

## *Κεφάλαιο 1*

---

# **ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΝΣ**

---

Ν.Π. ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ

- A. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ
- B. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ
- C. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΓΓΕΙΟΓΡΑΦΙΑ
- D. Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΗΣ ΑΙΜΟΡΡΑΓΙΑΣ  
ΣΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

## A. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

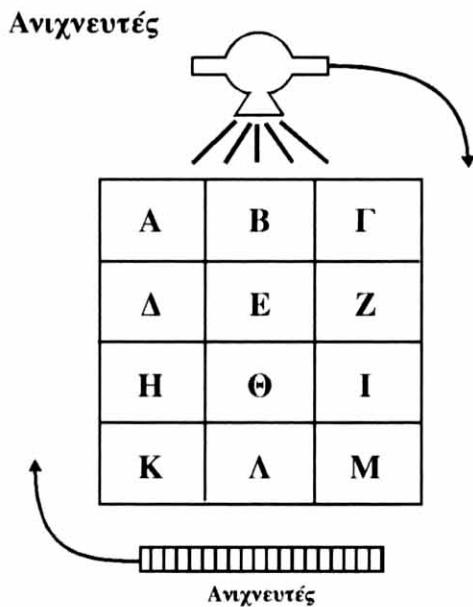
Την άνοιξη του 1972, στο Βρετανικό συνέδριο Ακτινολογίας έγινε η πρώτη ανακοίνωση περί αξονικής τομογραφίας από το Βρετανό φυσικό G. Hounsfield. Η επαναστατική αυτή μέθοδος βασίστηκε στην εξής θεωρία: με πολλαπλές μετρήσεις απορρόφησης ακτινοβολίας στην ίδια ανατομική περιοχή από διάφορες διευθύνσεις θα είναι δυνατή η απεικόνιση της εσωτερικής αρχιτεκτονικής του σώματος. Η αποδοχή της μεθόδου ήταν τέτοια ώστε τα επόμενα 6 χρόνια εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 1000 μηχανήματα στη Βρετανία και τη Β. Αμερική. Η Αξονική τομογραφία θεωρήθηκε ως η μεγαλύτερη εφεύρεση στον τομέα της ακτινολογίας μετά την ανακάλυψη των ακτίνων Roentgen το 1895. Ως αποτέλεσμα, το 1979 απονεμήθηκε το βραβείο Nobel της ιατρικής στον G. Hounsfield από κοινού με τον Αμερικανό φυσικό A. Cormak, ο οποίος είχε περιγράψει τη μαθηματική μέθοδο ανασχηματισμού εικόνων από ακτινολογικές προβολές. Η μέθοδος ονομάστηκε computed tomography (CT) ή computerized axial tomography (CAT scan), επειδή η εξέταση γίνεται συνήθως με εγκάρσιες (axial) τομές. Η μέθοδος αποδόθηκε, όχι τόσο επιτυχώς, ως αξονική τομογραφία, δρος ο οποίος έχει επικρατήσει.

### Φυσικές αρχές

Στην αξονική τομογραφία η λυχνία ακτίνων X περιστρέφεται γύρω από τον επιμήκη άξονα του ασθενούς (Εικ. 1-1). Η δέσμη ακτινοβολίας έχει πάχος από 1-10 χιλ. Οι ακτίνες απορροφούνται μερικώς από τους ιστούς, ενώ τα φωτόνια που διαπερνούν το σώμα δεν προσπίπτουν σε ακτινογραφικά films, αλλά σε ανιχνευτές ακτινοβολίας. Η απορρόφηση της δέσμης από το σώμα εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα των

ιστών. Οι προσπτώσεις των ακτίνων στους ανιχνευτές μετατρέπονται σε σπινθηρισμούς, οι οποίοι μπορούν να μετρηθούν και να καταγραφούν ψηφιακά. Γνωρίζοντας την ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τη λυχνία και αυτήν η οποία απορροφάται από τους ανιχνευτές γνωρίζουμε τις τιμές εξασθένησης της ακτινοβολίας σε πολλαπλές μετρήσεις, οι οποίες γίνονται καθώς η λυχνία περιστρέφεται γύρω από το σώμα.

Στη συνέχεια οι τιμές εξασθένησης της ακτινοβολίας μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο τεράστιος αριθμός μετρήσεων δημιουργεί ανάλογο αριθμό εξισώσεων, τις οποίες οι σύγχρονοι υπολογιστές λύνουν ταχύτατα, ειδικά μετά την εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων προσέγγισης τιμών (convolution algorithm). Κάθε εικόνα (τομή) χωρίζεται σε πολλά μικρά τετραγωνίδια, τα οποία ονομάζονται pixels.



Εικ. 1-1. Κατά την περιστροφή της λυχνίας και των ανιχνευτών γίνονται πολλαπλές μετρήσεις απορρόφησης ακτινοβολίας. Δημιουργούνται έτσι πολλές εξισώσεις ( $A+B+\Gamma=\text{τιμή απορρόφησης } \alpha$ ,  $A+\Delta+H+K=\text{τιμή απορρόφησης } \beta \text{ κ.λπ.}$ ) με ίδιο αριθμό αγγώνων. Συνεπώς μετά την λύση αυτών κάθε pixel (A, B, Γ κ.λπ.) θα έχει την δική του τιμή απορρόφησης.

els και είναι συνήθως  $512 \times 512$  (Εικ. 1-1). Μετά την επίλυση των εξισώσεων κάθε pixel έχει τη δική του τιμή απορρόφησης ακτινοβολίας. Οι μεγαλύτερες τιμές απορρόφησης μετατρέπονται σε τόνους του άσπρου, ενώ οι μικρότερες του μαύρου. Με την βοήθεια των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών η εικόνα δημιουργείται σε λίγα δευτερόλεπτα.

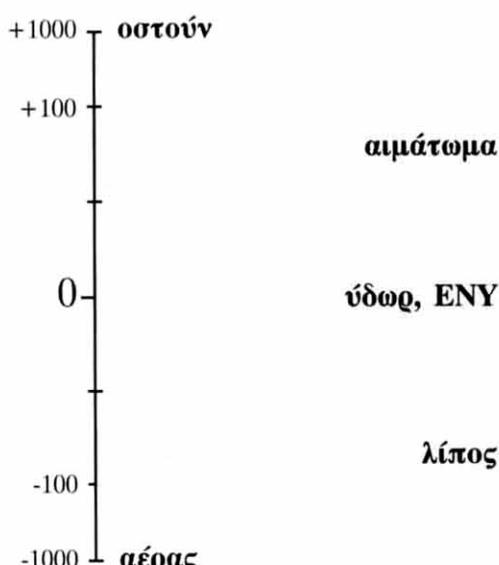
Η διακριτική ικανότητα της αξονικής τομογραφίας είναι 1-2 mm σε αντίθεση με την κλασική ακτινογραφία, στην οποία είναι 0,2-0,4 mm. Αντίθετα όμως, η ευαισθησία στην σκιαγραφική αντίθεση είναι 10 φορές μεγαλύτερη στην αξονική τομογραφία επιτρέποντας το διαχωρισμό ιστών με διαφορά πυκνότητας από 0,5% και επάνω.

Οι τιμές απορρόφησης εκφράζονται στην κλίμακα Hounsfield η οποία περιέχει 2000 μονάδες. Το νερό θεωρείται ως βάση και εξ ορισμού έχει πυκνότητα 0 (ENY) (Εικ. 1-2). Τα οστά έχουν τιμές προς το +1000, ενώ ο αέρας προς το -1000. Το λίπος έχει τιμές προς το -100, ενώ ο πρόσφατος θρόμβος προς το +90. Μετά τη δημιουργία της εικόνας, ακόμη και μετά την εξέταση, μπορούμε να επέμβουμε στην εικόνα "αλλάζοντας τα παράθυρα" με σκοπό την καλύτερη μελέτη ορισμένων ιστών, π.χ. οστικών μο-

ρών, ή μαλακών μορίων. Αυτό γίνεται περιορίζοντας το εύρος των τιμών Hounsfield (εύρος παραθύρου ή window width), ή/και μετακινώντας το κέντρο των τιμών (κέντρο παραθύρου ή window level) σε περιοχή όπου θεωρείται πιο χρήσιμη. Χρειαζόμαστε λοιπόν δύο διαφορετικές "εκδόσεις" της ίδιας εικόνας για να μελετήσουμε, π.χ., το εγκεφαλικό παρέγχυμα και τα οστά του κρανίου.

Η αξονική τομογραφία εγκεφάλου καλύπτεται συνήθως με 15-18 εγκάρσιες τομές. Το πάχος τομής στον οπίσθιο βόθρο είναι συνήθως 4-5 χιλ., ενώ στο επίπεδο των εγκεφαλικών ημισφαιρίων 8-10 χιλ. Μερικές φορές απαιτείται η λήψη λεπτότερων τομών, έως και 1 χιλ. (π.χ. για τα λιθοειδή οστά ή την υπόφυση). Ο χρόνος περιστροφής της λυχνίας σε κάθε τομή είναι συνήθως περί τα 4 δευτερόλεπτα και ο χρόνος ανασύνθεσης της εικόνας περί τα 4-6 δευτερόλεπτα. Στα σύγχρονα μηχανήματα είναι δυνατός ο περιορισμός των χρόνων αυτών σε ειδικές εξετάσεις. Ο ασθενής πρέπει να είναι τελείως ακίνητος κατά τη διάρκεια λήψης των τομών αλλιώς η διαγνωστική δυνατότητα περιορίζεται σημαντικά. Τοποθετώντας τον ασθενή σε ειδική θέση και δίνοντας κλίση στην ακτινολογική λυχνία μπορούμε να κάνουμε στεφανιαίες τομές εγκεφάλου (π.χ. στον έλεγχο του τουρκικού εφιππίου). Μπορούμε επίσης από τις εγκάρσιες τομές να κάνουμε μετά το τέλος της εξέτασης ανασύνθεση των εικόνων σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο θεωρήσουμε χρήσιμο (π.χ. οβελιαία ανασύνθεση τουρκικού εφιππίου, ή σπονδυλικής στήλης). Μειονέκτημα των ανασυνθέσεων είναι η μειωμένη διακριτική ικανότητα αυτών σε σχέση με τις πρωτότυπες εικόνες. Στην αξονική τομογραφία κρανίου η δόση είναι μεγαλύτερη.

Οι παθολογικές εστίες στην αξονική τομογραφία χαρακτηρίζονται ως υπότυκνες ή υπέρπυκνες, ανάλογα με το εάν η πυκνότητά τους είναι αντίστοιχα μικρότερη ή μεγαλύτερη του υγιούς ιστού. Υπότυκνες αλλοιώσεις είναι όσες χαρακτηρίζονται από αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό (οίδημα από νεοπλασία, έμφρακτο,



Εικ. 1-2. Κλίμακα Hounsfield.

κάκωση κ.α.), ενώ οι συχνότερες υπέρπυκνες αλλοιώσεις του εγκεφάλου είναι η πρόσφατη αιμορραγία και οι αποτιτανώσεις.

Η χορήγηση ιωδιούχου σκιαγραφικού ενδοφλεβιώς αυξάνει σε πολλές περιπτώσεις τη διαγνωστική ακρίβεια της μεθόδου. Πρέπει να συμπληρώνει την απλή εξέταση χωρίς να την αντικαθιστά. Πριν από τη χορήγηση σκιαγραφικού πρέπει να δίνεται προσοχή σε τυχόν ιστορικό αλλεργικής προδιάθεσης του ασθενούς, ειδικά στα ιωδιούχα, καθώς επίσης και σε τυχόν ιστορικό νεφρικής ανεπάρκειας. Η σκιαγραφική ουσία δεν διαπερνά τον αιματεγκεφαλικό φραγμό. Έκτος των αγγείων, φυσιολογικά ενισχύονται τα χοριοειδή πλέγματα, η υπόφυση και το κωνάριο. Παθολογικές εστίες οι οποίες αναδεικνύονται καλύτερα μετά ενδοφλέβια έγχυση σκιαγραφικού χαρακτηρίζονται από διάσπαση του αιματεγκεφαλικού φραγμού (π.χ. μεταστάσεις), ή από αυξημένη αγγείωση (π.χ. αρτηριοφλεβώδεις δυσπλασίες, νεοπλασίες). Η χορήγηση σκιαγραφικού στους υπαραχνοειδείς χώρους του εγκεφάλου μπορεί να γίνει με οσφυονωτιαία παρακέντηση. Η μέθοδος αυτή είχε εφαρμογή στη διαγνωστική της γεφυροπαρεγκεφαλικής γωνίας, έχει όμως σημαντικά περιοριστεί μετά την εφαρμογή της μαγνητικής τομογραφίας. Μπορεί να φανεί χρήσιμη σε περιπτώσεις ρινόρροιας εγκεφαλονωτιαίου υγρού.

Η ελικοειδής αξονική τομογραφία (spiral CT) λειτουργεί ως εξής: με συνεχή περιστροφή της λυχνίας και ταυτόχρονες μετρήσεις (όχι διακοπτόμενες ανά τομή) μετακινείται το τραπέζι του ασθενούς καλύπτοντας την εξεταζόμενη περιοχή. Έτσι μπορεί να εξετασθεί π.χ. ο θώρακας ή η άνω κοιλία με ένα ή δύο κρατήματα της αναπνοής του ασθενούς. Στη συνέχεια, αφού ο ασθενής αποχωρήσει, γίνονται οι ανασυνθέσεις των συνήθων εικόνων διαλέγοντας το πάχος τομής και το επίπεδο (εγκάρσιο, στεφανιαίο, λοξό κ.λπ.).

Πλεονέκτημα της μεθόδου, πλην της ταχύτατης εξέτασης βαρέως πασχόντων, είναι η εκμετάλλευση του IV σκιαγραφικού, το οποίο

χορηγείται ταυτόχρονα με την εξέταση. Τα αγγεία σκιαγραφούνται εντονότατα και μπορεί στη συνέχεια να γίνει ανασύνθεση υποδυόμενη αγγειογραφία. Οι πρώτες εφαρμογές σε ανευρύσματα εγκεφάλου είναι συγκρίσιμες με αυτές της μαγνητικής αγγειογραφίας. Άλλο πλεονέκτημα είναι η μελέτη του ήπατος με πολλαπλές σαρώσεις σε διάφορες φάσεις κυκλοφορίας του σκιαγραφικού (αρτηριακή, πυλαία). Η εξάπλωση της μεθόδου είναι ταχύτατη και πιστεύεται ότι σε λίγα χρόνια τα περισσότερα μηχανήματα αξονικής τομογραφίας θα είναι αυτού του τύπου.

## Β. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Υπάρχει πάντα μια αρχική δυσκολία στην κατανόηση της μαγνητικής τομογραφίας. Οφείλεται στο ότι οι φυσικές αρχές της μεθόδου είναι τελείως διαφορετικές από τις απλούστερες και οικειότερες αρχές εφαρμογής των ακτίνων Roentgen στην απλή ακτινογραφία και την αξονική τομογραφία. Θα γίνει προσπάθεια να περιγραφούν οι φυσικές αρχές της μεθόδου και ο τρόπος με τον οποίο σχηματίζεται η τελική εικόνα χρησιμοποιώντας απλουστευμένες έννοιες.

Για να πραγματοποιηθεί η μαγνητική τομογραφία χρησιμοποιείται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, κύματα ραδιοσυχνοτήτων και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Εάν θέλαμε να περιγράψουμε απλουστευμένα τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου θα λέγαμε, ότι τοποθετούμενο το ανθρώπινο σώμα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο πολλοί πυρήνες υδρογόνου, συμπεριφερόμενοι σαν μαγνήτες, προσανατολίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Στη συνέχεια τους μεταδίδουμε ενέργεια, με αποτέλεσμα να αλλάξουν προσανατολισμό και να μεταπέσουν σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Με τη διακοπή παροχής ενέργειας οι πυρήνες επιστρέφουν στην αρχική τους θέση αποδίδοντας την ενέργεια, την οποία μετρούμε και με τη βοήθεια υπολογιστών μετατρέπουμε σε εικόνα.

Κάθε πυρήνας υδρογόνου συμπεριφέρεται διαφορετικά, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Πυρήνες διαφορετικών ιστών αποδίδουν λοιπόν διαφορετική ενέργεια και ως αποτέλεσμα μπορούμε να διακρίνουμε στην τελική εικόνα διαφορετικούς ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Η αλληλουχία αυτή περιγράφεται λεπτομερέστερα στις φυσικές αρχές.

Για τη δημιουργία του ισχυρού μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται τρεις τύποι μαγνητών: μόνιμοι, αντιστάσεως και υπεραγώγιμοι. Σχεδόν όλοι οι χρησιμοποιούμενοι σήμερα μαγνήτες είναι υπεραγώγιμοι. Το μαγνητικό τους πεδίο δημιουργείται από κυκλοφορία ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα πηνίο, του οποίου τα καλώδια διατηρούνται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, ώστε να μην υπάρχουν αντιστάσεις. Ως κρυογόνο στοιχείο χρησιμοποιείται το ήλιο, το οποίο πρέπει να αναπληρώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας του μηχανήματος. Η ισχύς των μαγνητικών πεδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στην κλινική πράξη, είναι από 0,5 έως 1,5 Tesla. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποτελούνται από σιδηρομαγνητικά υλικά στα οποία έχει διοχετευθεί κατά την κατασκευή τους μαγνητικό πεδίο. Δεν απαιτούνται λοιπόν κρυογόνα για τη λειτουργία τους. Η ισχύς των μόνιμων μαγνητών είναι σχετικά μικρή (0.2-0.3 Tesla), το βάρος τους δύμως είναι τόσο μεγάλο ώστε χρειάζεται ειδική κτιριακή υποδομή. Οι μαγνήτες αντιστάσεως είναι και αυτοί εν γένει χαμηλού πεδίου και χρησιμοποιούνται σε μικρή έκταση. Πιθανόν με την εξέλιξη των softwears θα αυξηθεί η χρήση μόνιμων μαγνητών όπως και μαγνητών αντιστάσεως στην κλινική πράξη λόγω μικρότερου κόστους λειτουργίας.

## Φυσικές αρχές

Κάθε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα περιστρεφόμενα ηλεκτρόνια. Στη μαγνητική τομογραφία εκμεταλλεύμαστε τις ιδιότητες των πυρήνων των ατόμων. Οι πυρήνες απο-

τελούνται από σωματίδια, πρωτόνια και νετρόνια, τα οποία περιστρέφονται περί τον άξονά τους δημιουργώντας γύρω τους ένα απειροελάχιστο μαγνητικό πεδίο. Στους πυρήνες οι οποίοι έχουν ζυγούς αριθμούς πρωτονίων και ζυγούς αριθμούς νετρονίων (π.χ. τα ισότοπα He-4, O-16, C-12) τα μαγνητικά πεδία των σωματιδίων αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα ο πυρήνας να μην έχει καθαρό μαγνητικό πεδίο. Αντιθέτως, πυρήνες οι οποίοι έχουν μονούς αριθμούς πρωτονίων (H-1, N-15, P-31, Na-23) η νετρονίων (He-3, O-17, Ca-41) έχουν καθαρό μαγνητικό πεδίο γύρω τους. Εάν τόσο ο αριθμός των πρωτονίων όσο και των νετρονίων είναι μονός (H-2, N-14) τα μαγνητικά πεδία μπορεί να είναι πιο πολύπλοκα.

Επειδή το μαγνητικό πεδίο των πυρήνων είναι υπερβολικά μικρό, για την ανίχνευσή τους και τη δημιουργία εικόνων μαγνητικής τομογραφίας απαιτείται τεράστιος αριθμός ατόμων. Από όλα τα άτομα που έχουν μαγνητικό πεδίο περισσότερο προσφέρονται ως βάση στη μαγνητική τομογραφία τα άτομα υδρογόνου. Είναι τα πολυπληθέστερα στο ανθρώπινο σώμα, ευρισκόμενα τόσο στο νερό όσο και στο λίπος. Σήμερα λοιπόν, στην κλινική πράξη όλες οι εικόνες μαγνητικής τομογραφίας παριστούν εικόνες ατόμων υδρογόνου.

Τα περισσότερα πρωτόνια λοιπόν του ανθρώπινου σώματος δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει διεύθυνση παράλληλη στον άξονα περιστροφής του πρωτονίου. Το πεδίο αυτό μπορεί να παρομοιωθεί με ένα μικρό μαγνήτη, ο οποίος έχει δύο πόλους ίσης ισχύος και αντίθετης φοράς. Οι διεύθυνσεις των μικρών αυτών μαγνητών στο ανθρώπινο σώμα είναι τυχαίες, με αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται και το συνολικό πεδίο ενός δείγματος ιστού να είναι μηδέν. Όταν το σώμα εκτεθεί στο ισχυρό πεδίο ενός μαγνητικού τομογράφου, τα μικρά πεδία των πυρήνων προσανατολίζονται στην ίδια διεύθυνση με αυτή του τομογράφου. Από αυτά, λίγο περισσότερα έχουν φορά ίδια με αυτή του ισχυρού μαγνητικού πεδίου (παράλη-