 25 ανά cm) από στενά απέχοντες στοιχειώδεις κρυστάλλους να περιέχεται στη διάταξη.

Μια γραμμική διάταξη λειτουργεί ακολουθώντας δύο διαφορετικές αρχές:

Μια ομάδα, για παράδειγμα, 20 στοιχειωδών κρυστάλλων ενεργοποιούνται ταυτόχρονα και παράγουν ένα σύντομο συρμό κυμάτων ο οποίος διαμορφώνεται σαν να προέρχεται από έναν μόνο μεταλλάκτη. Ενώ ο συρμός των κυμάτων διαδίδεται μέσα στους ιστούς, ένας μεγαλύτερος αριθμός στοιχειωδών κρυστάλλων λαμβάνει την ηχώ. Η επόμενη ομάδα των 20 στοιχειωδών κρυστάλλων που πρόκειται να διεγερθεί επικαλύπτει την πρώτη ομάδα με, για παράδειγμα, 4 στοιχειώδεις κρυστάλλους, και ούτω καθεξής μέχρι να καλυφθεί το μήκος ολόκληρης της διάταξης, και η εικόνα που προκύπτει είναι ορθογώνιου σχήματος (Εικόνα 48B).

Ένας άλλος τρόπος λειτουργίας μιας γραμμικής διάταξης είναι η σάρωση τύπου *φασικής διάταξης (phased array)*. Κατ' αυτήν οι κρυστάλλοι διεγείρονται στο σύνολό τους και όχι κατά ομάδες με εφαρμογή κατάλληλων χρονικών καθυστερήσεων μεταξύ των



Εικόνα 47 Τρόποι απεικόνισης με υπέρηχους.

Διάδοση υπερηχητικής δέσμης μέσα από ποικίλες ανακλαστικές επιφάνειες. **A-τρόπος απεικόνισης, «απεικόνιση πλάτους».**

Οι ανακλάσεις παρουσιάζονται στην οθόνη του παλμογράφου με τη μορφή επαρμάτων με πλάτος και θέση που αντιπροσωπεύει την ανακλαστική επιφάνεια.

B-τρόπος απεικόνισης, «απεικόνιση φωτεινότητας».

Οι ανακλάσεις παρουσιάζονται στην οθόνη με τη μορφή κηλίδων με πλάτος και θέση που αντιπροσωπεύουν την ανακλαστική επιφάνεια.

M-τρόπος απεικόνισης, «απεικόνιση κίνησης».

Οι ανακλάσεις καταγράφονται με B-τρόπο απεικόνισης σε γραμμικό διάγραμμα. Αν η ανακλαστική επιφάνεια κινείται, η κίνησή της αποτυπώνεται με κυματοειδείς καμπύλες. Η περιοδικότητα και το πλάτος της κίνησης φαίνονται καθαρά.

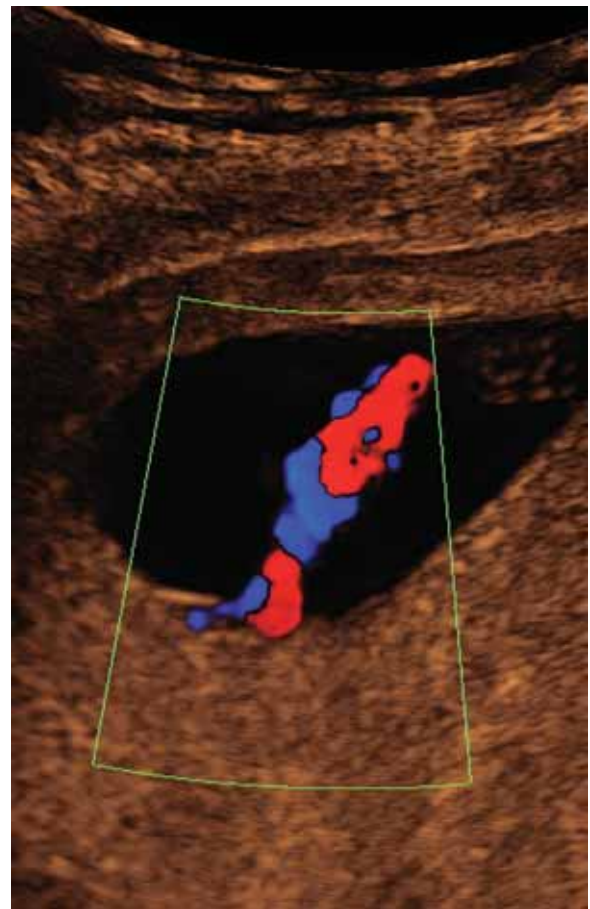
Σάρωση τομέα, τομογραφική απεικόνιση πραγματικού χρόνου.

Οι ανακλάσεις παρουσιάζονται με B-τρόπο απεικόνισης σε βίντεο-οθόνη καθώς ο μεταλλάκτης σαρώνει μπρος πίσω μέσα από μια γωνία (έναν «τομέα»).



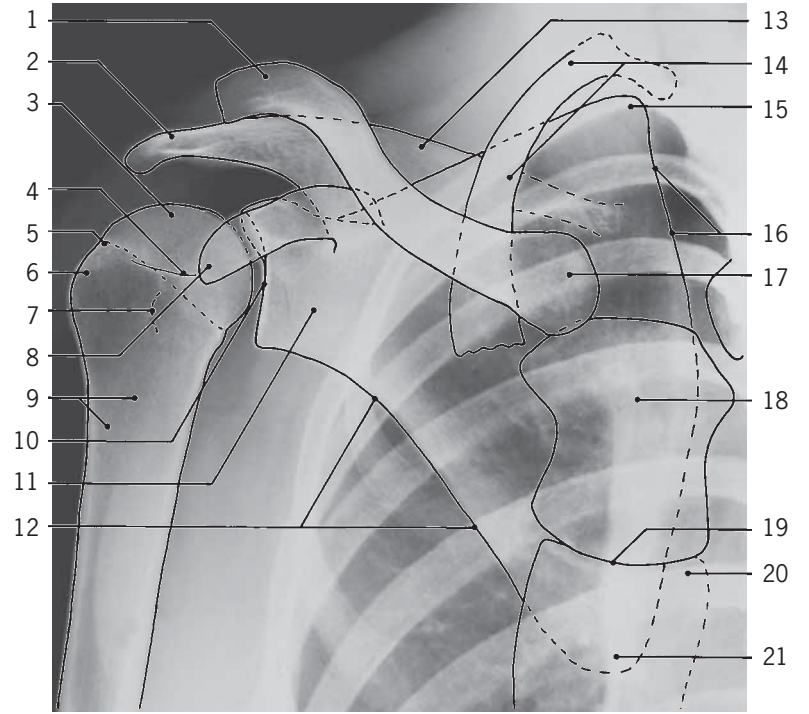
Εικόνα 49 Duplex υπερηχογράφημα καρδιάς εμβρύου.

Η περιοχή για τη μέτρηση της ροής του αίματος επιλέγεται στο υπερηχογράφημα και υποδεικνύεται από δύο παράλληλες γραμμές επί της περιοχής που ορίζεται από τον ηχοβολέα για μετρήσεις Doppler. Το κατώτερο τμήμα της εικόνας δείχνει το φάσμα των μετατοπίσεων Doppler ως συνάρτηση του χρόνου (σε cm/s), όπου το μέγεθος και η κατεύθυνση της ροής του αίματος για πέντε καρδιακούς κύκλους μπορεί να διαβαστεί. Η κατεύθυνση της ροής προς τα κάτω που προέρχεται από την εισροή του αίματος από τον κόλπο, είναι αρχικά παθητική, στη συνέχεια επιταχύνεται έντονα από την κολπική συστολή (έντονα καθοδική). Η προς τα πάνω κορυφή αντιπροσωπεύει την αορτική εκροή. Η απόσταση με την ένδειξη «1» αντιπροσωπεύει τον χρόνο της κολποκοιλιακής αγωγιμότητας.



Εικόνα 50 Έγχρωμο Doppler του ομφάλιου λώρου.

Η κατεύθυνση της ροής του αίματος στην ομφαλική φλέβα και η κατεύθυνση στις αρτηρίες είναι αντίθετες και αναλόγως χρωματισμένες με κυανό και ερυθρό χρώμα.

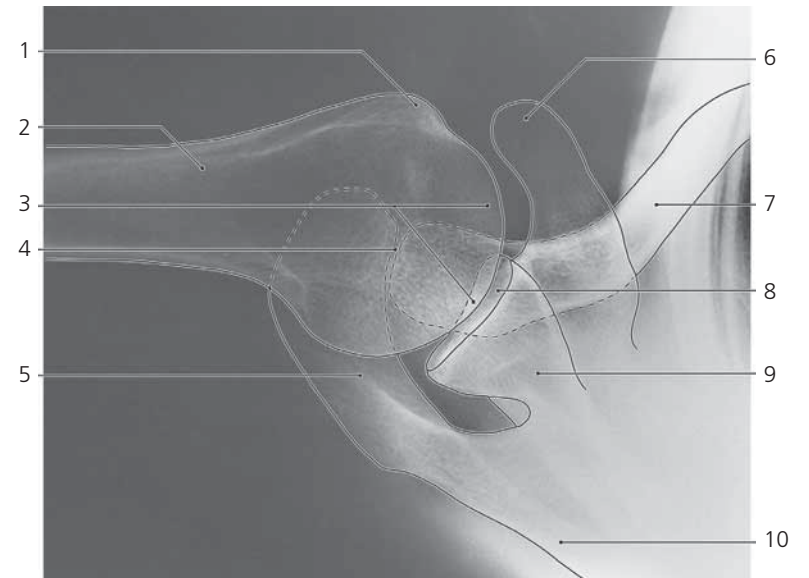
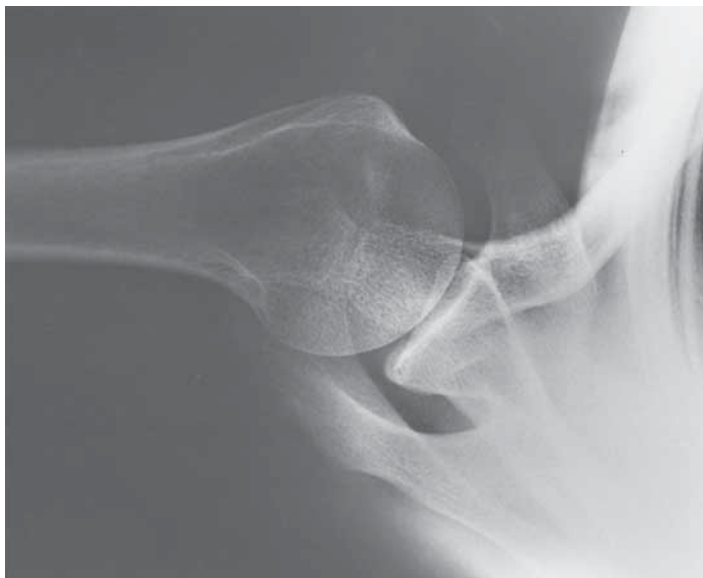


Όμος, π-ο α/α

- 1: Ακρώμιο και κλείδα
- 2: Ακρώμιο
- 3: Κεφαλή βραχιονίου
- 4: Επιφυσιακή ουλή
- 5: Ανατομικός αυχένας
- 6: Μείζον βραχιόνιο όγκωμα
- 7: Έλασσον βραχιόνιο όγκωμα

- 8: Κορακοειδής απόφυση
- 9: Χειρουργικός αυχένας
- 10: Ωμογλήνη (κοιλότητα ωμογλήνης)
- 11: Αυχένας ωμοπλάτης
- 12: Έξω χείλος ωμοπλάτης
- 13: Άκανθα ωμοπλάτης
- 14: Πρώτη πλευρά

- 15: Άνω γωνία ωμοπλάτης
- 16: Έσω χείλος ωμοπλάτης
- 17: Στερνικό άκρο κλείδας
- 18: Λαβή του στέρνου
- 19: Γωνία του στέρνου
- 20: Σώμα του στέρνου
- 21: Κάτω γωνία ωμοπλάτης

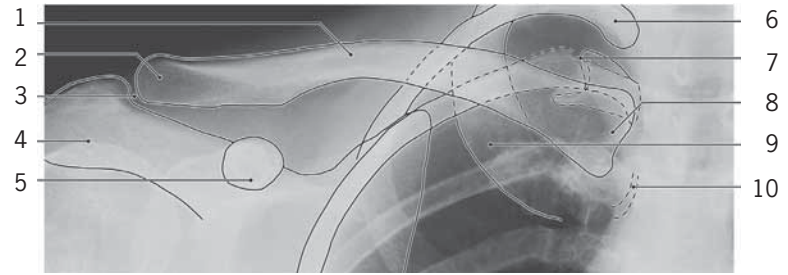
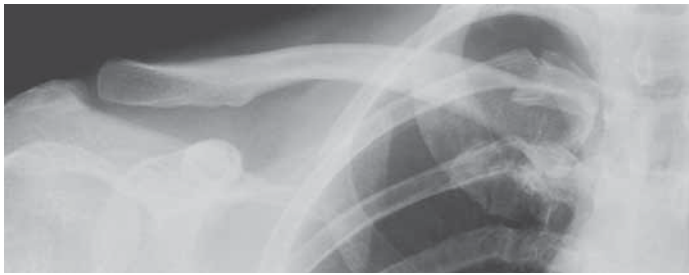


Όμος, εγκάρσια α/α

- 1: Μείζον βραχιόνιο όγκωμα
- 2: Χειρουργικός αυχένας βραχιονίου
- 3: Κεφαλή βραχιονίου
- 4: Ακρωμιοκλειδική άρθρωση

- 5: Ακρώμιο
- 6: Κορακοειδής απόφυση
- 7: Κλείδα
- 8: Ωμογλήνη (κοιλότητα ωμογλήνης)

- 9: Αυχένας ωμοπλάτης
- 10: Άκανθα ωμοπλάτης

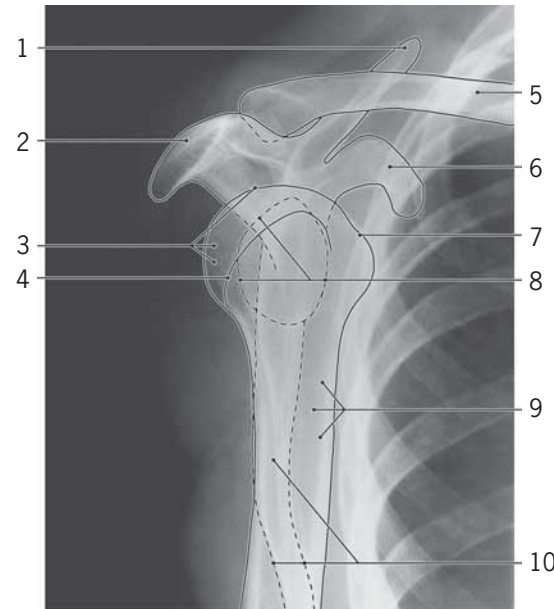


Κλείδα, π-ο α/α

- 1: Διάφυση κλείδας
- 2: Ακρωμιακό άκρο κλείδας
- 3: Ακρωμιοκλειδική άρθρωση
- 4: Ακρώμιο

- 5: Κορακοειδής απόφυση
- 6: Δεύτερη πλευρά
- 7: Πλευροεγκάρσια άρθρωση
- 8: Στερνικό άκρο κλείδας

- 9: Πρώτη πλευρά
- 10: Πλευροσπονδυλική άρθρωση



Κλείδα, λοξή α/α

- 1: Άνω χείλος ωμοπλάτης
- 2: Ακρώμιο
- 3: Κεφαλή βραχιονίου
- 4: Μείζον βραχιόνιο όγκωμα

- 5: Κλείδα
- 6: Κορακοειδής απόφυση
- 7: Έλασσον βραχιόνιο όγκωμα
- 8: Ωμογλήνη (κοιλότητα ωμογλήνης)

- 9: Χειρουργικός αυχένας βραχιονίου
- 10: Ωμοπλάτη από πλάγια λήψη

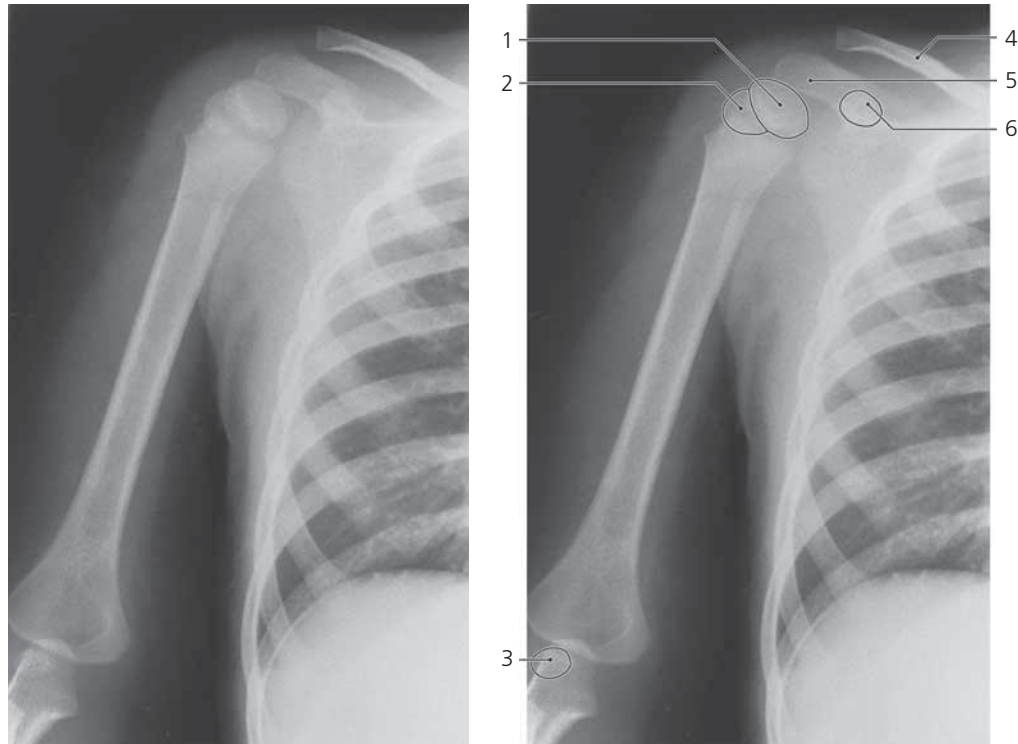


Ώμος και βραχίονας, π-ο α/α, παιδί ενός έτους

- 1: Κόνδυλος (πυρήνας οστέωσης)
- 2: Κεφαλωτό οστό (πυρήνας οστέωσης)

- 3: Αγκιστρωτό οστό (πυρήνας οστέωσης)
- 4: Μείζον βραχιόνιο όγκωμα (πυρήνας οστέωσης)

- 5: Κεφαλή βραχιονίου (πυρήνας οστέωσης)

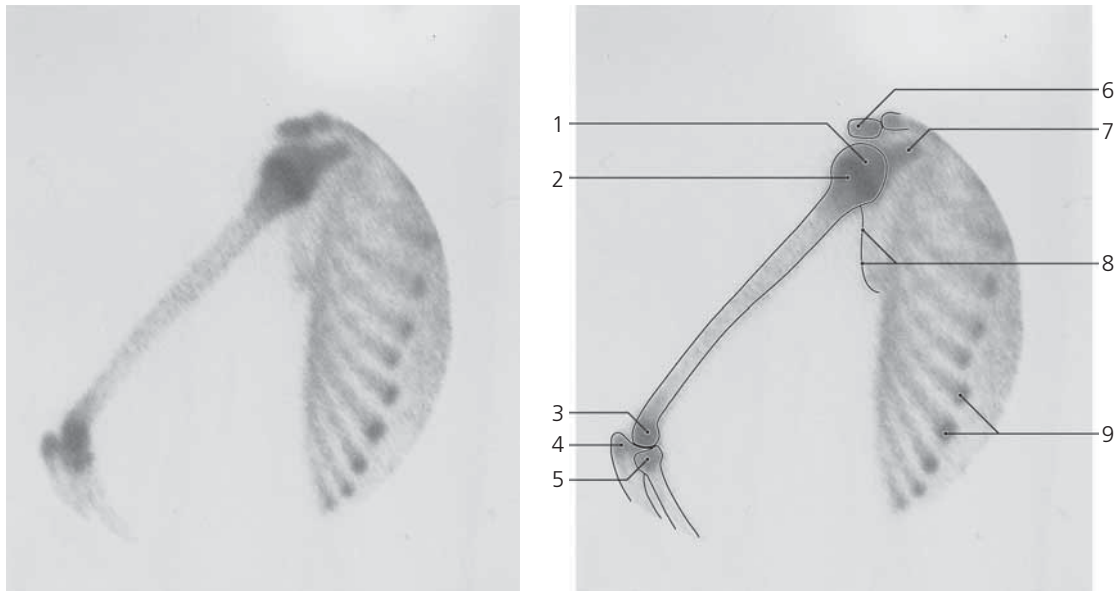


Όμος και βραχίονας, π-ο α/α, παιδί 5 ετών

- 1: Κεφαλή βραχιονίου (πυρήνας οστέωσης)
 2: Μείζον βραχιόνιο όγκωμα (πυρήνας οστέωσης)

- 3: Κόνδυλος (πυρήνας οστέωσης)
 4: Κλείδα
 5: Ακρώμιο

- 6: Κορακοειδής απόφυση (πυρήνας οστέωσης)

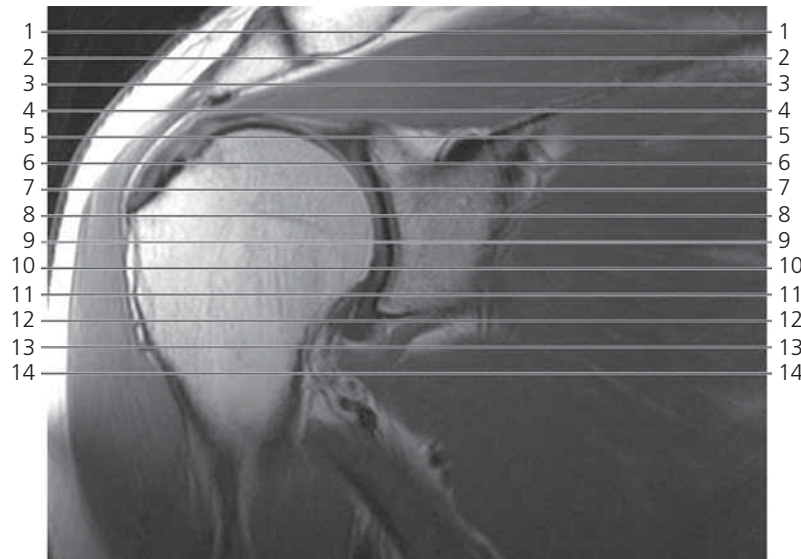


Όμος και βραχίονας, σπινθηρογράφημα ^{99m}Tc -MDP, παιδί 12 ετών

- 1: Κεφαλή βραχιονίου
 2: Επιφυσιακή πλάκα της εγγύς επίφυσης του βραχιονίου
 3: Τροχιλία και κόνδυλος

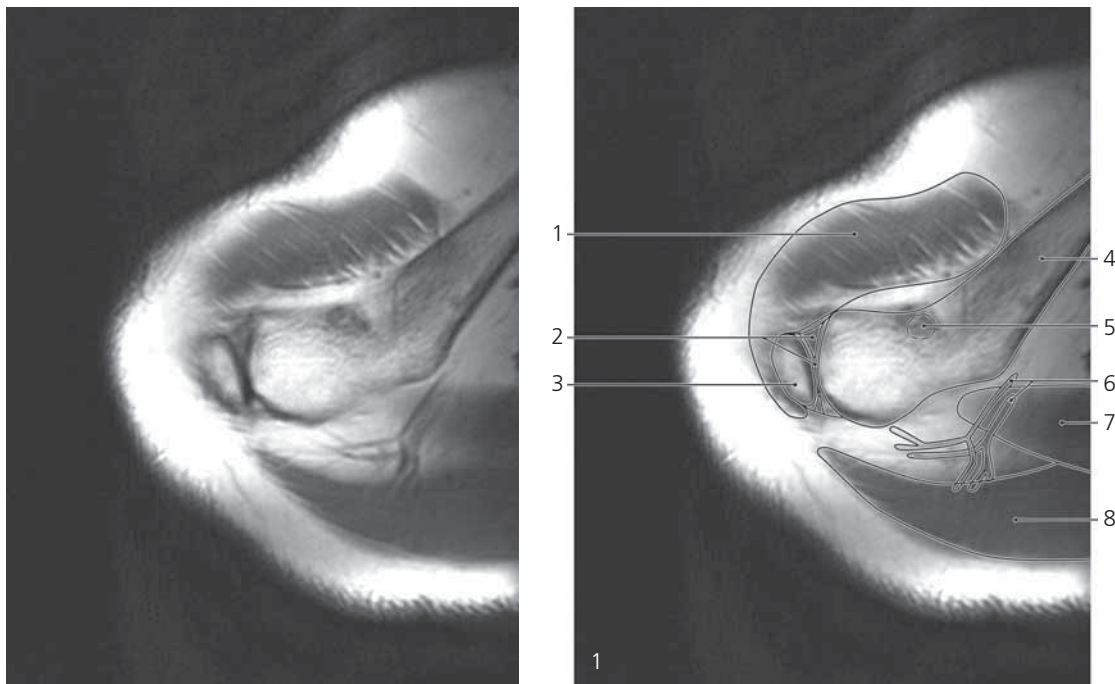
- 4: Ωλέκρανο
 5: Κεφαλή κερκίδας
 6: Ακρώμιο
 7: Κορακοειδής απόφυση

- 8: Έξω χείλος ωμοπλάτης
 9: Οστεοχόνδρινη μετάπτωση των πλευρών



Τοπόγραμμα ώμου

Οι γραμμές #1-14 δείχνουν τα επίπεδα των τομών στις ακόλουθες εγκάρσιες ΜΤ ακολουθίες. Τα βέλη \leftarrow , \rightarrow και \leftrightarrow στις λεζάντες των εικόνων δείχνουν ότι μια δομή μπορεί να εμφανίζεται στην προηγούμενη, ή την επόμενη, ή και τις δύο. Η ερμηνεία της εικόνας του τοπογράμματος βρίσκεται στις στεφανιαίες ακολουθίες, σελίδα 63, εικόνα #9.



Όμος, εγκάρσια ΜΤ

1: Δελτοειδής \rightarrow

2: Ακρωμιοκλειδική άρθρωση
με αρθρικό δίσκο \rightarrow

3: Ακρώμιο \rightarrow

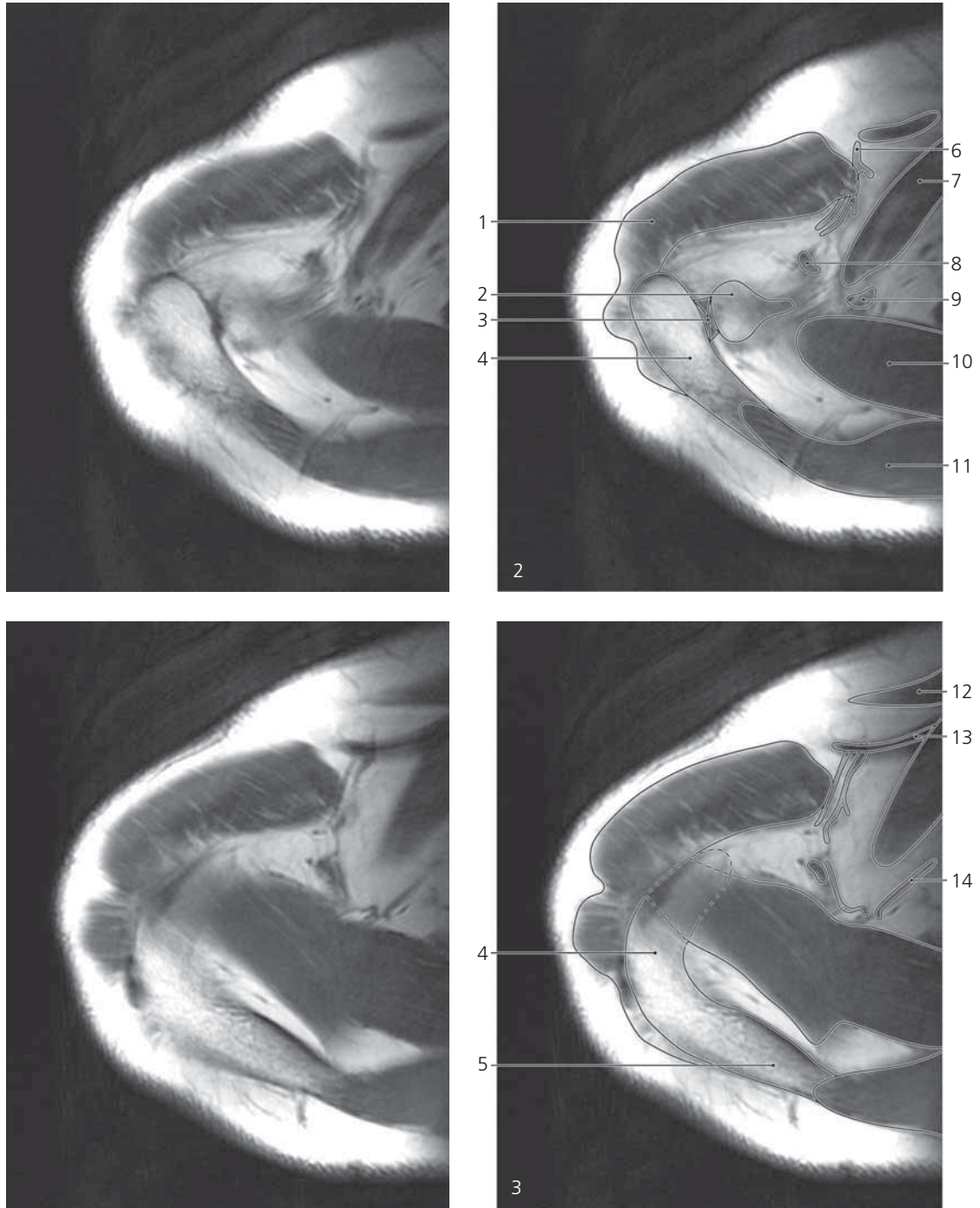
4: Κλείδα \rightarrow

5: Κορακοκλειδικός (τραπεζοειδής)
σύνδεσμος (πρόσφυση) \rightarrow

6: Υπερπλάτια αρτηρία και φλέβα \rightarrow

7: Υπερακάνθιος \rightarrow

8: Τραπεζοειδής \rightarrow



Όμος, εγκάρσια ΜΤ

Τοπόγραμμα στη σελίδα 52

- | | | |
|------------------------------|---|--------------------------------|
| 1: Δελτοειδής ↔ | 6: Θωρακοακρωμιακή αρτηρία/φλέβα | 10: Υπερακάνθιος ↔ |
| 2: Κλείδα (ακρωμιακό άκρο) ← | 7: Υποκλείδιος μυς | 11: Τραπεζοειδής ↔ |
| 3: Ακρωμιοκλειδική άρθρωση ← | 8: Κορακοκλειδικός (τραπεζοειδής) σύνδεσμος ↔ | 12: Μείζων θωρακικός → |
| 4: Ακρώμιο ↔ | 9: Κορακοκλειδικός (κωνοειδής) σύνδεσμος → | 13: Κεφαλική φλέβα → |
| 5: Άκανθα της ωμοπλάτης → | | 14: Υπερπλάτια αρτηρία/φλέβα ← |

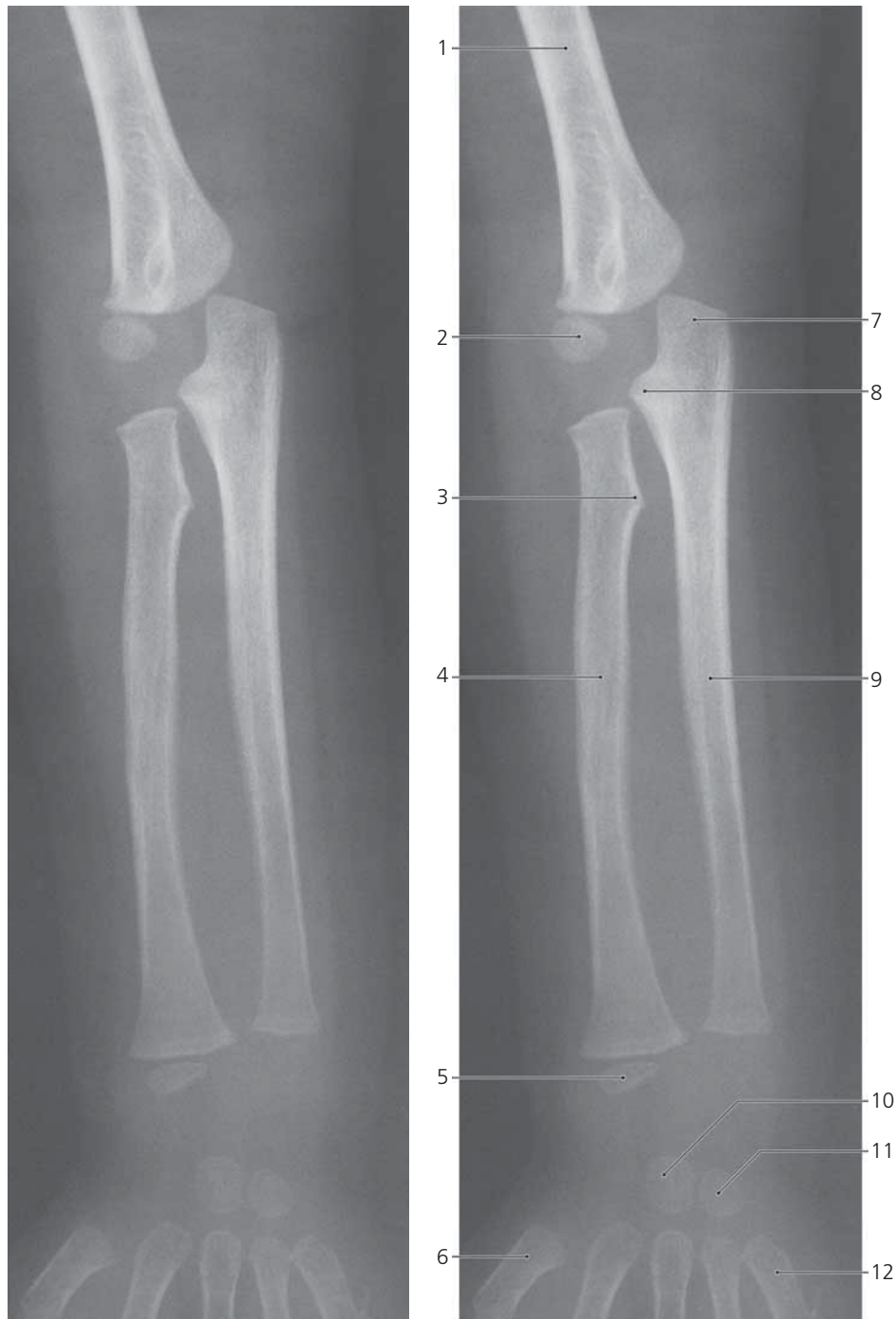


Αντιβράχιο, π-ο α/α

- 1: Παρακονδύλια απόφυση
- 2: Αρθρικός βόθρος κερκίδας
- 3: Κεφαλή κερκίδας
- 4: Αυχένια κερκίδας
- 5: Κερκιδικό όγκωμα
- 6: Διάφυση κερκίδας
- 7: Άπω άκρο κερκίδας

- 8: Καρπιαία αρθρική επιφάνεια της κερκίδας
- 9: Στυλοειδής απόφυση κερκίδας
- 10: Σκαφοειδές οστό
- 11: Παρατροχίλια απόφυση
- 12: Ωλέκραιο
- 13: Κορωνοειδής απόφυση

- 14: Διάφυση ωλένης
- 15: Αυχένια ωλένης
- 16: Κεφαλή ωλένης
- 17: Στυλοειδής απόφυση ωλένης
- 18: Μηνοειδές οστό

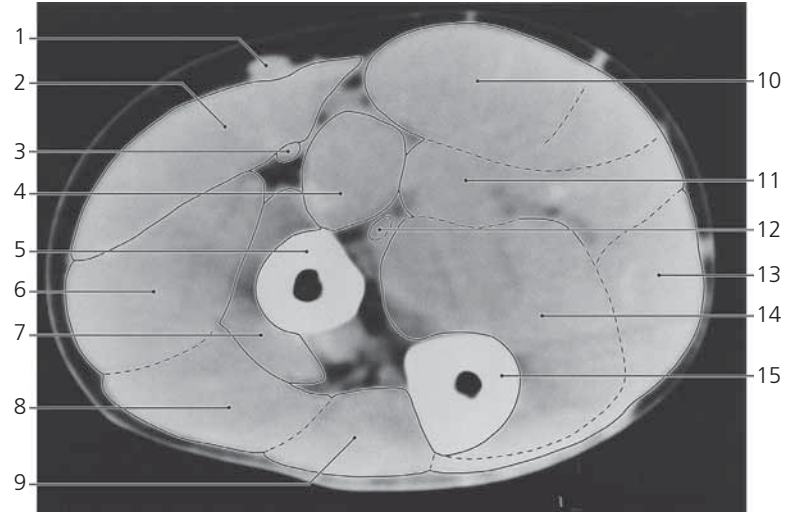
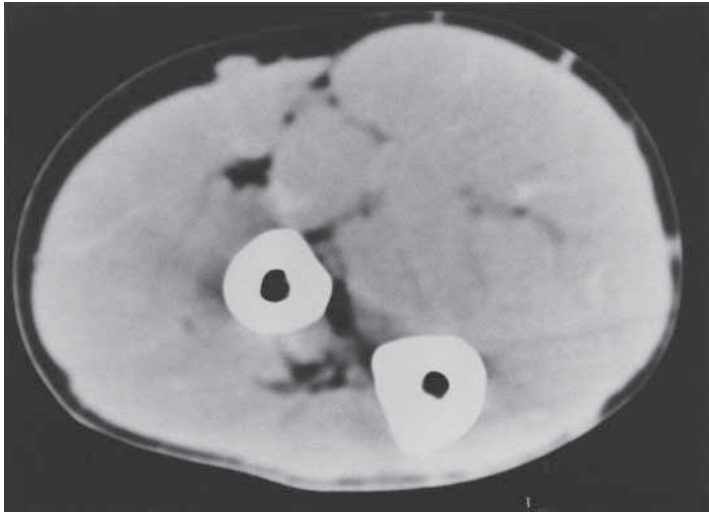


Αντιβράχιο, π-ο α/α, παιδί 2 χρόνων

- 1: Διάφυση βραχιονίου
- 2: Κεφαλή κονδύλου (πυρήνας οστέωσης)
- 3: Κερκιδικό όγκωμα
- 4: Διάφυση κερκίδας

- 5: Άπω επίφυση κερκίδας (πυρήνας οστέωσης)
- 6: Πρώτο μετακάρπιο οστό
- 7: Ωλέκρανο
- 8: Κορωνοειδής απόφυση ωλένης

- 9: Διάφυση ωλένης
- 10: Κεφαλωτό οστό (πυρήνας οστέωσης)
- 11: Αγκιστρωτό οστό (πυρήνας οστέωσης)
- 12: Πέμπτο μετακάρπιο οστό

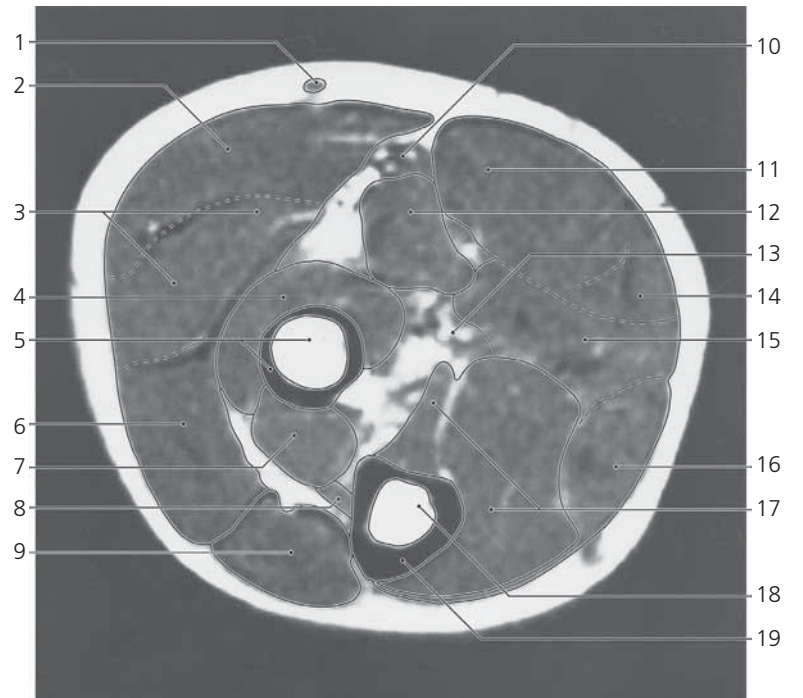
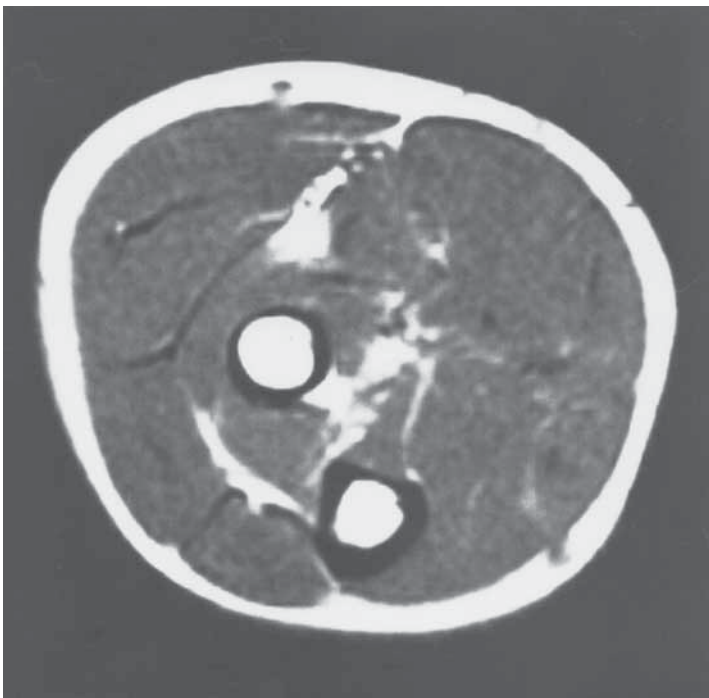


Αντιβράχιο, σε υπτιασμό, μεσότητα, εγκάρσια ΑΤ

- 1: Υποδόρια φλέβα
- 2: Βραχιονιο-κερκιδικός
- 3: Κερκιδική αρτηρία
- 4: Στρογγύλος πρηνιστής
- 5: Κερκίδα
- 6: Μακρύς και βραχύς κερκιδικός εκτείνων τον καρπό

- 7: Υπτιαστής
- 8: Εκτείνων τα δάκτυλα
- 9: Ωλένιος εκτείνων τον καρπό
- 10: Κερκιδικός καμπτήρας του καρπού, και μακρύς παλαμικός
- 11: Επιπολής καμπτήρας των δακτύλων

- 12: Μέσο νεύρο
- 13: Ωλένιος καμπτήρας του καρπού
- 14: Εν τω βάθει καμπτήρας των δακτύλων
- 15: Ωλένη

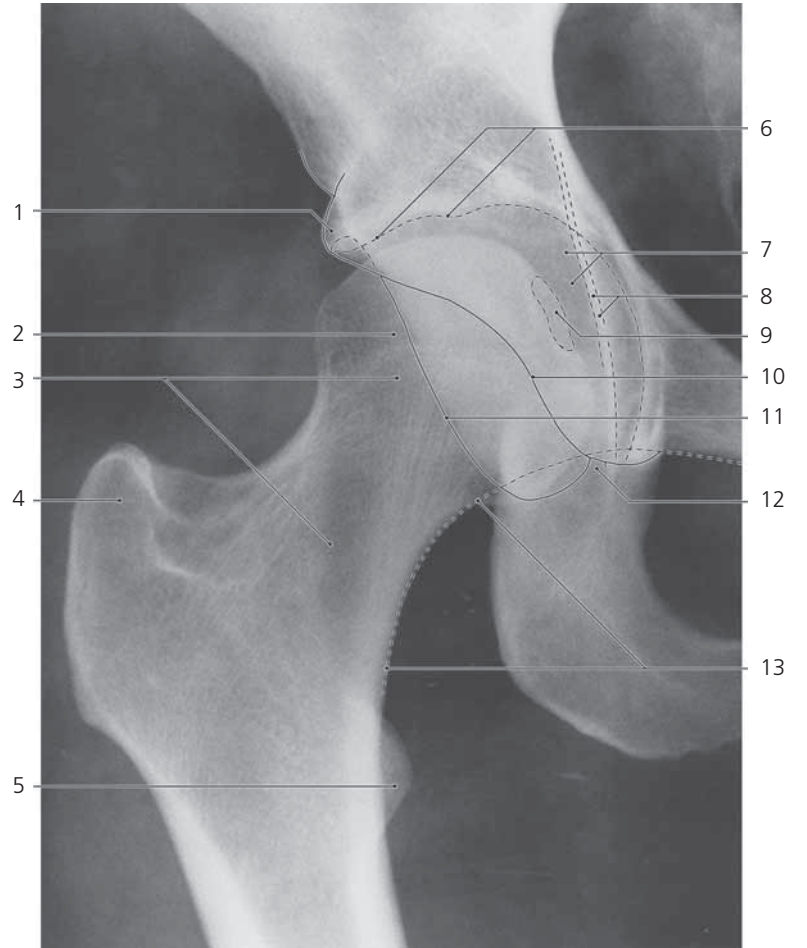


Αντιβράχιο, σε πρηνισμό, μεσότητα, εγκάρσια ΜΤ

- 1: Κεφαλική φλέβα
- 2: Βραχιονιο-κερκιδικός
- 3: Μακρύς και βραχύς κερκιδικός εκτείνων τον καρπό
- 4: Υπτιαστής
- 5: Διάφυση κερκίδας
- 6: Εκτείνων τα δάκτυλα

- 7: Μακρύς απαγωγός του αντίχειρα
- 8: Βραχύς εκτείνων τον αντίχειρα
- 9: Ωλένιος εκτείνων τον καρπό
- 10: Κερκιδική αρτηρία και φλέβες
- 11: Κερκιδικός καμπτήρας του καρπού
- 12: Στρογγύλος πρηνιστής
- 13: Ωλένια αρτηρία και φλέβες

- 14: Μακρύς παλαμικός
- 15: Επιπολής καμπτήρας των δακτύλων
- 16: Ωλένιος καμπτήρας του καρπού
- 17: Εν τω βάθει καμπτήρας των δακτύλων
- 18: Διάφυση της ωλένης (μυελός του οστού)
- 19: Συμπαγές οστό

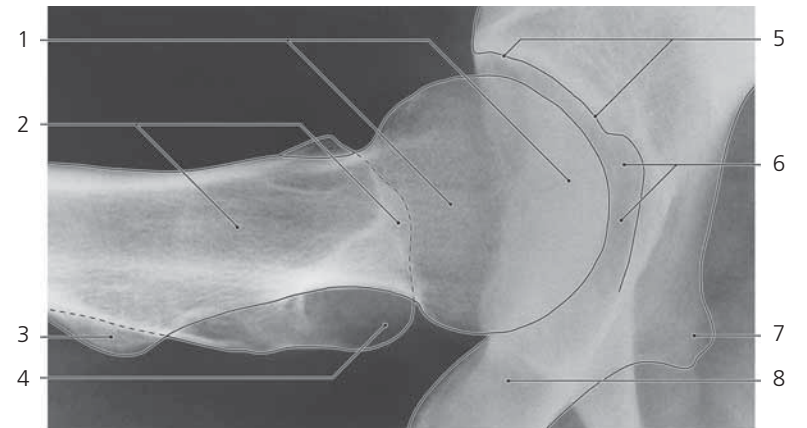


Ισχίο, π-ο α/α

- 1: Χείλος κοτύλης
- 2: Κεφαλή μηριαίου
- 3: Αυχένας μηριαίου
- 4: Μείζων τροχαντήρας
- 5: Ελάσσων τροχαντήρας

- 6: Μηνοειδής επιφάνεια
- 7: Βόθρος κοτύλης
- 8: Λαγονο-ισχιακή γραμμή (ακτινολογικός όρος)
- 9: Βόθρος κεφαλής μηριαίου

- 10: Χείλος κοτύλης (πρόσθιο)
- 11: Χείλος κοτύλης (οπίσθιο)
- 12: Κοτυλιαία εντομή
- 13: Γραμμή Shenton (ακτινολογικός όρος)



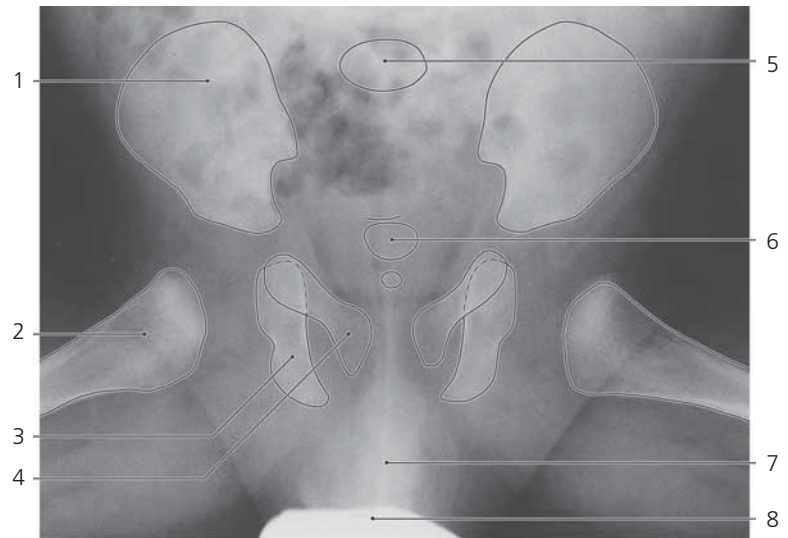
Ισχίο, α/α

Προβολή κατά Lauenstein (ισχίο σε κάμψη, απαγωγή και έξω στροφή)

- 1: Κεφαλή μηριαίου
- 2: Αυχένας μηριαίου
- 3: Ελάσσων τροχαντήρας

- 4: Μείζων τροχαντήρας
- 5: Μηνοειδής επιφάνεια της κοτύλης
- 6: Κοτυλιαίος βόθρος

- 7: Ισχιακή άκανθα
- 8: Σώμα του ισχιακού



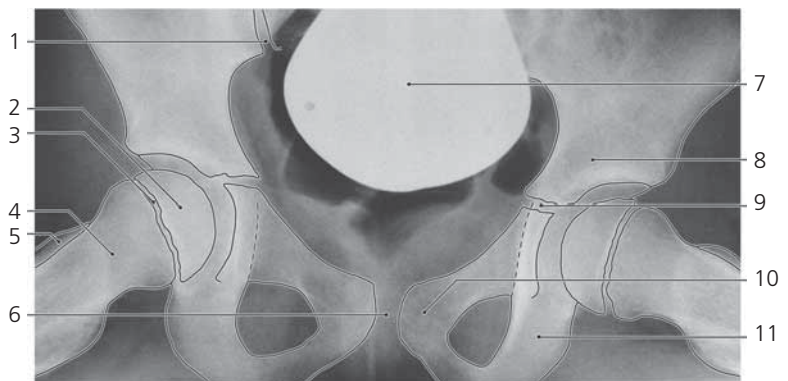
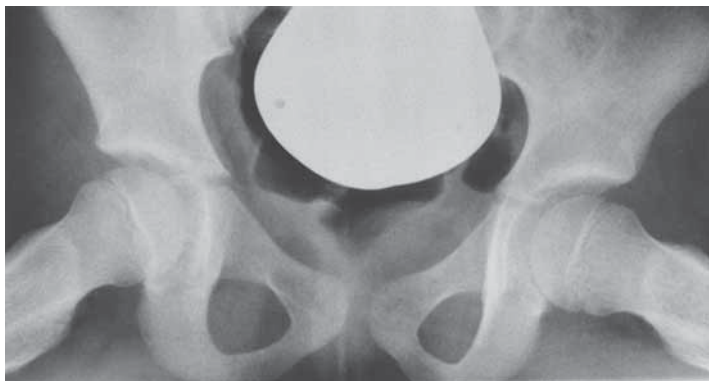
Πύελος, π-ο α/α, βρέφος 3 μηνών

Προβολή κατά Lauenstein

- 1: Λαγόνιο
- 2: Μετάφυση μηριαίου
- 3: Ισχιακό

- 4: Ηβικό
- 5: Ιερός σπόνδυλος I
- 6: Ιερός σπόνδυλος V

- 7: Πέος
- 8: Προστατευτικό γονάδων



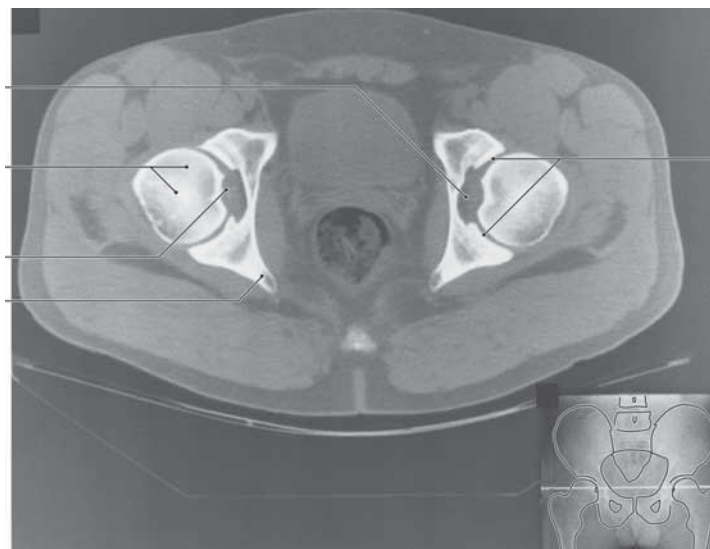
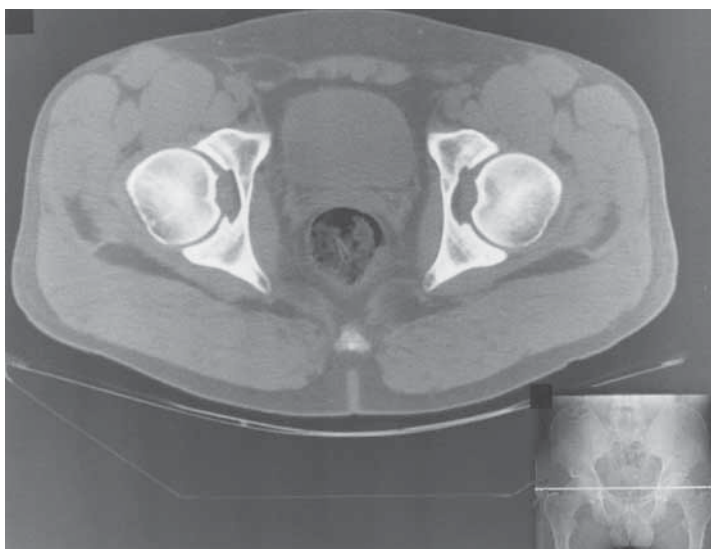
Πύελος, α/α, παιδί 7 ετών

Προβολή κατά Lauenstein

- 1: Ιερολαγόνια άρθρωση
- 2: Κεφαλή μηριαίου (επίφυση)
- 3: Επιφυσειακή (αναπτυξιακή) πλάκα
- 4: Αυχένας μηριαίου

- 5: Μείζων τροchanτήρας
- 6: Ηβική σύμφυση
- 7: Προστατευτικό γονάδων
- 8: Σώμα λαγονίου

- 9: Σώμα λαγονίου
- 10: Σώμα ηβικού
- 11: Σώμα ισχιακού

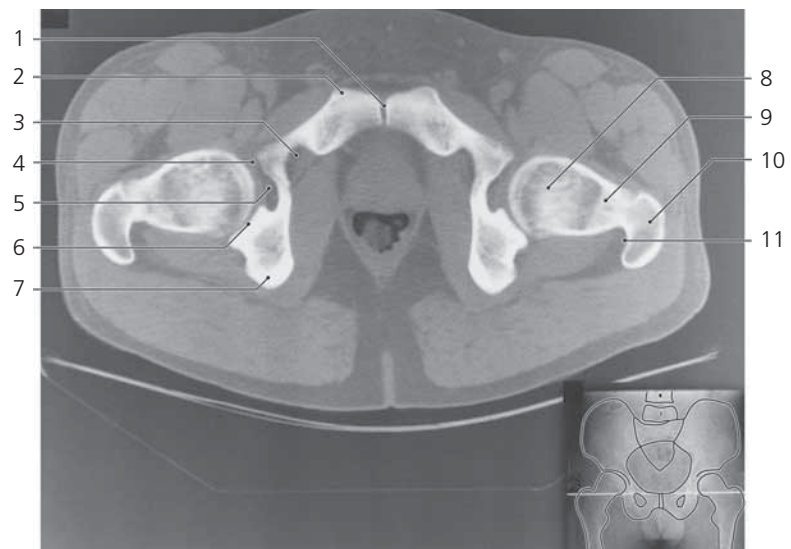
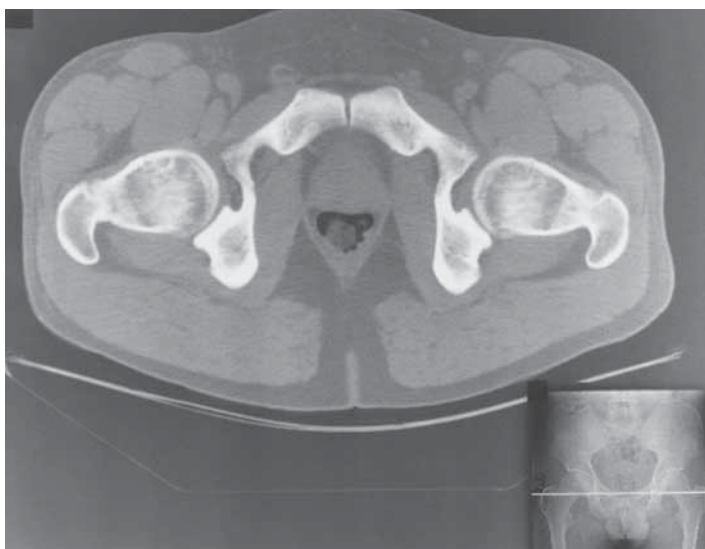


Ισχίο, εγκάρσια ΑΤ

- 1: Κοτυλιαίος βόθρος
- 2: Κεφαλή μηριαίου

- 3: Βοθρίο μηριαίας κεφαλής
- 4: Ισχιακή άκανθα

- 5: Μηνοειδής επιφάνεια κοτύλης

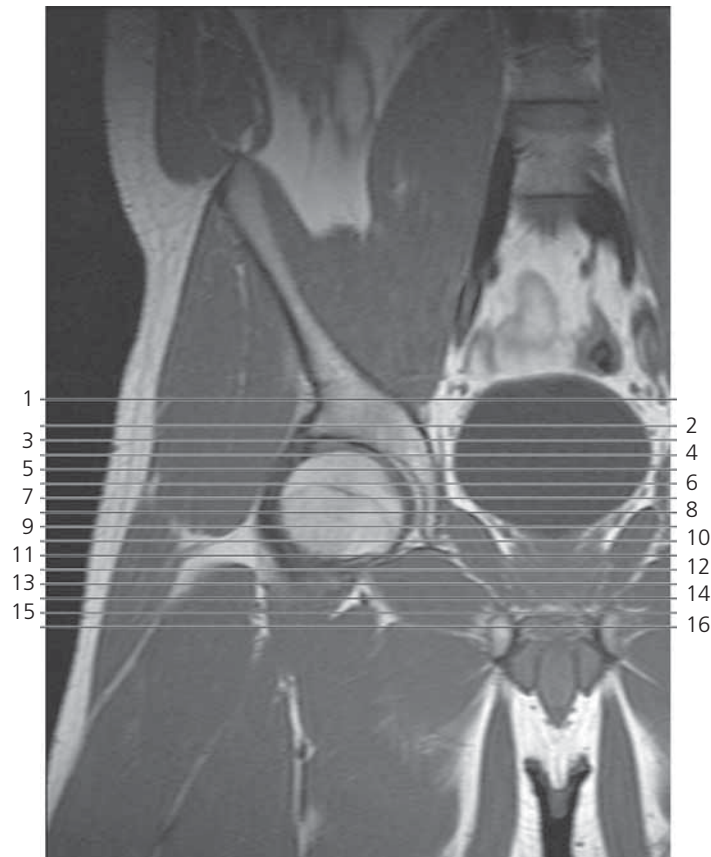


Ισχίο, εγκάρσια ΑΤ

- 1: Ηβική σύμφυση
- 2: Ηβικό φύμα
- 3: Θυροειδές τρήμα
- 4: Κοτυλιαία εντομή

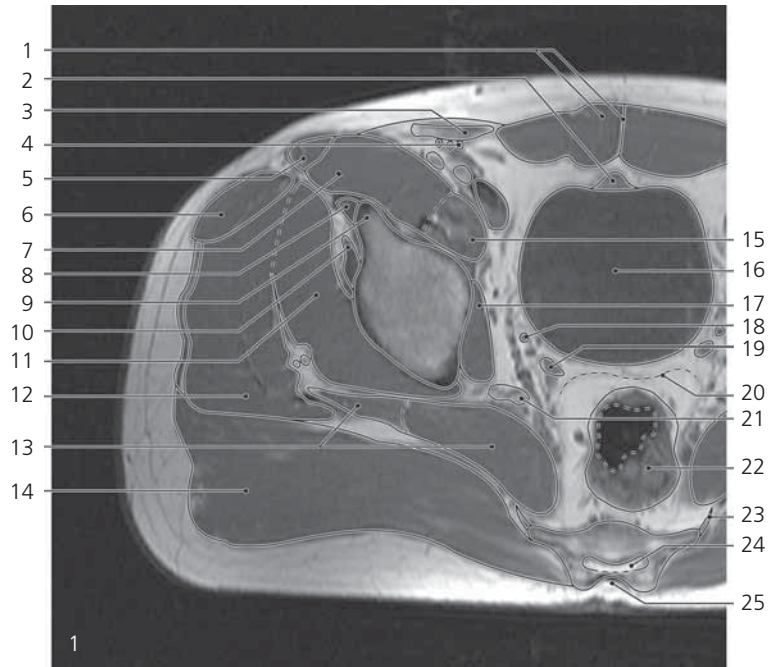
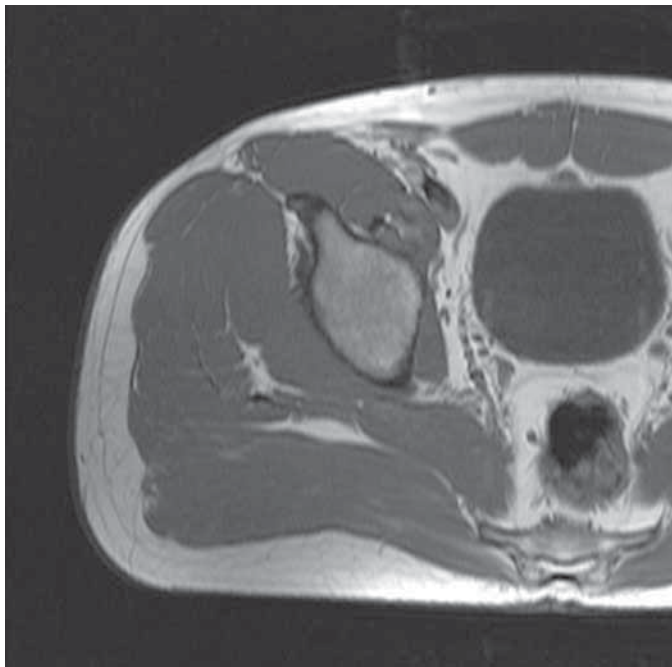
- 5: Κοτυλιαίος βόθρος
- 6: Μηνοειδής επιφάνεια
- 7: Σώμα ισχιακού
- 8: Κεφαλή μηριαίου

- 9: Αυχένιας μηριαίου
- 10: Μείζων τροchanτήρας
- 11: Τροchanτήριος βόθρος



Τοπόγραμμα ισχίου και ανδρικής πυέλου

Οι γραμμές #1–16 δείχνουν τα επίπεδα των τομών στις ακόλουθες εγκάρσιες σειρές ΜΤ. Τα βέλη στις λεζάντες των εικόνων δείχνουν ότι μια δομή μπορεί να εμφανίζεται στην προηγούμενη ή την επόμενη τομή ή και στις δύο. Η εξήγηση της εικόνας του τοπογράμματος εμφανίζεται στις στεφανιαίες σειρές, σελίδα 114, εικόνα #2.

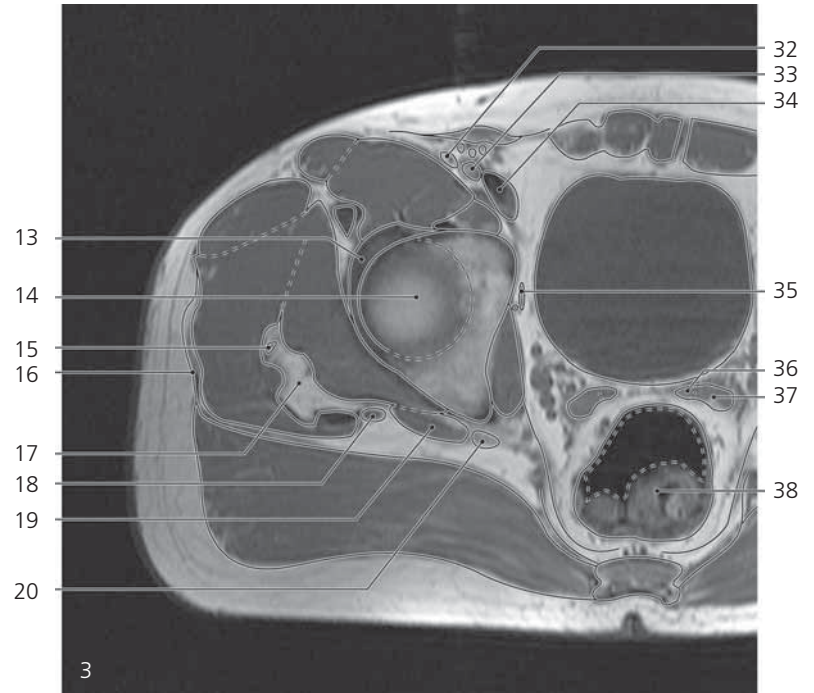
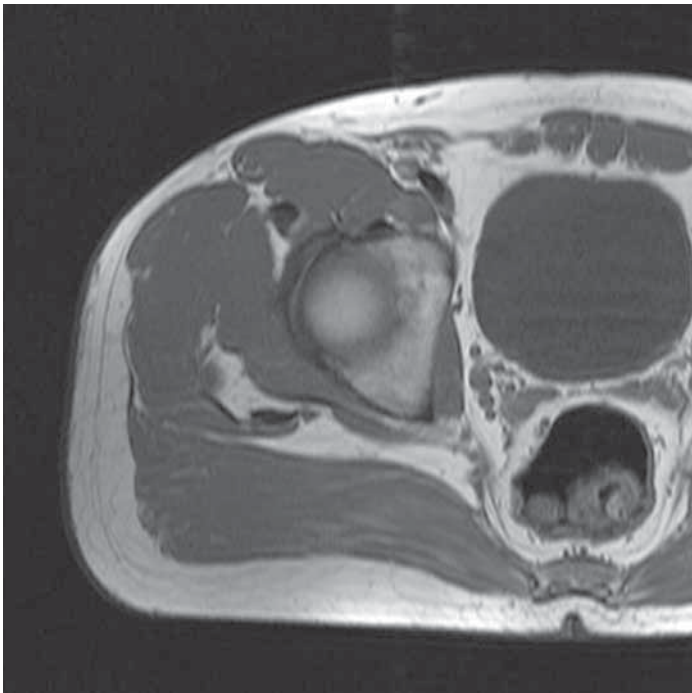
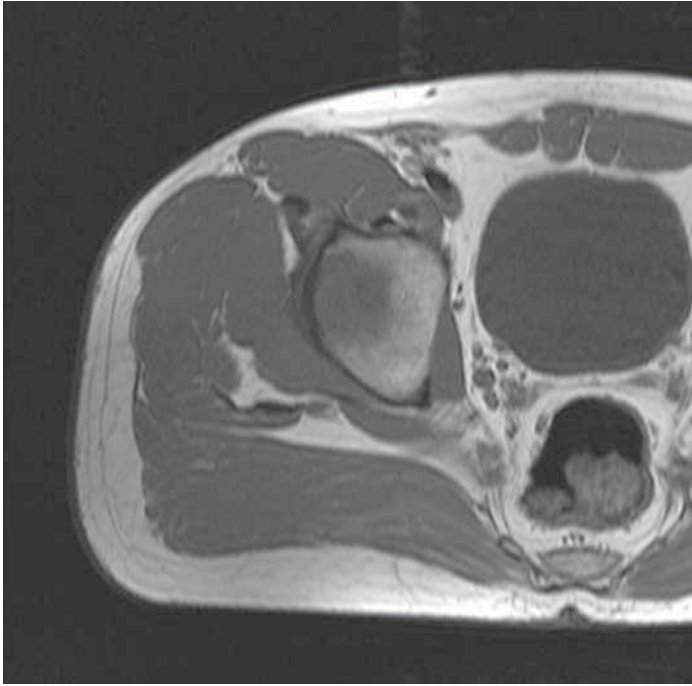


Ισχίο και ανδρική πύελος, εγκάρσια ΜΤ

- 1: Ορθός κοιλιακός και λευκή γραμμή →
- 2: Μέσος ομφαλικός σύνδεσμος
- 3: Σπερματικός τόνος στον βουβωνικό πόρο →
- 4: Κάτω επιγάστρια αρτηρία και φλέβες →
- 5: Ραπτικός →
- 6: Τείνων την πλατιά περιτονία →
- 7: Λαγόνιος →
- 8: Ορθός μηριαίος, ευθεία κεφαλή →

- 9: Πρόσθια κάτω λαγόνιος άκανθα
- 10: Ορθός μηριαίος, ανεστραμμένη κεφαλή
- 11: Μικρός γλουτιαίος →
- 12: Μέσος γλουτιαίος →
- 13: Απιοειδής και άνω δίδυμος
- 14: Μεγάλος γλουτιαίος →
- 15: Ψοϊτής μείζων →
- 16: Ουροδόχος κύστη →
- 17: Θυροειδής έσω →

- 18: Ουρητήρας →
- 19: Πόρος σπερματικός →
- 20: Ευθυκυστικό κόλπωμα →
- 21: Ισχιακό νεύρο →
- 22: Ορθό με κόπρανα και αέρα →
- 23: Ισchioϊεροί μείζων και ελάσων σύνδεσμοι →
- 24: Ιερός σωλήνας
- 25: Ιερό τρήμα



Ισχίο και ανδρική πύελος, εγκάρσια ΜΤ

Τοπόγραμμα στη σελίδα 104

- 1: Σπερματικός τόνος στον βουβωνικό πόρο ↔
- 2: Πλατιά περιτονία →
- 3: Λαγόνιος ↔
- 4: Ραπτικός ↔
- 5: Τείνων την πλατιά περιτονία ↔
- 6: Ορθός μηριαίος ↔
- 7: Μέσος γλουτιαίος ↔
- 8: Μικρός γλουτιαίος ↔
- 9: Σώμα λαγονίου ↔
- 10: Απιοειδής (τένοντας) ↔
- 11: Ισχιακό νεύρο ↔
- 12: Μεγάλος γλουτιαίος ↔
- 13: Αρθρικός θύλακος →

- 14: Κεφαλή μηριαίου →
- 15: Άνω γλουτιαία αρτηρία ←
- 16: Λαγονοκνημιαία ταινία ↔
- 17: Μεσογλουτιαίος χώρος ↔
- 18: Απιοειδής (τένοντας) ↔
- 19: Άνω δίδυμος ↔
- 20: Ισχιακό νεύρο ↔
- 21: Κάτω επιγαστρία αρτηρία και φλέβες ↔
- 22: Ορθός κοιλιακός και λευκή γραμμή ↔
- 23: Ψοίτης μείζων ↔
- 24: Ουροδόχος κύστη ↔
- 25: Έσω θυροειδής ↔
- 26: Ουρητήρας (κατάληξη στην ουροδόχο κύστη) ←

- 27: Ευθυκυστικό κόλπωμα ←
- 28: Σπερματικός πόρος ←
- 29: Ανεκκτήρας πρωκτού →
- 30: Ισchioϊεροί μείζων και ελάσσων σύνδεσμοι ↔
- 31: Κόκκυγας →
- 32: Μηριαίο νεύρο ←
- 33: Έξω λαγόνιος αρτηρία ↔
- 34: Έξω λαγόνιος φλέβα ↔
- 35: Θυροειδής αρτηρία και νεύρο →
- 36: Λήκυθος σπερματικού πόρου
- 37: Σπερματοδόχος κύστη (αδένας) →
- 38: Ορθό με κόπρανα και αέρα ↔