

ΑΡΘΡΟ
 Δρ. Χριστάκης Κωνσταντινίδης
 Επίκουρος Καθηγητής
 Τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας και Κατασκευαστικής
 Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ: ΤΟ ‘ΜΑΓΙΚΟ ΜΑΤΙ’ ΣΤΑ ΑΔΥΤΑ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ

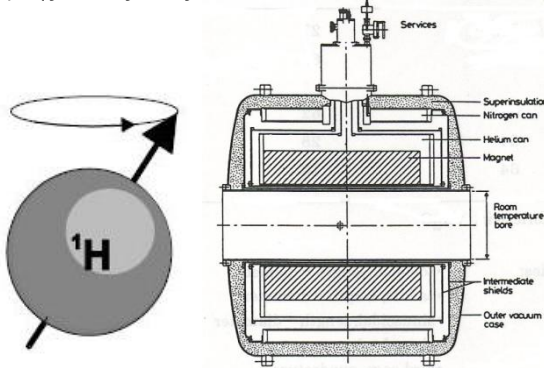
Αναμφίβολα είναι γνωστή στους περισσότερους η μοντέρνα διαγνωστική απεικονιστική τεχνική της Μαγνητικής Τομογραφίας (MRI). Η τεχνική αυτή, η οποία στηρίζεται στη αντίστοιχο φαινόμενο φυσικής του Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (Nuclear Magnetic Resonance), αποτελεί ένα από τα δημοφιλέστερα απεικονιστικά εργαλεία στη κλινική ιατρική σήμερα. Αποτελεί παράλληλα και μια ραγδαία αναπτυσσόμενη ερευνητική περιοχή που καλύπτει το φάσμα της βασικής, εφαρμοσμένης, και κλινικής έρευνας. Οι φυσικές αρχές που διέπουν το φαινόμενο του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού ανακαλύφθηκαν ανεξάρτητα το 1946 στα Αμερικανικά Πανεπιστήμια Στάνφορντ και Χάρβαρντ από τους Felix Bloch και Edward Purcell, αντίστοιχα, στους οποίους απονεμήθηκε το 1952 το βραβείο Νόμπελ φυσικής για την ανακάλυψη τους. Συνολικά, η ανακάλυψη του φαινομένου και η ραγδαία επιστημονική εξέλιξη του τα τελευταία 65 χρόνια αναγνωρίστηκαν από την διεθνή επιστημονική κοινότητα με 5 βραβεία Νόμπελ που απονεμήθηκαν σε 7 συνολικά Νομπελίστες (βλέπε Πίνακα 1).

Ιστορική Αναδρομή της Εξέλιξης της Μαγνητικής Τομογραφίας		
Δεκαετία	Ανακάλυψη	Αναγνώριση
1930	Ανάπτυξη φαινομένου μαγνητικού συντονισμού με μοριακές δέσμες ιόντων λιθίου στη παρουσία μαγνητικών πεδίων και αλληλεπίδραση δέσμης με μικροκύματα	Isidor Isaac Rabi – Βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1944
1940	Ανακάλυψη του φαινομένου του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού [Nuclear Magnetic Resonance (NMR) ¹]	Felix Bloch and Edward Mills Purcell – Βραβείο Nobel Φυσικής 1952
1960	Απόδειξη αύξησης σήματος στο μαγνητικό συντονισμό με χρήση του μαθηματικού μετασχηματισμού Φουριέ	Richard R. Ernst – Βραβείο Νόμπελ Χημείας 1991
1970	Δημοσίευση χρήσης βαθμωτών πηνίων κλίσης για κωδικοποίηση πληροφοριών και ιατρική απεικόνιση	Paul Lauterbur
1980	Ανακάλυψη επίδρασης αφαίρεσης οξυγόνου από αμινοξέα της αιμοσφαιρίνης (Hemoglobin) και ανάπτυξη μεθοδολογίας για χαρτογράφηση της δομής πρωτεϊνών και μακρομορίων	Kurt Wutrich – Βραβείο Νόμπελ Χημείας 2002
1990	Χρήση γραμμικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων για απεικόνιση με προβολές και δημιουργίας ιατρικών εικόνων ανθρώπινης ανατομίας με χωρική επιλογή τομών.	Paul Lauterbur και Sir Peter Mansfield – Βραβείο Νόμπελ Φυσιολογίας και Ιατρικής 2003

¹Το φαινόμενο Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (Nuclear Magnetic Resonance) μεταγλωττίστηκε σε Απεικόνιση Μαγνητικής Τομογραφίας (Magnetic Resonance Imaging - MRI) λόγω του φόβου που δημιούργησε ο όρος ‘πυρηνικός’ στο απλό άνθρωπο.

Πίνακας 1: Ιστορική εξέλιξη φαινομένου της Μαγνητικής Τομογραφίας.

Το φαινόμενο στηρίζεται στις μαγνητικές ιδιότητες των πυρήνων υδρογόνου (οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν σαν μικροί μαγνήτες) [Εικόνα 1], οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο ανθρώπινο σώμα (στο νερό, μακρομόρια, οργανικές ενώσεις, αμινοξέα κτλ) και στη αλληλεπίδραση τους με ένα εξωτερικό στατικό μαγνητικό πεδίο (δηλαδή στο προσανατολισμό τους είτε παράλληλα είτε αντιπαράλληλα με το πεδίο αυτό). Το στατικό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται με χρήση υπεραγωγίμων μαγνήτων (οι οποίοι κατασκευάζονται από κράματα υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα να παρουσιάζουν μηδενική ηλεκτρική αντίσταση στη διόδο ηλεκτρικού ρεύματος σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν). Οι εντάσεις των μαγνητικών πεδίων των κλινικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη κλινική ιατρική είναι συνήθως 1.5 Τέσλα. Η απλή παρουσία των πρωτονίων υδρογόνου σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να οδηγήσει σε μαγνητικό συντονισμό ή απεικόνιση. Για να επέλθει συντονισμός είναι απαραίτητη η διέγερση των πυρήνων με ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων (στο εύρος συχνοτήτων 10-100 εκατομμυρίων Hertz). Μετά το πέρας της διέγερσης οι πυρήνες εκπέμπουν ένα ασθενές ραδιοσήμα (της τάξης του ενός εκατομμυριοστού του Volt), το οποίο στη συνέχεια ανιχνεύεται από συντονισμένες κεραίες (δέκτες) στη συγκεκριμένη συχνότητα διέγερσης/αποδιέγερσης (την ίδια με την συχνότητα στροφορμής των πυρήνων). Επεξεργασία του σήματος οδηγεί στη δημιουργία της ιατρικής εικόνας όπως την γνωρίζουμε σήμερα.

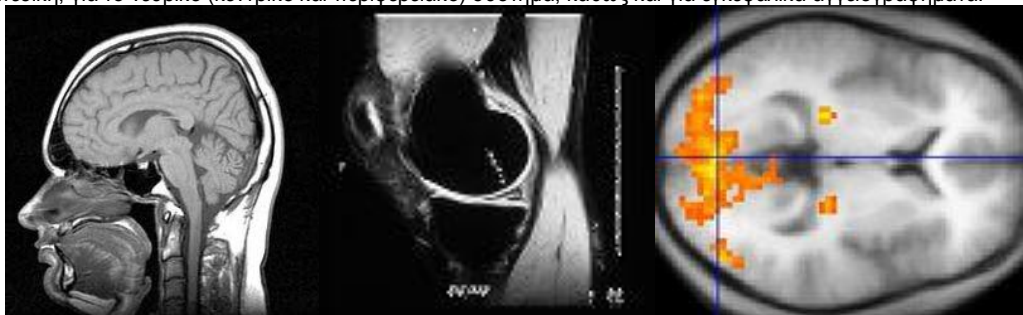


Εικόνα 1: (Αριστερά) Σχεδιάγραμμα πυρήνα υδρογόνου με συμπεριφορά μικρού μαγνήτη, (κέντρο) διαγραμματική παρουσίαση τομής τομογραφικού συστήματος με υπεραγωγίμο μαγνήτη, και (δεξιά) μοντέρνο κλινικό σύστημα μαγνητικής τομογραφίας.

Σαν διαγνωστική κλινική τεχνική, η Μαγνητική Τομογραφία έχει πολλαπλά προτερήματα σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές ακτινοδιαγνωστικές τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων των γεγονότων ότι:

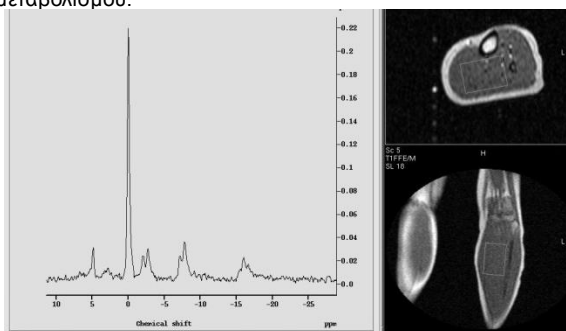
- A. Δεν χρησιμοποιεί ιονίζουσα ακτινοβολία
- B. Είναι μη επεμβατική τεχνική διάγνωσης
- Γ. Δεν έχει αποδειχθεί να έχει επίδραση ή να περικλείει κίνδυνο για τον άνθρωπο
- Δ. Μπορεί να δημιουργήσει ιατρικές εικόνες με υψηλή ευκρίνεια σε οποιαδήποτε τομή στο ανθρώπινο σώμα
- Ε. Δημιουργεί ιατρικές εικόνες μαλακών μορίων και ιστών με άριστη αντίθεση σήματος

Για τους λόγους αυτούς καθιερώθηκε σαν ένα από τα χρησιμότερα κλινικά απεικονιστικά εργαλεία για απεικόνιση μαλακών ιστών, στη ορθοπεδική, για το νευρικό (κεντρικό και περιφερειακό) σύστημα, καθώς και για εγκεφαλικά αγγειογραφήματα.



Εικόνα 2: Κλινικά παραδείγματα απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού τα οποία έχουν καθιερώσει την τεχνική σαν ένα από τα χρησιμότερα διαγνωστικά εργαλεία στη μοντέρνα ιατρική. (Αριστερά) Εγκεφαλική απεικόνιση, (κέντρο) μαλακά μόρια και σύνδεσμος γονάτου, (δεξιά) ανίχνευση ενεργών εγκεφαλικών κέντρων με την τεχνική functional MRI.

Η εξέλιξη της τεχνικής δεν περιορίστηκε μόνο στο κλινικό περιβάλλον. Οι πολλαπλές επιστημονικές αναγνωρίσεις πρόσφατων ανακαλύψεων στη βασική και ιατρική επιστήμη, βραβευμένες με βραβεία Νόμπελ, υποστηρίζουν και υπογραμμίζουν την επιστημονική σημασία της και μελλοντικό όφελος της για την επιστήμη και για την ανθρώπινη υγεία. Πρόσφατες ανακαλύψεις που έχουν τεράστια επίδραση στη ανάπτυξη καινοτόμων επιστημονικών περιοχών (όπως π.χ. στη μοντέρνα ψυχολογία και ψυχιατρική) περιλαμβάνουν την τεχνική functional MRI (Εικόνα 2) με την οποία χαρτογραφούνται τα ενεργά εγκεφαλικά κέντρα τα οποία έχουν προδιεγερθεί μέσω οπτικών, μηχανικών, ή άλλων προκλήσεων. Παράλληλα, η εξέλιξη της φασματοσκοπίας εγκεφάλου και του σκελετομυϊκού συστήματος (Εικόνα 3) έχει αποτελέσει την επιστημονική βάση μελέτης και ανάλυσης σπάνιων εγκεφαλικών νόσων, του καρκίνου, καθώς και παθήσεις μεταβολισμού.



Εικόνα 3: Φάσμα φωσφόρου (^{31}P spectrum) μυών κάτω άκρου (αριστερά) με τοποθέτηση περιοχής ενδιαφέροντος στις εικόνες-οδηγούς (δεξιά) [Από το Πανεπιστημιακό κέντρο ETH Ζυρίχης, Οκτώβριος 2005 - αναπαραγωγή και χρήση εικόνας με άδεια].

Ραγδαία ανάπτυξη είχε επίσης η απεικόνιση και μελέτη της λειτουργίας του καρδιαγγειακού συστήματος με ανοικτά συστήματα απεικόνισης και παράλληλη χρήση καθετηριασμών για καρδιακές και εγκεφαλικές επεμβάσεις, την χρήση μοντέρνων σκιαγραφικών φαρμακευτικών ουσιών στα ισχαιμικά επεισόδια και στο έμφραγμα του μυοκαρδίου για χαρακτηρισμό αιμάτωσης και λειτουργίας του μυοκαρδίου, και βέβαια ο ποσοτικός λειτουργικός χαρακτηρισμός των αιμοδυναμικών του παραμέτρων. Πρόσφατες προσπάθειες και εξελίξεις εστιάζονται στη καρδιακή απεικόνιση σε πραγματικούς χρόνους (real-time imaging), απεικόνιση οργανικών ενώσεων με βάση τον άνθρακα, απευθείας απεικόνιση νατρίου, καθώς και την τελειοποίηση των τεχνικών αυτών σε ένα ολοκληρωμένο πακέτο μελέτης-διάγνωσης (one-stop shop).

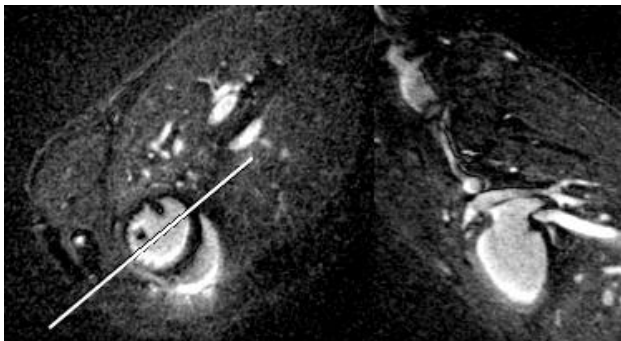
Νέες καινοτόμες τεχνικές περιλαμβάνουν επίσης τον μη-επεμβατικό μηχανικό χαρακτηρισμό ιστών με την χρήση της ελαστογραφίας, με κλινικές εφαρμογές στη κύρωση ήπατος (Πανεπιστημιακό κέντρο Mayo Clinic στις Ηνωμένες Πολιτείες) και την χρήση τεχνικών μέτρησης διάχυσης νερού σε εγκεφαλικές καρκινικές παθήσεις. Ενδιαφέρουσα πορεία εξέλιξης αποτελεί επίσης και η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων απεικόνισης μαγνητικής τομογραφίας και ποζιτρονικής εκπομπής (Positron-Emission Tomography). Επιπλέον, η πρόσφατη έγκριση και εισαγωγή κλινικών συστημάτων υψηλών εντάσεων (7 Τέσλα) από τον αρμόδιο φορέα των Ηνωμένων Πολιτειών (Food and Drug Administration) σε ορισμένα ερευνητικά κέντρα της Αμερικής (Στάνφορντ, Εθνικά Ινστιτούτα Υγείας κ.α.), έχει δειλά-δειλά οδηγήσει σε προσπάθειες χαρτογράφησης εγκεφαλικών κέντρων και νημάτων (fiber tractography) με υψηλή ευκρίνεια, εφάμιλλη της ιατρικής ιστοπαθολογίας.

Στο τομέα της χρήσης της τεχνικής αυτής για μελέτη βιολογικών οργανισμών, τρομερή ανάπτυξη είχε, και προβλέπεται να έχει η χρήση τεχνικών για μελέτη γενετικά τροποποιημένων ποντικών σε υψηλές εντάσεις (>7 Τέσλα), τόσο για παθήσεις του καρδιαγγειακού συστήματος (έμφραγμα, καρδιομυοπάθειες, καρδιακή ανεπάρκεια), όσο και για εγκεφαλικές νευροπάθειες (όπως Αλζχάιμερ, Πάρκινσον) και άλλες.

Παρόλες τις έρευνες δεν έχει αποδειχθεί ότι η μαγνητική τομογραφία εμπεριέχει κινδύνους ή έχει μακροπρόθεσμη επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κανονισμοί που περιορίζουν την χρήση της τεχνικής όσον αφορά την ένταση ισχύος ραδιοκυμάτων για την διέγερση πυρήνων του ανθρώπινου σώματος, καθώς επίσης και της πιθανής επιφανειακής νευρικής διέγερσης που μπορεί να δημιουργηθεί σε κάποιες περιπτώσεις. Αυστηρές οδηγίες και μέτρα έχουν δημοσιευθεί και εφαρμόζονται καθ' υπόδειξη του αρμόδιου φορέα των ΗΠΑ (Food and Drug Administration).

Παρόλα τα προτερήματα της, η χρήση προηγμένων τεχνολογιών και εξειδικευμένων υλικών στο Μαγνητικό Τομογράφο (κρυογενών, υπεραγωγίων μαγνητών, εξειδικευμένων ηλεκτρονικών, ψηφιακών συστημάτων) οδηγεί σε υψηλό κόστος εξέτασης (> 150 Ευρώ περίπου) για κλινικές εξετάσεις. Βάσει παλαιότερων μελετών του Εθνικού Συστήματος Υγείας του Ηνωμένου Βασιλείου (National Health Service), ενδείκνεται η ύπαρξη και χρήση ενός κλινικού συστήματος Μαγνητικού Τομογράφου για κάθε μισό εκατομμύριο ανθρώπων πληθυσμού περίπου. Παρόλα ταύτα στη Κύπρο υπάρχουν τουλάχιστον 8 κλινικά συστήματα σε ιδιωτικά κέντρα υγείας, κλινικές, και στο Γενικό Νοσοκομείο Λευκωσίας, πέντε από τα οποία βρίσκονται στη Λευκωσία, 2 στη Λεμεσό, και 1 στη Λάρνακα. Η δραστηριότητα τους εστιάζεται σε παροχή κλινικών υπηρεσιών κατά κύριο λόγο, παρόλο που σε κάποια από αυτά διεξάγονται και εκπονούνται κλινικές ερευνητικές δραστηριότητες με χρηματοδότηση του Ιδρύματος Προώθησης Έρευνας, του εθνικού φορέα χρηματοδότησης. Το υψηλό κόστος συντήρησης και αναθαμίσεων τέτοιων συστημάτων, καθώς και οι δυσκολίες στη σύναψη ερευνητικών συμβολαίων με τις προμηθεύτριες εταιρείες, αποτελούν τους κύριους ανασταλτικούς παράγοντες για δημιουργία σοβαρού υπόβαθρου και υποδομής έρευνας στη Κύπρο.

Σε επίπεδο βασικής επιστήμης, έρευνα στο τομέα του καρδιαγγειακού συστήματος ποντικών με Μαγνητική Τομογραφία διεξάγεται στο πιστοποιημένο Εργαστήριο Φυσιολογίας και Βιοιατρικής Απεικόνισης «ΙΠΠΟΚΡΑΤΗΣ» κάτω από την επίβλεψη και καθοδήγηση του Δρα. Χ. Κωνσταντινίδη, Επίκουρου Καθηγητή Μηχανολόγων Μηχανικών και Κατασκευαστικής του Πανεπιστημίου Κύπρου, σε συνεργασία με το Κέντρο Μικροσκοπίας και Βιοιατρικής Απεικόνισης του Πανεπιστημίου Duke Αμερικής (Εθνικό Κέντρο παροχής υπηρεσιών απεικόνισης χρηματοδοτημένο από το Εθνικό Ινστιτούτο Έρευνας Καρκίνου των ΗΠΑ). Η έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε/είτε από την Ελληνική Τράπεζα και το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας κάτω από την αιγίδα διεθνούς συνεργασίας μεταξύ της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Κύπρου με την αντίστοιχη Σχολή (Pratt School of Engineering) του Πανεπιστημίου Duke.



Εικόνα 4: Καρδιακή απεικόνιση ποντικού με χρήση μαγνητικού τομογράφου υψηλής ισχύος 7 Τέσλα στο Πανεπιστημιακό κέντρο Duke των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής [Από το Κέντρο Μικροσκοπίας Duke Βόρειας Καρολίνας].