



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

*«Προηγμένα Συστήματα και Μέθοδοι στη Βιοϊατρική
Τεχνολογία»*

**Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη και χρήση
αξονικής τομογραφίας και ψηφιακής
αφαιρετικής αγγειογραφίας**

ΠΟΤΟΥΡΙΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

Αριθμός Μητρώου: 1911

Επιβλέπων

ΛΑΒΔΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών

Τομέας Ακτινολογίας - Ακτινοθεραπείας

Εξεταστική επιτροπή διπλωματικής εργασίας

1. Επιβλέπων καθηγητής : Λαβδός Ελευθέριος

2. Γκλώτσος Δημήτριος

3. Κωστόπουλος Σπυρίδων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ποτουρίδου Αικατερίνη, με αριθμό μητρώου 1911 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗΣ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου». Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και - έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Η Δηλούσα

Ποτ.Αικ.

Περίληψη

Η αξονική τομογραφία και αργότερα η αγγειογραφία αποτέλεσαν σταθμούς στην ιστορία της ιατρικής εξέλιξης. Απαρχή για την ανακάλυψη και στη συνέχεια βελτίωση αυτών των διαδικασιών, υπήρξε η ανακάλυψη των ακτίνων Χ. Η εργασία εξετάζει την εξέλιξη της αξονικής τομογραφίας και της αγγειογραφίας από την εμφάνισή τους έως και σήμερα.

Καταγράφονται αναλυτικά οι σταθμοί αυτής της εξέλιξης από τις αρχές του 20ου αιώνα μέχρι και σήμερα. Πρωτοπόροι ερευνητές με κίνδυνο ακόμα και της ζωής τους λόγω της επιβλαβούς ακτινοβολίας, έδωσαν λύσεις και βοήθησαν στην καλύτερη θεραπευτική αντιμετώπιση πολλών ασθενειών.

Λέξεις- κλειδιά: Τομογραφία, αγγειογραφία, ακτινοβολία, ανασκόπηση, εξέλιξη

Abstract

Computed tomography and later angiography were milestones in the history of medical development. The beginning of the discovery and then the improvement of these procedures was the discovery of X-rays. This essay examines the evolution of computed tomography and angiography from their appearance until today.

The stages of this development are described in detail from the beginning of the 20th century until today. Pioneering researchers even risked their lives from radiation provided solutions and helped to better treatment of many diseases.

Keywords: Tomography, angiography, radiation, background, evolution

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον επόπτη μου Λαβδά Ελευθέριο για την αμέριστη βοήθειά του στην συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τους γονείς μου και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν απλόχερα όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
Εισαγωγή	9
Αξονική Τομογραφία.....	11
Ενδείξεις και περιορισμοί της αξονικής τομογραφίας	13
Ιστορική αναδρομή	17
Α. Τα πρώτα βήματα: 1921-1970	17
Β. Οι μεγάλες εξελίξεις: 1970 -1990.....	28
Γ. Οι σύγχρονες εξελίξεις: 1990-σήμερα	33
Οι γενιές των αξονικών τομογράφων	36
Α. Η πρώτη γενιά αξονικών τομογράφων	37
Β. Η δεύτερη γενιά αξονικών τομογράφων.....	38
Γ. Η τρίτη γενιά αξονικών τομογράφων	39
Δ. Η τέταρτη γενιά αξονικών τομογράφων.....	40
Ε. Η πέμπτη γενιά.....	41
Οι σύγχρονοι τομογράφοι 1990- σήμερα.....	42
Ο ελικοειδής τομογράφος	43
Τομογράφος πολλαπλών τομών	49
Αγγειογραφία	53
Α. Ορισμοί και είδη αγγειογραφίας.....	53
Α. Ιστορία της αγγειογραφίας	61
Β: Διαφορές αξονικής τομογραφίας- Αγγειογραφίας και ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας.....	69
Αντί Επιλόγου	72
Βιβλιογραφία.....	73

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η βασική εξέλιξη των αξονικών τομογράφων σχηματικά, πηγή (link.springer.com)	12
Εικόνα 2: Εκτιμώμενος αριθμός αξονικών τομογραφιών (CT) που πραγματοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2007, ανάλογα με το φύλο και την ηλικία και την έκθεση.	15
Εικόνα 3: Προβλεπόμενος αριθμός μελλοντικών καρκίνων (μέσος όρος και όρια αβεβαιότητας 95%) που θα μπορούσαν να σχετίζονται με τη χρήση αξονικής τομογραφίας στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2007, ανάλογα με την ηλικία κατά την έκθεση.....	15
Εικόνα 4: Ποσοστά αύξησης χρήσης της αξονικής τομογραφία σε διάστημα 25 ετών	16
Εικόνα 5: Πρότυπο αξονικού τομογράφου του Bernard Zeidses des Plantes.....	18
Εικόνα 6: Σχεδιάγραμμα της συσκευής Pohl.....	19
Εικόνα 7: Ο πρώτος τομογράφος του Grossmann	20
Εικόνα 8: Το πρότυπο Vallebona, Πηγή: (Littleton&Durizch)	21
Εικόνα 9: Το δεύτερο πρότυπο του Vallebona, Πηγή: (Littleton & Durizch).....	22
Εικόνα 10: Η συσκευή Watson, Πηγή: (Littleton & Durizch).....	23
Εικόνα 11: Η συσκευή Takahashi, (πηγή: (Doi, Morita, & Sakuma, 2012).....	24
Εικόνα 12: Το σχέδια παραγωγής και ανακατασκευής εικόνων- τομών Frank (πηγή: (Filler, 2009)	24
Εικόνα 13: Σχεδιάγραμμα από τη δημοσίευση του Tetelbaum	25
Εικόνα 14: Λειτουργικό διάγραμμα της υπολογιστικής συσκευής που βασίζεται στην τηλεόραση του Tetelbaum, Πηγή: (Koehler, 2022)	26
Εικόνα 15: Ο πρώτος αξονικός τομογράφος, (πηγή: (Beckmann, 2014).	27
Εικόνα 16: Ο πρώτος εμπορικός αξονικός τομογράφος και ο δημιουργός του Hounsfield Godfrey.....	28
Εικόνα 17: Διάταξη πρώτου αξονικού τομογράφου, πηγή: (Goldman, 2007)	29
Εικόνα 18: Η πρώτη αξονική τομογραφία εγκεφάλου σε ζώσα ασθενή. 1 ^η Οκτωβρίου 1971, πηγή: (Beckmann, 2014)	31
Εικόνα 19. Σχηματική αναπαράσταση του βήματος της έλικας (pitch) στους υπολογιστικούς τομογράφους με δυνατότητα ελικοειδούς σάρωσης (Awda, 2019).	34
Εικόνα 20: Διαδικασία σύγχρονης τομογραφίας, Πηγή: (Παντελής, 2021).....	35
Εικόνα 21: Σχηματική προβολή τομογράφου πρώτης γενιάς, Πηγή: (Παντελής, 2021).....	37
Εικόνα 22: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας τομογράφου 2 ^{ης} γενιάς	38
Εικόνα 23: Γραφική αναπαράσταση τομογράφου 3 ^{ης} γενιάς.....	39
Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση τομογράφου 4 ^{ης} Γενιάς.....	40
Εικόνα 25: Αναπαράσταση τομογράφου 5 ^{ης} Γενιάς, Πηγή: (Buzug, 2008)	41
Εικόνα 26: Αναπαράσταση λειτουργίας ελικοειδούς τομογράφου	43
Εικόνα 27: Αλγόριθμος παρεμβολής σε ελικοειδή σάρωση, Πηγή: (Hsieh & Flohr, 2021) ...	44
Εικόνα 28: MIP ανασύνθεση από αξονική τομογραφία θώρακος με ελικοειδή σάρωση όπου διακρίνονται ξεκάθαρα δομές και παθολογίες του πνεύμονα.....	45
Εικόνα 29: Απεικόνιση του εντέρου που προκύπτει μετά την ανασύνθεση των εικόνων σε διάφορα επίπεδα και 3D απεικόνιση με τη χρήση ειδικού αλγορίθμου ανακατασκευής.	47
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση της διαφοράς απλού και πολυτομικού τομογράφου..	49
Εικόνα 31: Εικόνα αξονικής εντερογραφίας με ενδοφλέβια χορήγηση σκιαγραφικής ουσίας που δείχνει την παρουσία οπισθοπεριτοναϊκού αποστήματος (μακρύ βέλος) και φλεβοκομβικής οδού (κοντό βέλος) που συνδέει το απόστημα και τον φλεγμονώδη περιφερικό ειλέο σε γυναίκα 62 ετών, στα πλαίσια επιπλοκών της νόσου Crohn.....	51

Εικόνα 32: Διαφορά ευκρίνειας απλής- αφαιρετικής αγγειογραφίας,.....	56
Εικόνα 33: Ανακατασκευή εικόνας καρδιάς και στεφανιαίων αγγείων με τομογράφο πολλαπλών σειρών ανιχνευτών.....	60
Εικόνα 34. Εικόνα του ακρωτηριασμένου χεριού όπως προέκυψε από την ακτινογραφία των Lindenthal & Haschek, Πηγή: (Kusuyama, 2011).....	63
Εικόνα 35. Εικόνα ραδιογραφήματος των Berberich και Hirsch, πηγή (Kusuyama, 2011)	64
Εικόνα 36. Αγγειογραφία εγκεφάλου από τον Moniz	65
Εικόνα 37. Ο πρώτος καρδιακός καθετηριασμός από τον Forssmann, Πηγή: (Kusuyama, 2011)	66

Εισαγωγή

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι επικεντρώθηκαν στην εύρεση θεραπειών για τις νόσους που κατά καιρούς αντιμετώπιζαν, για τη θεραπεία του πόνου και την όσο το δυνατόν αποφυγή του θανάτου (Μανιάτης, 2002). Οι πρώτες προσπάθειες για την επίτευξη των παραπάνω αφορούσαν στη χρήση φυσικών μεθόδων όπως π.χ. τα βότανα ή και τα μέταλλα, με τους «θεραπευτές» της εποχής να αντιμετωπίζονται από τις κατά τόπους κοινωνίες άλλοτε με σεβασμό και άλλοτε με φόβο, προκατάληψη και φθόνο. Ειδικά στην περίοδο του Μεσαίωνα δεν ήταν λίγες οι φορές που «θεραπευτές» κυρίως γένους θηλυκού παραδόθηκαν στην πυρά με την κατηγορία της μαγείας.

Για μεγάλη περίοδο της ανθρώπινης ιστορίας, πρόβλημα αποτελούσε η αδυναμία απεικόνισης του «αόρατου» αυτού δηλαδή που υπάρχει στο ανθρώπινο σώμα, δεν φαίνεται, αλλά μπορεί να το καταστρέψει. Η ανακάλυψη των ακτίνων X από τον Roentgen το 1895 ήταν το πρώτο μεγάλο βήμα, καθώς έκανε δυνατό αυτό που ήταν κάποτε αδύνατο. Παράλληλα αποτέλεσε το έναυσμα για την περαιτέρω μελέτη της χρησιμότητας των απεικονίσεων στη διάγνωση και θεραπεία ενός συνόλου διαφορετικών παθήσεων (Kotzur, 1994). Η πορεία ωστόσο της χρήσης των ακτίνων-X από την ανακάλυψή τους έως και σήμερα αντιμετώπισε εμπόδια, καθώς συχνά ασθενείς και προσωπικό τραυματιζόνταν ή και κατέληγαν μετά από τη χρήση τέτοιου είδους απεικονιστικών μεθόδων.

Ο όρος «επεμβατική ακτινολογία» εισήχθη για πρώτη φορά το 1967 από τον Αλέξανδρο Μαργκούλη. (Margulis, 1967) Τις επόμενες τρεις δεκαετίες η πρόοδος της επιστήμης ιδιαίτερα στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των υλικών απεικόνισης έκανε δυνατή την δημιουργία νέας γενιάς μηχανημάτων. Ο υπολογιστικός ή αξονικός τομογράφος και ο αγγειογράφος με πολύ υψηλή ανάλυση είναι δείγματα αυτής της προόδου που για τη λειτουργία τους χρειάζονται εξειδικευμένοι επαγγελματίες υγείας, όπως είναι οι τεχνολόγοι ακτινολογίας, ιατροί ακτινολόγοι κ.α. Η ιατρική απεικονιστική στις μέρες μας σημειώνει μεγάλη πρόοδο, καθώς επιτρέπει στον χρήστη να αποκτήσει ευκρινέστερη εικόνα των αγγείων και των οργάνων των ασθενών, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί στην καλύτερη και πιο επιτυχή αντιμετώπιση πληθώρας παθολογιών. Οι επεμβατικοί ακτινολόγοι και οι τεχνολόγοι ακτινολογίας αποτελούν απαραίτητο προσωπικό στις μονάδες υγείας,

καθώς χειρίζονται μία σειρά από θέματα όπως η τοποθέτηση μοσχευμάτων και στεντ, τεχνικές εμβολισμού, κ.ά.

Στην εργασία μας θα ασχοληθούμε με τις διαφορές ανάμεσα στο σύγχρονο αγγειογράφο και τον αξονικό τομογράφο όσον αφορά τόσο στην ακρίβεια και τη λειτουργικότητα της απεικόνισης, όσο και στην επιβάρυνση που τα παραπάνω μπορεί να έχουν για τους ασθενείς και τους εμπλεκόμενους επαγγελματίες υγείας.

Θα παρουσιαστεί η εξέλιξη των μεθόδων της αγγειογραφίας και της αξονικής τομογραφίας από την ανακάλυψή τους μέχρι τις μέρες μας, καθώς και οι διαφορετικές τεχνικές που ενδέχεται να χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές παθήσεις.

Αξονική Τομογραφία

Η πρώτη χρήση των ακτίνων X είχε ως αρχή την προβολική απεικόνιση με τις επίπεδες δισδιάστατες ακτινογραφίες. Μειονέκτημα της προβολικής απεικόνισης είναι η συμπίεση των τρισδιάστατων αντικειμένων στις δύο διαστάσεις του φιλμ, με αποτέλεσμα η διαγνωστική τους αξία να περιορίζεται σημαντικά. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με τομογραφικές μεθόδους απεικόνισης όπως η αξονική και η μαγνητική τομογραφία.

Η αξονική τομογραφία θεωρείται η μεγαλύτερη ιατρική ανακάλυψη στο χώρο των απεικονίσεων μετά τις ακτίνες X. Όπως χαρακτηριστικά τονίζει ο Bull, «Σπάνια, αν ποτέ, στην ιστορία της ιατρικής υπάρχει μια νέα ανακάλυψη που να σαρώσει τον κόσμο τόσο γρήγορα όσο η αξονική τομογραφία. Δεν λείπει από καμία χώρα και κανένα ιατρικό κέντρο και όλα αυτά έγιναν σε μισή δεκαετία παρόλο το μεγάλο κόστος του εξοπλισμού» (Bull, 1980, p. 3).

Καθώς ούτε η τέχνη αλλά ούτε και οι επιστημονικές ανακαλύψεις δεν προκύπτουν «εν κενώ», το ίδιο συνέβη και με την αξονική τομογραφία, η δημιουργία της οποίας στηρίχθηκε στα παρακάτω ήδη αποκτηθέντα επιτεύγματα και γεγονότα:

- Το γεγονός ότι οι κρύσταλλοι σπινθηρίζουν όταν εκτίθενται σε ακτίνες X.
- Η ανακάλυψη του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρονίων.
- Η ανακάλυψη των ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- Η εργασία του Johann Radon σχετικά με την ανασύνθεση της εικόνας.¹
(Πρωτονοτάριος, 2019)

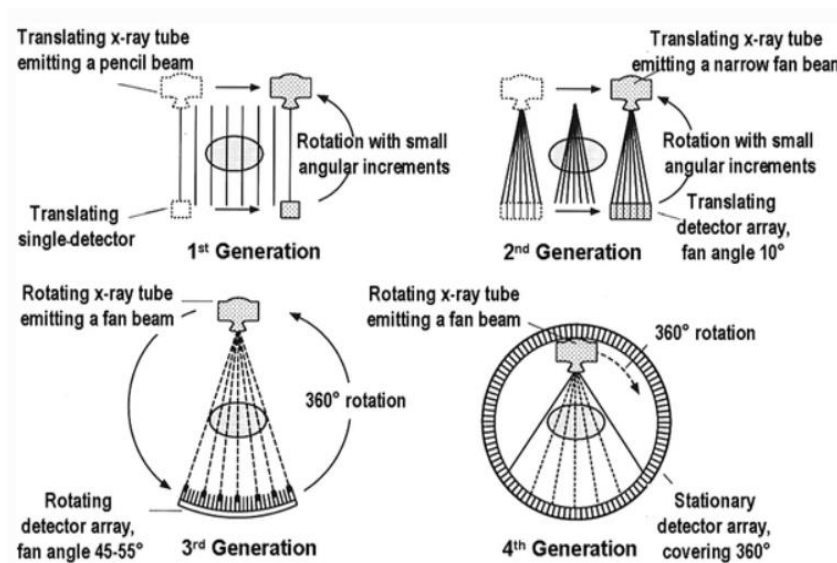
Τα βασικά στοιχεία ενός τυπικού τομογράφου περιλαμβάνουν μια πηγή ακτίνων X και έναν ανιχνευτή τοποθετημένο αντιδιαμετρικά της λυχνίας, που μπορεί να περιστρέφεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Έτσι δημιουργείται μία εικόνα διατομής, όπου με μαθηματική ανακατασκευή των μετρούμενων εντάσεων ακτίνων X

¹ Ο αυστριακός μαθηματικός Johann Radon το 1917 απέδειξε ότι η εικόνα ενός τρισδιάστατου αντικειμένου μπορεί να κατασκευαστεί από έναν άπειρο αριθμό δισδιάστατων εικόνων του. Ο μετασχηματισμός Radon με δύο διαστάσεις συνάρτησης είναι συνολικά όλο των επικαμπυλίων ολοκληρωμάτων αυτής επί ευθειών. Υπάρχει γενικευμένο είδος μετασχηματισμού Radon, που ονομάζεται εξασθενημένος μετασχηματισμός Radon, που ορίζεται ως το σύνολο όλων των επικαμπυλίων ολοκληρωμάτων μίας δισδιάστατης συνάρτησης επί ευθειών, εξασθενημένης ως προς μία συνάρτηση εξασθένισης. Η εργασία του Radon αποτέλεσε σημαντική καμπή στην ανάπτυξη της αξονικής τομογραφίας και μετέπειτα και των λοιπών τομογράφων, καθώς έκανε δυνατή την επεξεργασία των εικόνων.

λαμβάνονται δεδομένα προερχόμενα από την κυκλική τροχιά, σε διαφορετικές θέσεις γύρω από το σώμα του ασθενή. Διαφορετικοί ιστοί έχουν διαφορετικό συντελεστή εξασθένησης ακτίνων Χ. Οι συντελεστές εξασθένησης προκύπτουν από την ακόλουθη εξίσωση (1.1) εκθετικής εξασθένησης (νόμος Beer-Lambert):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.1)$$

όπου I είναι η ένταση της δέσμης, I_0 η ένταση της δέσμης στην πηγή προτού αλληλεπιδράσει με το θέμα, x το πάχος του ιστού που διασχίζει η δέσμη και μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Οι συντελεστές εξασθένησης είναι σταθεροί που περιγράφουν το κλάσμα των εξασθενημένων προσπιπτόντων φωτονίων σε μια ενεργειακή δέσμη ανά μονάδα πάχους ενός υλικού. Είναι διαφορετικοί για διαφορετικά υλικά και μπορούν να ομαλοποιηθούν ως προς τον συντελεστή νερού (μ_w) και το αποτέλεσμα εκφράζεται σε μονάδες Hounsfield (HU). Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης αυξάνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού και την αύξηση της φυσικής πυκνότητας του υλικού. Μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων. Οι αξονικοί τομογράφοι ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο πρόσπτωσης δέσμης ακτίνων που χρησιμοποιούν (επίπεδη κωνική ή παράλληλη δέσμη) και ανάλογα με το σύστημα των ανιχνευτών που διαθέτουν. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε αξονικούς τομογράφους πρώτης, δεύτερης, τρίτης, τέταρτης και πέμπτης γενιάς, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε επόμενο υποκεφάλαιο, (εικόνα 1).



Εικόνα 1. Η βασική εξέλιξη των αξονικών τομογράφων σχηματικά. Πηγή: (link.springer.com)

Ενδείξεις και περιορισμοί της αξονικής τομογραφίας

Από την ανακάλυψή της η αξονική τομογραφία αποτέλεσε εξέταση επιλογής για μία πληθώρα ασθενειών, όπως η απεικόνιση όγκων, τα αγγειακά εγκεφαλικά επεισόδια και οι καρδιακές παθήσεις. Έτσι, δεν προξενεί εντύπωση πως το 2007 μόνο στις ΗΠΑ διενεργήθηκαν 62.000.000 αξονικές τομογραφίες όταν το 1980 ήταν μόνο 3.000.000, ενώ σήμερα ο αριθμός αυτών των εξετάσεων ξεπερνά τα 90.00.000 στην ίδια χώρα. Η ακρίβεια της συγκεκριμένης εξέτασης έναντι της απλής ακτινογραφίας έχει επαρκώς αποδειχθεί σε πληθώρα μελετών, ανάμεσα στις οποίες είναι και αυτή των (Mira, Potter, Fullerton, & Ezekiel, 1982), οι οποίοι μελέτησαν 45 αξονικές τομογραφίες θώρακος (CT) που πραγματοποιήθηκαν σε ασθενείς με καρκίνωμα πνεύμονα (Lung Carcinoma –LC). Από την έρευνα αποδείχθηκε πως:

- Όταν οι συμβατικές ακτινογραφίες δεν εντοπίζουν τον όγκο, η αξονική τομογραφία θα τον εντοπίζει στο 68% των ασθενών.
- Εάν οι συμβατικές ακτίνες X δείχνουν μια καλά εντοπισμένη μάζα, μεταστάσεις και επεκτάσεις του όγκου αποκαλύφθηκαν στο 78% αυτών των ασθενών με αξονική τομογραφία.
- Η αξονική τομογραφία συμβάλλει στο σχεδιασμό του κατάλληλου τύπου ακτινοθεραπείας.
- Το μέγεθος του όγκου μπορεί να φαίνεται πολύ μικρότερο στις κανονικές ακτινογραφίες από ότι στις αξονικές τομογραφίες.

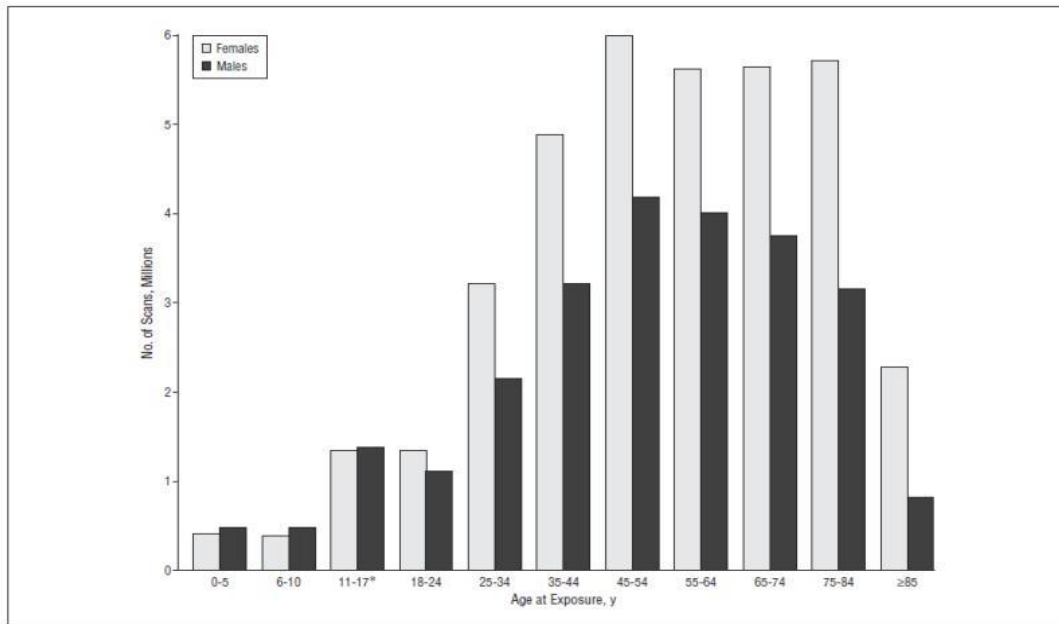
Ωστόσο, μία από τις βασικές ενστάσεις που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία, αφορά στη σχετικά αυξημένη έκθεση των ασθενών στην ακτινοβολία. Η σχέση μεταξύ της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και της επακόλουθης ανάπτυξης νεοπλασίας έχει βασιστεί σε μεγάλο βαθμό σε δεδομένα από μελέτες επιζώντων από τις ατομικές βόμβες που ρίφθηκαν στην Ιαπωνία το 1945. Εκτιμάται ότι άτομα που εκτέθηκαν επαγγελματικά σε ακτινοβολία εντός της πυρηνικής βιομηχανίας παρουσίασαν αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης νεοπλασίας.

Ωστόσο, η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε ακτινοβολία από διαγνωστικές απεικονιστικές εξετάσεις και της ογκογένεσης παραμένει ασαφής (Power, Moloney, Twomey, James, O'Connor, & Maher, 2016). Σε μελέτη του (Royal, 2008) που

αναφέρεται στη δημοσίευση πορισμάτων για τις επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ (BEIR), τονίζεται πως οι επιπτώσεις των ακτινοβολίας θα πρέπει να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους επαγγελματίες του ιατρικού τομέα. Αυτό γιατί η έκθεση σε ακτινοβολία από διαγνωστικές ιατρικές μελέτες είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή έκθεσης σε ακτινοβολία από ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι τυπικές δόσεις ακτινοβολίας σε ενήλικες κυμαίνονται από περίπου 2 mSv για αξονικές τομογραφίες κεφαλής έως περίπου 8-10 mSv για αξονικές τομογραφίες θώρακος, κοιλιάς ή λεκάνης. Μια σύσταση της έκθεσης BEIR VII είναι η διεξαγωγή μελετών ασθενών ιδιαίτερα παιδιών, που έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία ως μέρος της θεραπείας τους.

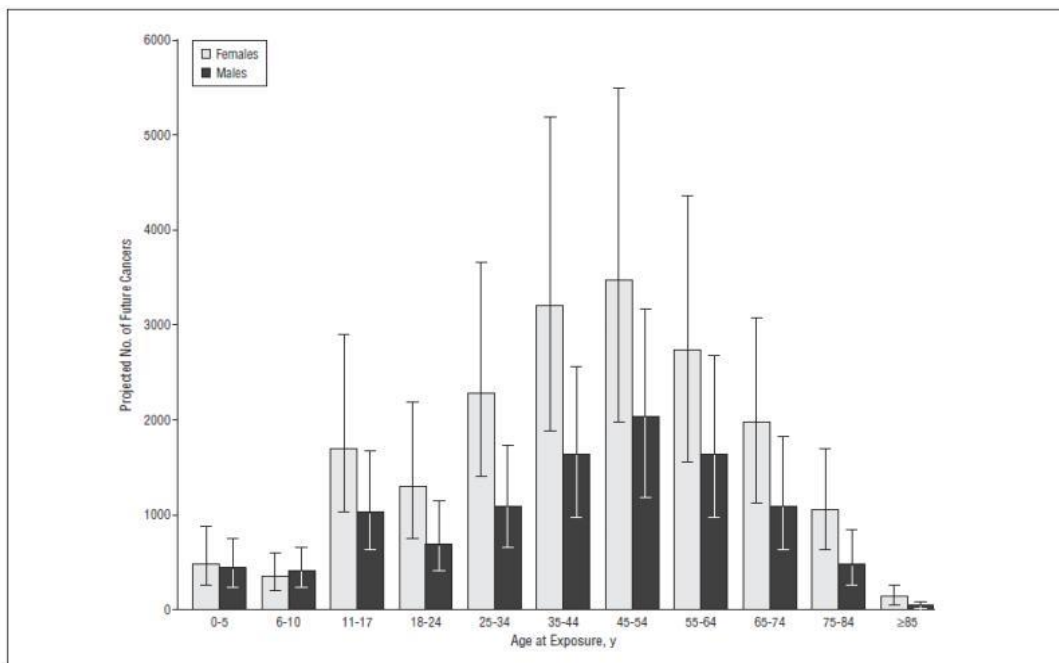
Γενικότερα, αν και η αξονική τομογραφία παρέχει καλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα, η μαγνητική τομογραφία (MRI) παρέχει καλύτερη αντίθεση των μαλακών ιστών από την αξονική τομογραφία. Για παράδειγμα, η μαγνητική τομογραφία με σκιαγραφικό είναι πιο ευαίσθητη από την αξονική με σκιαγραφικό για την ανίχνευση εγκεφαλικών μεταστάσεων από μικροκυτταρικό καρκίνο του πνεύμονα, ενώ η αξονική τομογραφία κρανίου σε πολυτραυματία θεωρείται πιο ευαίσθητη στον εντοπισμό πιθανών καταγμάτων. Έρευνες έδειξαν πως υπάρχει ένα «κατώφλι κινδύνου» πέρα από το οποίο οι περιπτώσεις εμφάνισης νεοπλασιών λόγω της ακτινοβολίας, αυξάνονται γραμμικά. Ασθενείς δηλαδή που δέχτηκαν σωρευτικά πλέον των 100 mSv έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης ασθενειών τέτοιου τύπου (Doss, 2014). Οι (Brenner&Hall, 2007) εκτιμούν ότι τα επόμενα χρόνια 1-2% των εμφανιζόμενων καρκίνων στις ΗΠΑ θα οφείλονται στις παρενέργειες της σωρευτικής ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Άλλοι ερευνητές κάνουν λόγο για 29.000 επιπλέον καρκίνους και 14.500 θανάτους στις τάξεις των χρόνια πασχόντων σε ετήσια βάση εξ αιτίας του προαναφερόμενου γεγονότος (Berrington, et al., 2009)², όπως φαίνεται στην εικόνα 2 και 3.

² Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μοντέλα κινδύνου που βασίζονται στην έκθεση «Βιολογικές Επιδράσεις Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας» του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας και σε δόσεις ακτινοβολίας ειδικών οργάνων που προέρχονται από μια εθνική έρευνα για την εκτίμηση των κινδύνων καρκίνου που σχετίζονται με την ηλικία για κάθε τύπο σάρωσης. Αυτά τα μοντέλα συνδυάστηκαν με ειδικές για την ηλικία και το φύλο συχνότητες σάρωσης για τις ΗΠΑ το 2007, που ελήφθησαν από έρευνες και δεδομένα ασφαλιστικών απαιτήσεων. Υπολογίστηκε ο μέσος αριθμός περιστατικών εμφάνισης καρκίνου που σχετίζεται με την ακτινοβολία με διάστημα εμπιστοσύνης 95% (UL) με χρήση της συνάρτησης προσομοίωσης Monte Carlo. Οι μεγαλύτερες συνεισφορές ήταν από σαρώσεις κοιλιάς και λεκάνης (n = 14 000) (95% UL, 6900-25 000), θώρακα (n = 4100) (95% UL, 1900-8100) και κεφαλής (n = 4000) (95% UL, 1100-8700), καθώς και από αξονική αγγειογραφία θώρακος (n = 2700) (95% UL, 1300-5000). Το ένα τρίτο των προβλεπόμενων καρκίνων οφείλονταν σε σαρώσεις που έγιναν σε



Εικόνα 2: Εκτιμώμενος αριθμός αξονικών τομογραφιών (CT) που πραγματοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2007, ανάλογα με το φύλο και την ηλικία και την έκθεση.

Πηγή: (Berrington, και συν., 2009)



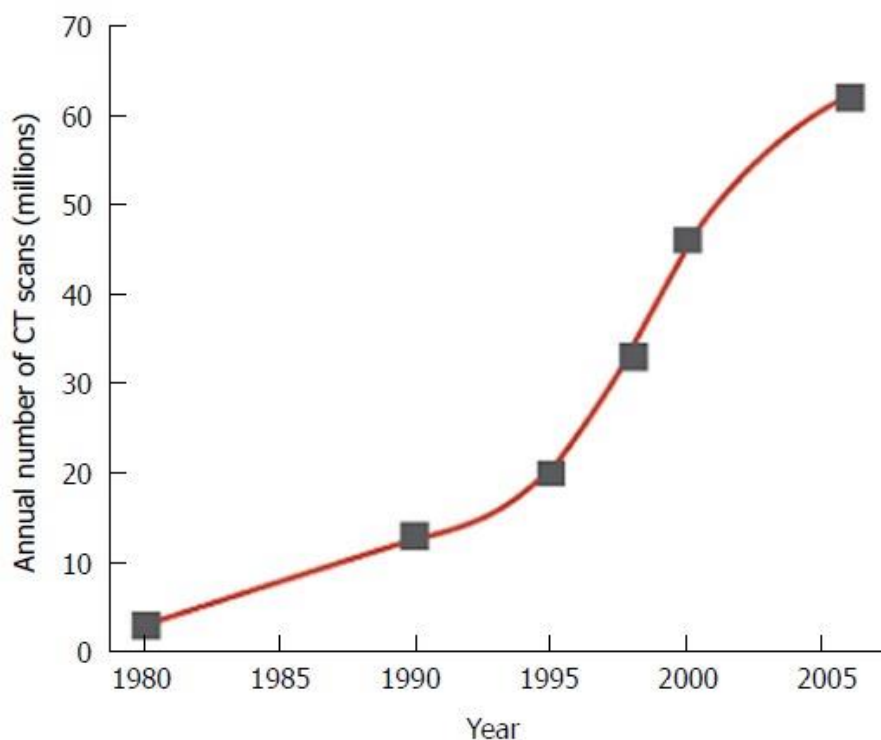
Εικόνα 3: Προβλεπόμενος αριθμός μελλοντικών καρκίνων (μέσος όρος και όρια αβεβαιότητας 95%) που θα μπορούσαν να σχετίζονται με τη χρήση αξονικής τομογραφίας στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2007, ανάλογα με την ηλικία κατά την έκθεση.

Πηγή: (Berrington, και συν., 2009)

ηλικίες 35 έως 54 ετών σε σύγκριση με το 15% που οφείλονταν σε σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ηλικίες μικρότερες των 18 ετών και το 66% ήταν σε γυναίκες.

Μελέτη που έγινε στις ΗΠΑ κατέληξε πως η αξονική τομογραφία αν και αποτελεί περίπου το 11% των εξετάσεων που βασίζονται στη χρήση ακτίνων-X, είναι υπεύθυνη για το 73% περίπου της συνολικής ακτινοβολίας που χορηγείται στους ασθενείς (Fazel, etal., 2009).

Σήμερα η αξονική τομογραφία αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή ακτινοβολίας για τους ανθρώπους εκτός της άμεσης έκθεσής τους σε αυτή (Mettler, Wiest, Locken, & Kelsey, 2000;20). Καθώς η τεχνική χρησιμοποιείται για κατά κόρον για απεικονιστικές εξετάσεις, η χρήση της από την ιατρική κοινότητα αυξήθηκε ραγδαία, και μαζί και οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν από τη χρήση της. (εικόνα 4)



Εικόνα 4: Ποσοστά αύξησης χρήσης της αξονικής τομογραφία σε διάστημα 25 ετών
Πηγή: (Power, Moloney, Twomey, James, O'Connor, & Maher, Computed tomography and patient risk: Facts, perceptions and uncertainties., 2016)

Η σύγχρονη τεχνολογία επέτρεψε την ελαχιστοποίηση των ρίσκων για ασθενείς και προσωπικό μέσα από τη χρήση μεθόδων όπως η παράλειψη των περιττών εικόνων στα άκρα των ληφθέντων σειρών, η ελαχιστοποίηση του αριθμού των φάσεων σάρωσης και η χρήση αυτοματοποιημένου ελέγχου έκθεσης, καθώς και νέες

τεχνικές ανακατασκευής της εικόνας. Όλα τα παραπάνω επιτρέπουν την όσο το δυνατό μικρότερη έκθεση του ασθενή στην ακτινοβολία στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της μεθόδου.

Ιστορική αναδρομή

A. Τα πρώτα βήματα: 1921-1970

Η λέξη τομογραφία που επικράτησε παγκοσμίως, είναι σύνθετη και προέρχεται από τις δύο ελληνικές λέξεις «τόμος» (τομή) και «γραφή» (σχέδιο). Η ανακάλυψη της τομογραφίας έχει μία περίεργη ιστορία: Δέκα διαφορετικοί φορείς και επιστήμονες χωρίς καμία σχέση μεταξύ τους, συνέλαβαν την ιδέα κατασκευής ενός τομογράφου και προσπάθησαν να την υλοποιήσουν.

Πιο συγκεκριμένα, ο Γάλλος Andre Edmond Marie Bocage στις 13 Φεβρουαρίου του 1922 κατοχύρωσε για πρώτη φορά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την έννοια της τομογραφίας. Ήδη από το 1917, όταν υπηρετούσε στο ακτινολογικό τμήμα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} Παγκόσμιου Πολέμου, συνέλαβε την ιδέα της «τομικής ακτινογραφίας» (sectional radiography), την οποία και τελειοποίησε κατά την διάρκεια της ειδικότητάς του στο Salperiere Hospital του Παρισιού. Στην πατέντα του αναφέρεται πώς η ταυτόχρονη και συγχρονισμένη μετακίνηση μίας πηγής ακτίνων-X και ενός ανιχνευτή, θα είχε ως αποτέλεσμα μία θολή τομογραφία. Ο προαναφερόμενος δεν κατασκεύασε ποτέ τομογράφο, αλλά ο Ολλανδός Bernard Zeidses des Plantes το έκανε, περιγράφοντας την εργασία του στη διδακτορική του διατριβή. Η κατασκευή του τομογράφου ξεκίνησε το 1921 και το πρωτότυπο παρουσιάστηκε δέκα χρόνια αργότερα όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Ο Bernard George Zeidses des Plantes (1902-1993) ήταν ειδικός στις νευρικές παθήσεις, αλλά το πάθος του ήταν να βελτιώσει την ακτινογραφία ζωντανών ιστών. Κατασκεύασε το πρώτο μηχάνημα για πλανιγραφία, (πρόδρομη διαδικασία της αξονικής τομογραφίας) στο οποίο η λυχνία ακτίνων X και το φιλμ κινούνταν μαζί γύρω από το επίπεδο ενδιαφέροντος. Σχεδίασε επίσης μέθοδο αφαίρεσης για τη βελτίωση των εικόνων μετά την έγχυση σκιαγραφικών παραγόντων.

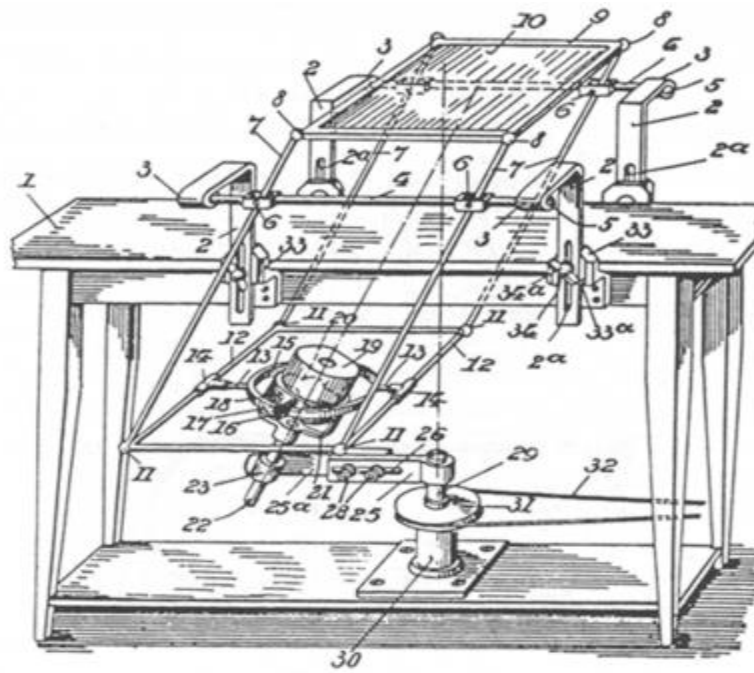
Άλλοι δύο Γάλλοι, ο Felix Portes και ο Maurice O Chausse κατοχύρωσαν επίσης πατέντα για την τομογραφία το 1921 και σχεδίασαν εργαστηριακά και τον τρόπο

εφαρμογής της. Ένας Γερμανός μηχανικός, ο Ernst Rohl, κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη συσκευή το 1927. Η συσκευή του Rohl ονομαζόταν «πλανιγραφία», (planigraphy) επειδή η πλάκα ακτίνων X παρέμεινε παράλληλη με το θέμα και η λυχνία ακτίνων X άλλαζε γωνία, προκειμένου να καλύψει το πεδίο ενδιαφέροντος, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



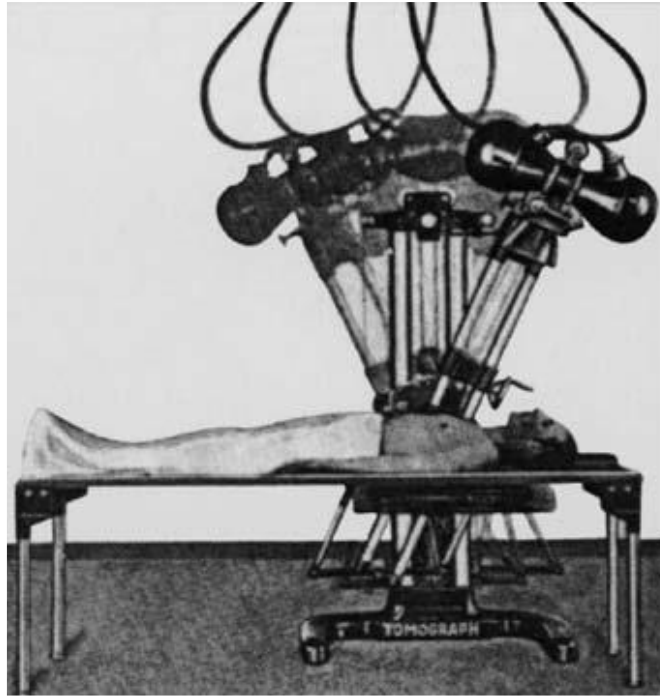
Εικόνα 5: Πρότυπο αξονικού τομογράφου του Bernard Zeidses des Plantes

Πηγή: (Buzzi & Suárez, 2013)



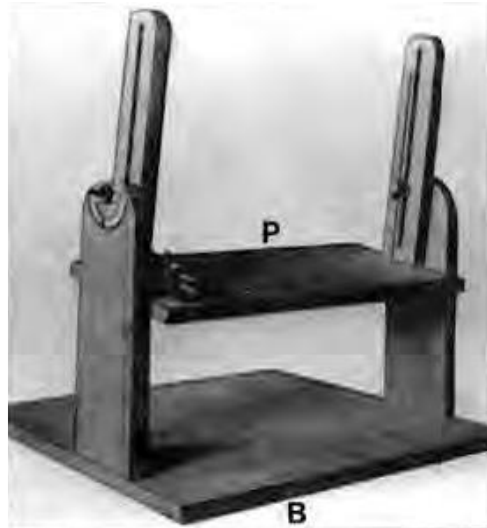
Εικόνα 6: Σχεδιάγραμμα της συσκευής Pohl. Πηγή: (link www.researchgate.net/)

Ο German Gustave Grossmann ήταν αυτός που κατασκεύασε τον πρώτο εμπορικό τομογράφο μέσω της εταιρείας Siemens-Reiniger-Veifa GmbH το 1934. Ο "τομογράφος Grossmann" έγινε ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος -αλλά πολύ ακριβός- εξοπλισμός στα τέλη του 1930. Ένας τέτοιο μηχάνημα διασώζεται στο Μουσείο Επιστημών του Λονδίνου. Ο τομογράφος Grossmann ήταν σε θέση να απεικονίσει μία μόνο τομή του σώματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.



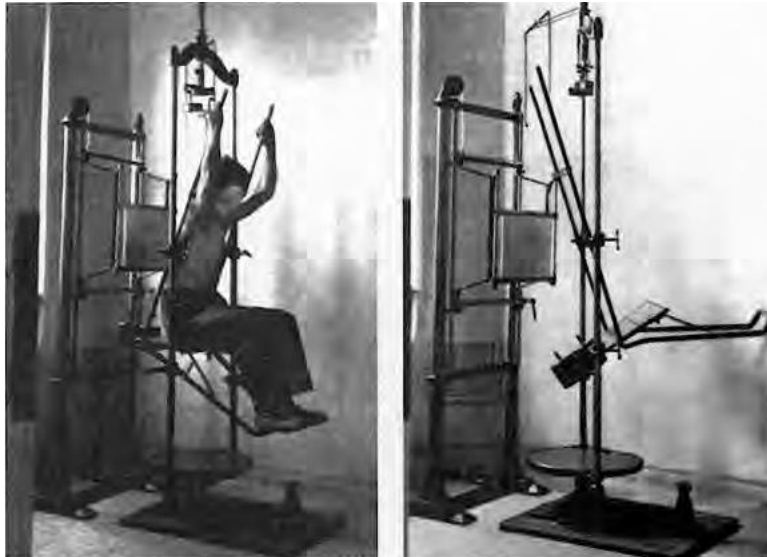
Εικόνα 7: Ο πρώτος τομογράφος του Grossmann. Πηγή: ([link www.scieho.org.ar/](http://link.wws.scieho.org.ar/))

Εν τω μεταξύ, στην Ιταλία ο ιταλός ακτινολόγος Alessandro Vallebona (1899-1987) διευθυντής του Ινστιτούτου Ραδιολογίας στο Πανεπιστήμιο της Γενοβας, το 1930 δημοσίευσε μία πρόδρομη μορφή τομογραφίας, την οποία ονόμασε «εγκάρσια αξονική στρωματογραφία» και κατασκεύασε ένα υπόδειγμα. Οι εικόνες που προέκυψαν από το υπόδειγμα παρουσιάστηκαν στο Τορίνο στο 9^ο Συνέδριο Ραδιολογίας το Μάιο του 1930. Ο Vallebona σχεδίασε μία συσκευή που είχε μια πηγή ακτίνων X και ένα φιλμ, τα οποία παρέμεναν στατικά, ενώ μετακινούνταν μόνο το αντικείμενο. Το φιλμ ήταν τοποθετημένο στη βάση και το αντικείμενο στην πλατφόρμα, η οποία κατά τη διάρκεια της εξέτασης δονούνταν. Η σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Το πρότυπο Vallebona, Πηγή: (Littleton&Durizch)

Η συσκευή του Vallebona δεν χρησιμοποιήθηκε σε ζωντανούς ασθενείς, αλλά μόνο ως υπόδειγμα για μελλοντική χρήση και έλεγχο των υποθέσεων του. Ως αντικείμενο απεικόνισης ο Vallebona αρχικά επέλεξε ένα κρανίο. Το 1933 ο ίδιος κατασκεύασε υπόδειγμα για χρήση σε ασθενείς. Με τη συσκευή προσπάθησε να εξάγει στεφανιαίες τομές. Αυτό που κατάφερε ήταν να εξάγει μία ελαφρώς κυρτή και όχι επίπεδη τομή, κάτι που ο ίδιος αργότερα διόρθωσε. Στην περιγραφή του κάνει λόγο για πολυκατευθυντική κίνηση του ασθενούς : Ο ασθενής καθόταν σε ένα αρθρωτό κάθισμα που ήταν προσαρτημένο μπροστά από ράβδους, και κινούταν. Τα πόδια του ασθενούς πίεζαν μία πλατφόρμα, έτσι ώστε το στήθος να μετακινείται εμπρός-πίσω. Η δεύτερη κίνηση γινόταν ταυτόχρονα με περιστροφή της πλατφόρμας του ασθενούς σε κυκλική κατεύθυνση μέσω ενός τόξου 30 μοιρών. Το φιλμ βρισκόταν πίσω από τον ασθενή και περιστρεφόταν σε ένα πλάγιο τόξο 30 μοιρών. Η λυχνία των ακτίνων X παρέμενε ακίνητη, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Η πρώτη τομογραφία του ερευνητή αφορούσε σε θώρακα ασθενούς. Αν και το πείραμα δεν ήταν πετυχημένο, ωστόσο αποτέλεσε το έναυσμα για πιο εκτεταμένες μελέτες.



Εικόνα 9: Το δεύτερο πρότυπο του Vallebona, Πηγή: (Littleton & Durizch)

Η πρώτη τομογραφία στις ΗΠΑ έγινε το 1937 από τον Robert Andrews, κάτι που ωστόσο αμφισβήτησε ο Jean Kieffer, ο οποίος και ισχυρίστηκε ότι είχε εφεύρει το μηχάνημα στις ΗΠΑ ήδη από το 1929. Ο Andrews στη διδακτορική του διατριβή παρουσίασε το σύνολο των ερευνών που έγιναν στον ευρωπαϊκό χώρο σχετικά με την ανάπτυξη του τομογράφου και, παράλληλα, σε συνεργασία με τον Stava κατασκεύασαν ένα πρωτότυπο με βάση αυτό του Grossmann με γραμμική κίνηση, το οποίο ποτέ δεν διακινήθηκε εμπορικά.

Η τομογραφία έφτασε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1937, όταν ο Edward Wing Twining κατασκεύασε ένα υπόδειγμα συσκευής. Ο William Watson το 1937 κατοχύρωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την αξονική εγκάρσια τομογραφία στο Ηνωμένο Βασίλειο και πήρε τις πρώτες εικόνες. Στην αξονική εγκάρσια τομογραφία πραγματοποιούνταν διατομές κάθετες στον μακρύ άξονα του σώματος, κάτι που ισχύει και στη σημερινή υπολογιστική τομογραφία. Η συσκευή που κατασκεύασε ο Watson αποτελούνταν από δύο ταυτόχρονα κινούμενες περιστροφικές πλάκες: μία κατακόρυφη για τον ασθενή και μία οριζόντια για το φιλμ. Η λυχνία των ακτίνων-X παρέμενε ακίνητος. Ο Watson ονόμασε τη συσκευή του σεκτογράφο (sectograph), όπως φαίνεται στην εικόνα 10.

Οι έρευνες σχετικά με τις απεικονιστικές δυνατότητες ενός τομογράφου συνεχίστηκαν αδιάκοπα τα επόμενα χρόνια σε διαφορετικές χώρες και ερευνητικά ιδρύματα, και από πληθώρα ανεξάρτητων ερευνητών. Με βάση τα πορίσματα των

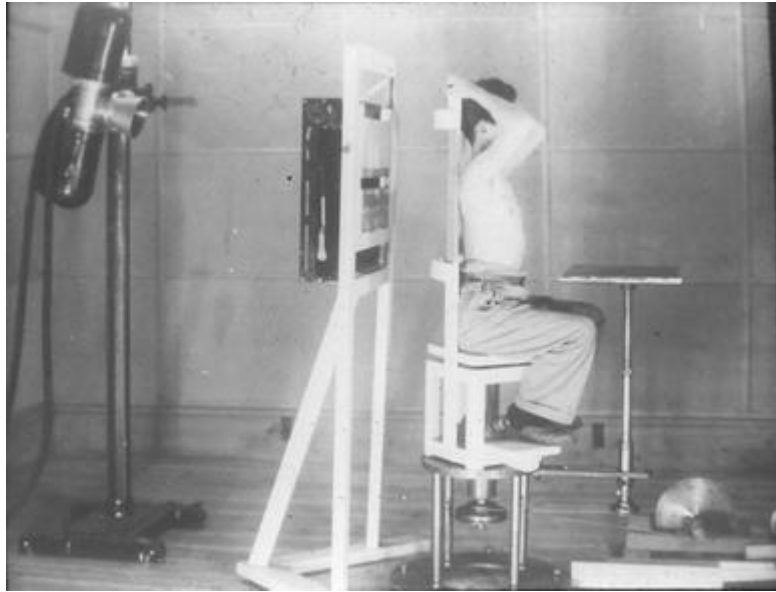
μέχρι τότε ερευνών, η ιδέα κατασκευής ενός σύγχρονου αποτελεσματικού τομογράφου, κέρδιζε συνεχώς έδαφος.



Εικόνα 10: Η συσκευή Watson, Πηγή: (Littleton & Durizch)

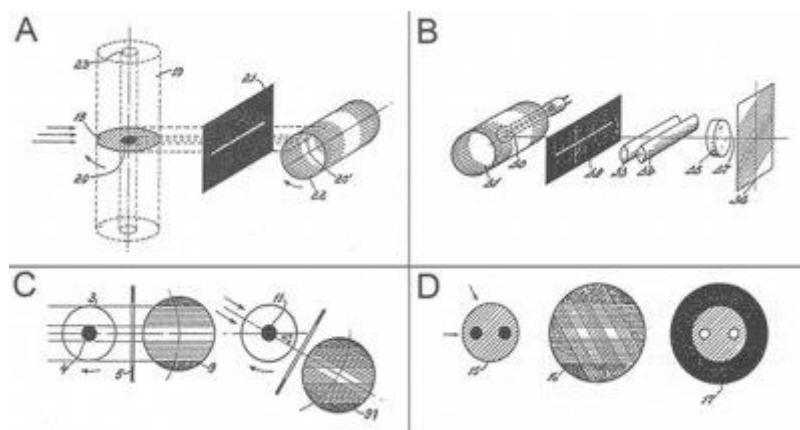
Ο Ιάπωνας ακτινολόγος Shinji Takahashi ανέπτυξε τη δεκαετία του 1940 αυτό που τότε ονομαζόταν «ακτινογραφία περιστροφής» (rotation radiography) μία κατάσταση πρόδρομη της σημερινής αξονικής τομογραφίας. Ο όρος «ακτινογραφία περιστροφής» χρησιμοποιήθηκε επειδή η λυχνία ακτίνων X και το φιλμ περιστρέφονταν γύρω από το εξεταζόμενο θέμα. Μερικά χρόνια αργότερα ο ίδιος βελτίωσε τη συσκευή του και το Μάιο του 1950 η ακτινογραφία περιστροφής εφαρμόστηκε στην πραγματική ιατρική πρακτική (Doi, Morita, & Sakuma, 2012), όπως φαίνεται στην εικόνα 11.

Ο Gabriel Frank το 1940 κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μια μέθοδο προβολής και ανακατασκευής εικόνων παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στο σύγχρονο αξονικό τομογράφο: Η εικόνα διατομής ενός οργάνου παραγόταν με τη βοήθεια ενός συμπαγούς πύρου που στεκόταν κάθετα σε ένα κύλινδρο χαμηλής πυκνότητας. Η δέσμη ακτίνων-X ξεκινούσε από τα αριστερά και ευθυγραμμίζονταν έτσι ώστε να χτυπούν με μια μόνο ακτίνα πάνω σε ένα τύμπανο. Το τύμπανο περιστρεφόταν στο μακρύ άξονά του μερικές μοίρες, και μια γραμμή καταγραφόταν, όπως φαίνεται στην εικόνα 12.



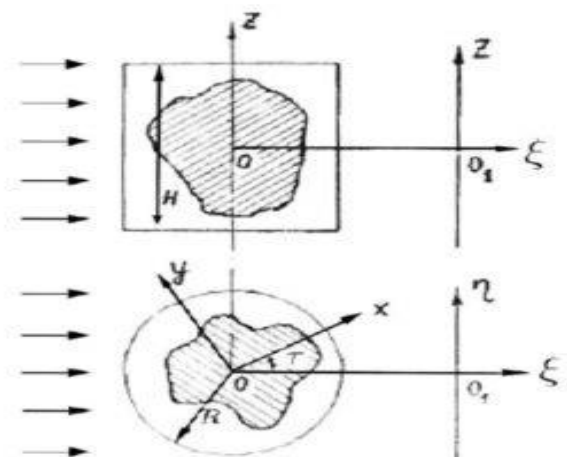
Εικόνα 11: Η συσκευή Takahashi. Πηγή: (Doi, Morita, & Sakuma, 2012)

Στη συνέχεια η εικόνα ανακατασκευαζόταν. Με μια πηγή φωτός στο κέντρο του τυμπάνου, κάθε γραμμή προβαλλόταν μέσω μιας πλάκας ευθυγράμμισης και στη συνέχεια χτυπούσε μια μεμβράνη. Οι ανακατασκευές συναρμολογούνταν στο φιλμ γραμμή προς γραμμή για να ολοκληρώσουν τη διαδικασία οπίσθιας προβολής που κατασκευάζει την εικόνα. Εφαρμόζοντας αυτή τη διαδικασία, ο ερευνητής κατάφερε να δημιουργήσει θολές τομές ενός οργάνου (Filler, 2009).



Εικόνα 12: Το σχέδια παραγωγής και ανακατασκευής εικόνων- τομών Frank. Πηγή: (Filler, 2009)

Ο αξονικός τομογράφος με ιατρική εφαρμογή σχεδιάστηκε στο Κίεβο το 1957 και ήταν έργο του Ουκρανού μηχανολόγου Tetelbaum. Το 1956 ο Tetelbaum δημοσίευσε ένα άρθρο με τίτλο «Σχετικά με το πρόβλημα της βελτίωσης των εικόνων που λαμβάνονται με τη βοήθεια οπτικών και αναλογικών οργάνων» στο Δελτίο του Πολυτεχνικού Ινστιτούτου του Κιέβου (Tetelbaum, 1957). Το επόμενο έτος ακολούθησε ένα άλλο άρθρο του στο ίδιο περιοδικό, με τίτλο «Σχετικά με μια μέθοδο λήψης ογκομετρικών εικόνων με μέσα ακτινοβολίας». Το 1958 οι Korenblum, Tetelbaum και Tyutin δημοσίευσαν ένα άρθρο με τίτλο «Περί Σχήματος Τομογραφίας» στα Πρακτικά Ανώτατων Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων – Ραδιοφυσική, (εικόνα 13). Οι προαναφερόμενοι δε στάθηκε δυνατό να υλοποιήσουν την κατασκευή, καθώς ο αιφνίδιος θάνατος του Tetelbaum έδωσε τέλος στο έργο.

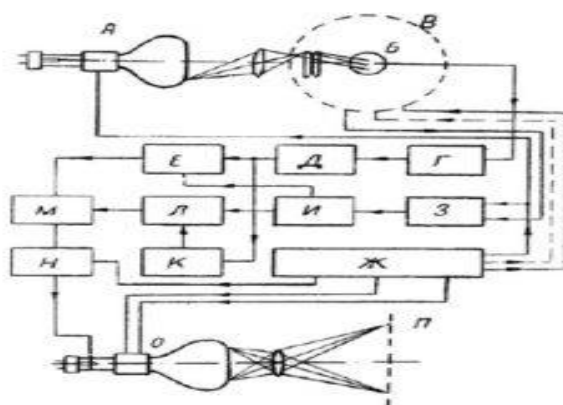


Εικόνα 13: Σχεδιάγραμμα από τη δημοσίευση του Tetelbaum

Πηγή: (Koehler, 2022)

Τα άρθρα των παραπάνω, καθώς αντιμετώπιζαν το πρόβλημα της γλώσσας (ρωσικά) παρέμειναν άγνωστα στον δυτικό κόσμο, έως ότου οι Harrison H. Barrett (Τμήμα Κέντρου Ακτινολογίας και Οπτικών Επιστημών) και William G. Hawkins (Τμήμα Μαθηματικών) δημοσίευσαν το «Ιστορικό Σημείωμα για την Υπολογιστική Τομογραφία» το 1983. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ο Tetelbaum διατύπωσε το πρόβλημα της τομογραφίας ως προς τα ολοκληρώματα γραμμής και βρήκε την ακριβή λύση σε σχέση με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Radon. Επιπλέον, στην εργασία τους οι Ουκρανοί επιστήμονες παρουσίασαν ένα διάγραμμα αναλογικού υπολογιστικού συστήματος (εικόνα 14) που βασίζεται στην τηλεόραση και

υπολόγισαν ότι το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να ανακατασκευάσει μια εικόνα 100 x 100 σε πέντε λεπτά» (Koehler, 2022).



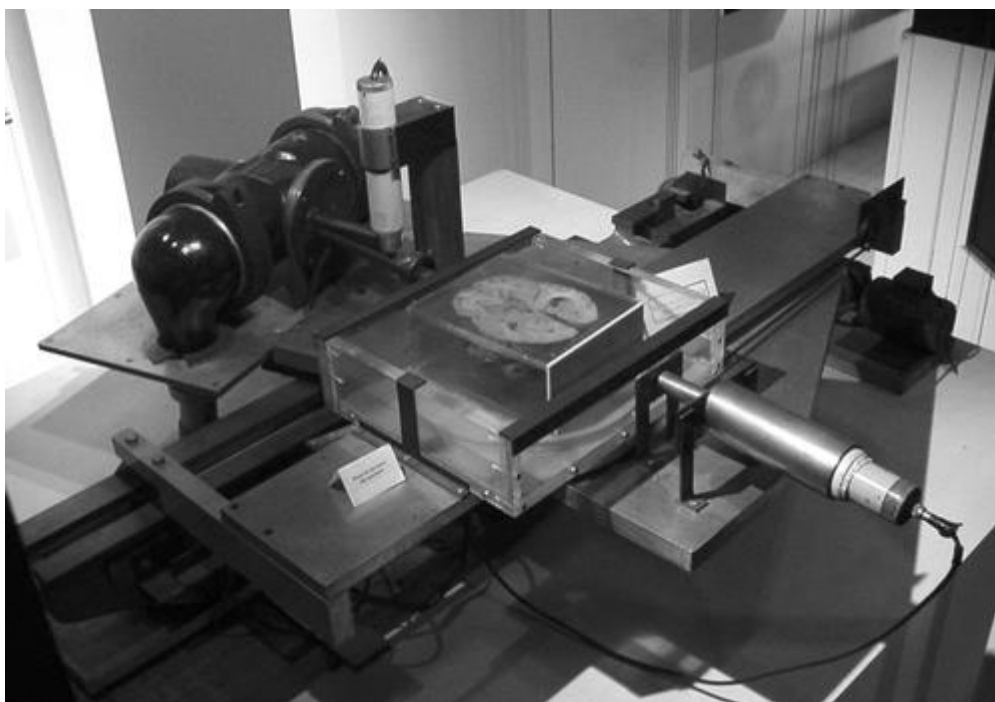
Εικόνα 14: Λειτουργικό διάγραμμα της υπολογιστικής συσκευής που βασίζεται στην τηλεόραση του Tetelbaum, Πηγή: (Koehler, 2022)

Γενικότερα, μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο η απεικονιστική με χρήση ακτίνων Χ σημείωσε τεράστια πρόοδο. Ένα σημαντικό ορόσημο προς αυτή την κατεύθυνση ήταν η ανάπτυξη της εγκάρσιας αξονικής τομογραφίας (Computed Axial Tomography - CAT). Αυτή η τεχνική αιχμής άνοιξε το δρόμο και για άλλες σύγχρονες διαγνωστικές απεικονίσεις, όπως η μαγνητική τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging - MRI). Και οι δύο τεχνικές προήλθαν από την έρευνα του Oldendorf το 1960 για την ισοτροπική σάρωση του εγκεφάλου και χρησιμοποιούνταν για τη μη επεμβατική λήψη λεπτομερών εσωτερικών εικόνων. Αυτές οι εικόνες επέτρεψαν σε επιστήμονες και γιατρούς να αναγνωρίζουν και να παρατηρούν ασθένειες και να παρέχουν πιο ακριβείς θεραπείες για τους ασθενείς. Ο Δρ William Oldendorf υπηρέτούσε ως νευρολόγος στον Αμερικανικό στρατό και θεωρείται από ορισμένους ως ο πραγματικός πατέρας της νευροαπεικόνισης.

Μέχρι και το 1960 έγιναν πολλές προσπάθειες σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, τα οποία ανέπτυξαν «τεχνικές «τομογραφίας» που δημιουργούσαν εικόνες συγκεκριμένων διατομών ή «φετών» του σώματος με ακτινοβολία ακτίνων Χ γύρω από το σώμα του ασθενή. Δυστυχώς οι υψηλές δόσεις ακτινοβολίας συχνά είχαν επιπτώσεις ή οδηγούσαν ακόμη και σε θάνατο του ασθενή. Επιπλέον, δε μπορούσαν να απαλείψουν το «θόρυβο» που δημιουργούσαν υπερκείμενοι με το εξεταζόμενο

όργανο ιστοί. Έτσι, όγκοι και υγιείς ιστοί - ιδιαίτερα στην περιοχή του κρανίου - δεν μπορούσαν να διακριθούν εύκολα.

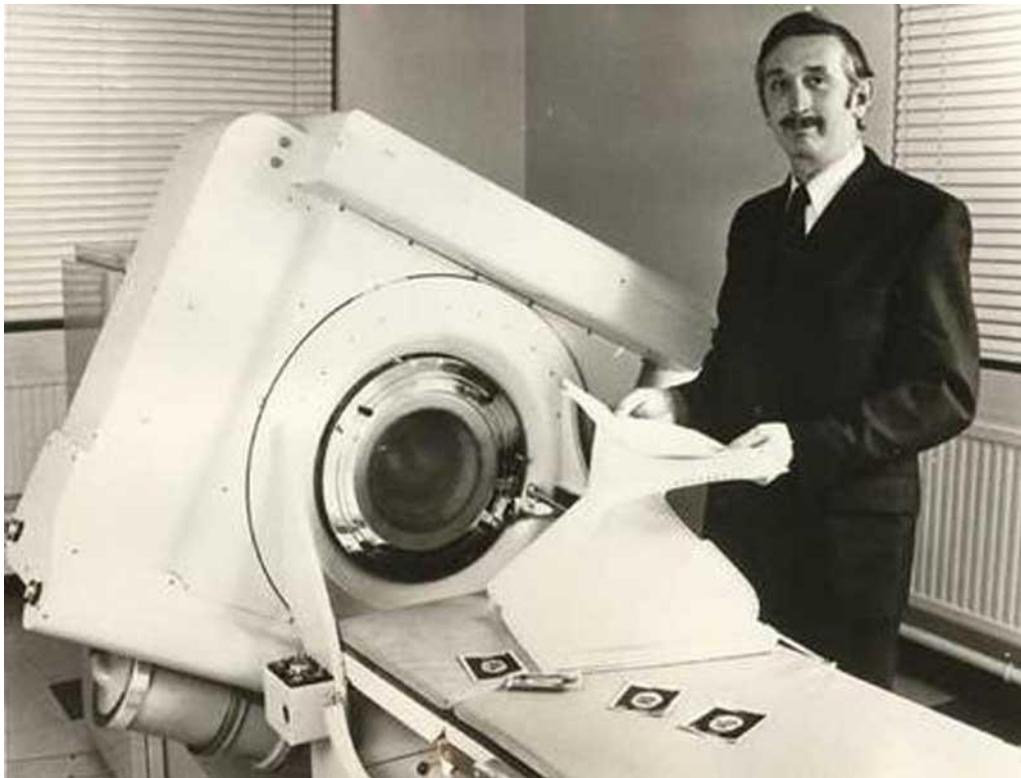
Ο πρώτος αξονικός τομογράφος - κρεβάτι δημιουργήθηκε με εξαρτήματα από ένα τόρνο. Χρειάστηκαν εννέα ημέρες για να ολοκληρωθεί μια σάρωση και 2,5 ώρες χρόνος στον υπολογιστή. Ως αρχική πηγή ενέργειας χρησιμοποιήθηκε μία πηγή ακτινοβολίας γάμμα, το Americium 95, και ένας μετρητής φωτονίων ως ανιχνευτής. Ενώ αυτή η διάταξη ήταν χρήσιμη για εικονικές δοκιμές επί σταθερών αντικειμένων, οι σαρώσεις πτωμάτων ήταν δύσκολες λόγω της σημειούμενης αποσύνθεσης. Αργότερα με τη χρήση της λυχνίας ακτίνων X, ο χρόνος σάρωσης μειώθηκε στις 9 ώρες, καθιστώντας εφικτή και τη μελέτη ανθρώπινων πτωμάτων (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Ο πρώτος αξονικός τομογράφος. Πηγή: (Beckmann, 2014).

B. Οι μεγάλες εξελίξεις: 1970 -1990

Η πρώτη τομογραφία (CT) παρουσιάστηκε το 1971 και από το 1972 ήταν διαθέσιμη και εμπορικά. Ο πρώτος τομογράφος δημιουργήθηκε από τους Άγγλους Hounsfield³ και Cormack οι οποίοι μερικά χρόνια αργότερα, το 1979 τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ για τη συνεισφορά τους στην πρόοδο της ιατρικής επιστήμης, (Εικόνα 16).

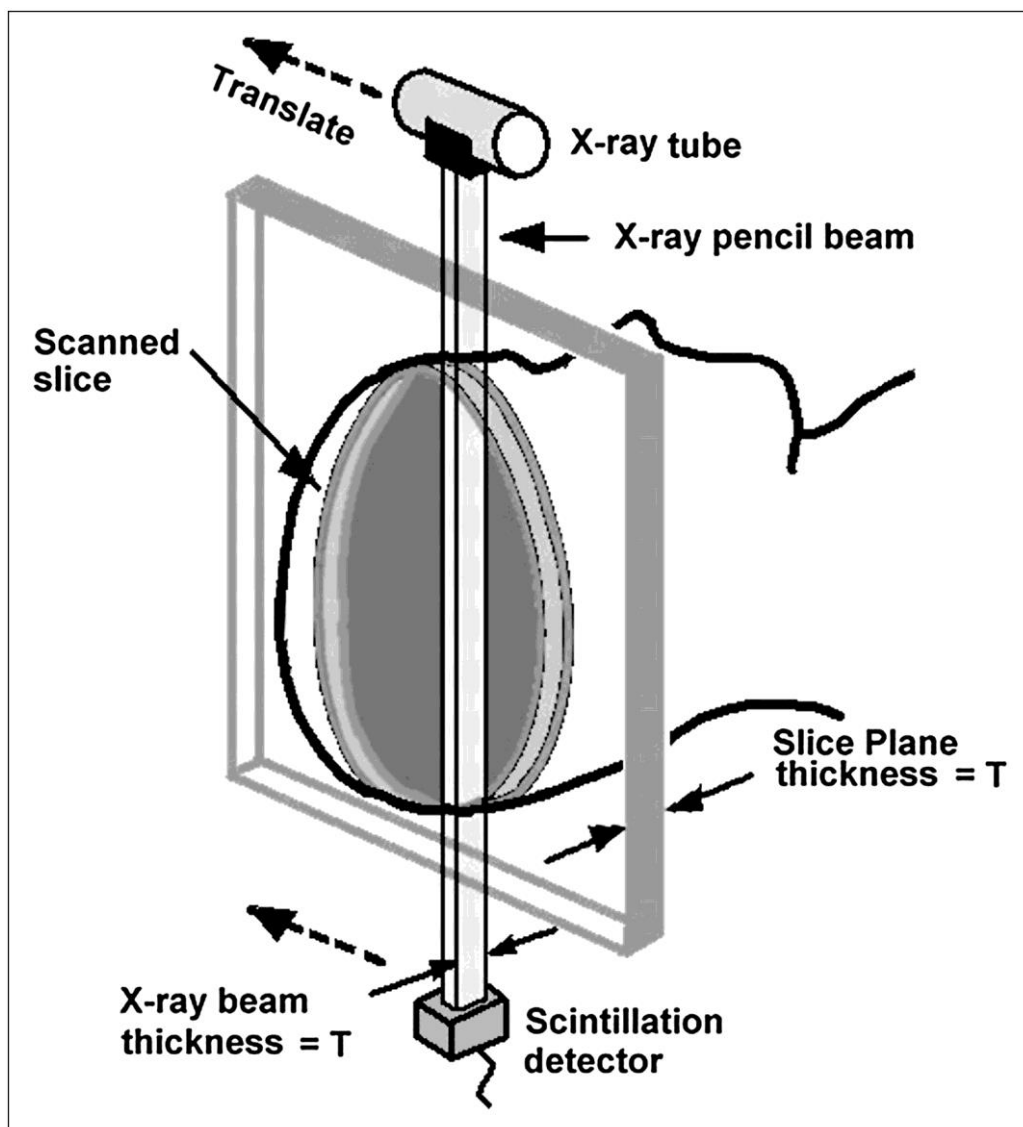


Εικόνα 16: Ο πρώτος εμπορικός αξονικός τομογράφος και ο δημιουργός του Hounsfield Godfrey

Πηγή: (catalina imaging online at: <https://catalinaimaging.com/history-ct-scan/>)

³ Από το 1949 και σε ηλικία 30 ετών ο ερευνητής απασχολούνταν στην Electric and Musical Industries (EMI). Είχε πάθος να κατανοεί τις βασικές αρχές των τεχνολογιών και εργαζόταν στα ραντάρ κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκόσμιου Πολέμου. Στα πρώτα του χρόνια στην EMI, συνέχισε να εργάζεται σε συστήματα ραντάρ και τις οθόνες τους. Χρόνια αργότερα, ηγήθηκε της ομάδας σχεδιασμού που ανέπτυξε τον πρώτο υπολογιστή γενικής χρήσης όλων των τρανζίστορ του Ηνωμένου Βασιλείου, τον EMIDEC 1100. Το μηχανολογικό του υπόβαθρο αποδείχθηκε απαραίτητο στη θεμελιώδη επιτυχία του στην ιατρική. Γρήγορα έστρεψε την προσοχή του στον εντοπισμό και στην αναγνώριση προτύπων και γενικότερα στη μελέτη και στην ανάκτηση πληροφοριών. Ενώ μελετούσε, παρατήρησε ότι υπήρχαν πολλές περιπτώσεις όπου θα μπορούσαν να υπάρχουν πληροφορίες ικανές να ερμηνεύσουν διαφορετικές μορφές δεδομένων με μικρή απώλεια. Για παράδειγμα, εάν γινόταν ακριβής μέτρηση απορρόφησης ακτίνων Χ από όλες τις γωνίες μέσω ενός κλειστού κουτιού, οι πληροφορίες που λαμβάνονταν θα μπορούσαν να υποβληθούν σε επεξεργασία από έναν υπολογιστή, ώστε να αποκαλυφθούν τα περιεχόμενα του κουτιού τρισδιάστατα. Αυτό ήταν το πρώτο κρίσιμο βήμα που οδήγησε στην εμφάνιση του πρώτου αξονικού τομογράφου.

Ο Hounsfield φαντάστηκε ότι ένα αντικείμενο θα μπορούσε να σαρωθεί σε «εγκάρσιες φέτες». Η δέσμη ακτίνων X που θα χρησιμοποιούνταν μπορούσε να ευθυγραμμιστεί και να στενέψει, ώστε να έχει το πλάτος ενός μολυβιού. Το μήκος της παραγόμενης δέσμης ήταν 3 mm εντός του επιπέδου της φέτας με 13 mm πλάτος κάθετα στη φέτα. Στην πραγματικότητα το πλάτος δέσμης ήταν αυτό που τυπικά καθόριζε το πάχος της απεικονιζόμενης τομής. Η λυχνία ακτίνων X ήταν άκαμπτα συνδεδεμένη με έναν ανιχνευτή ακτίνων X που βρισκόταν στην άλλη πλευρά του αντικείμενου. Μαζί, η λυχνία και ο ανιχνευτής σάρωναν το αντικείμενο, περνώντας τη στενή δέσμη ακτίνων X μέσα από τη φέτα, όπως φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17: Διάταξη πρώτου αξονικού τομογράφου. Πηγή: (Goldman, 2007)

Η πρώτη στα παγκόσμια χρονικά αξονική τομογραφία διενεργήθηκε σε μεσήλικα ασθενή γένους θηλυκού⁴ και αφορούσε σε απεικόνιση του εγκεφάλου. (AmbroseJ. , 1996), όπως φαίνεται στην εικόνα 18.

Σε αυτή την πρώτη τομογραφία τοποθετήθηκε στο κεφάλι της ασθενούς ένα κάλυμμα καουτσούκ που περιβαλλόταν από ένα κουτί με νερό, το οποίο περιστρεφόταν κατά 1 μοίρα κάθε φορά, μέχρι και τις 180 μοίρες.

Στους επτά επόμενους μήνες η μέθοδος εφαρμόστηκε σε 69 ακόμα ασθενείς. Τα αποτελέσματα των πρώτων αξονικών τομογραφιών εγκεφάλου παρουσιάστηκαν στο συνέδριο του Βρετανικού Ινστιτούτου Ραδιολογίας τον Απρίλιο του 1972 (Ambrose&Hounsfield, 1973).

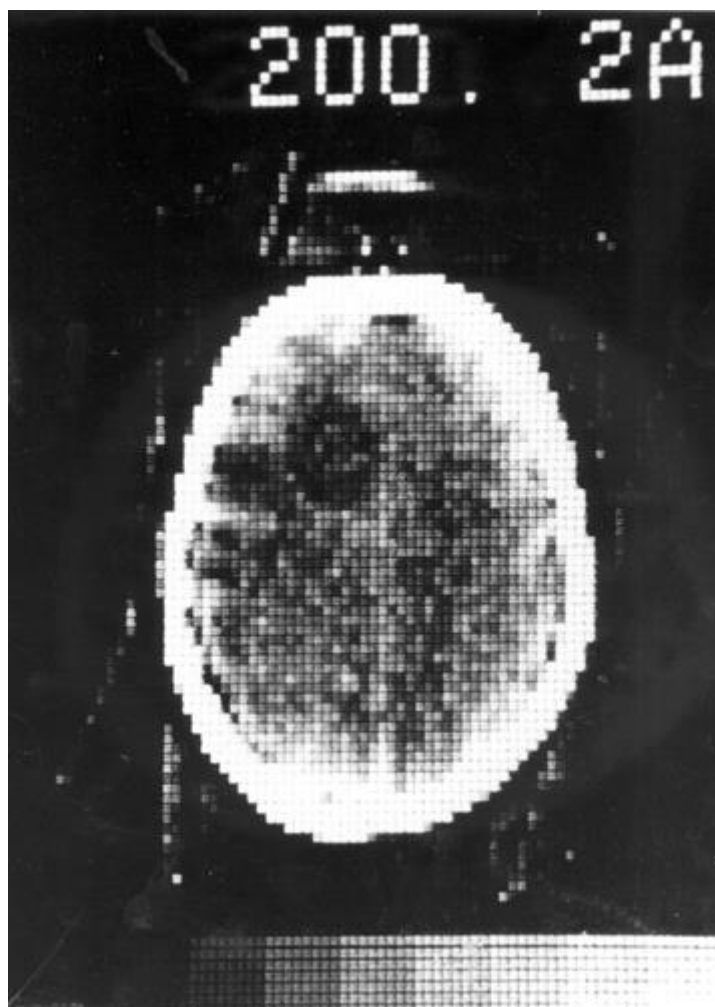
Και ενώ οι πρώτες τομογραφίες αφορούσαν αποκλειστικά στον εγκέφαλο, τα επόμενα χρόνια η πρόοδος της επιστήμης στον τομέα των υπολογιστών καθώς και των ίδιων των μηχανημάτων, έκανε δυνατή την τομογραφία του συνόλου του ανθρώπινου σώματος.

Έτσι ξεκίνησε ένα νέο κεφάλαιο στην ιατρική απεικόνιση και τις διαγνωστικές διαδικασίες, με την δυνατότητα διενέργειας νέων ταχύτατων απεικονιστικών και λειτουργικών μεθόδων όπως αγγειογραφίες και εξετάσεις πυρηνικής ιατρικής. (Schulz, Stein, &Pelc, 2021)

Η πορεία ωστόσο προς την πρακτική αξιοποίηση των αξονικών τομογράφων δε θα ήταν δυνατή χωρίς την παράλληλη βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στην περίπτωση του πρώτου τομογράφου οι αρχικές εικόνες ανακατασκευάστηκαν σε ένα απομακρυσμένο υπολογιστή, με τα ακατέργαστα δεδομένα να μεταφέρονται χειροκίνητα και καταγεγραμμένα σε μαγνητικές ταινίες. Τα δε κατεργασμένα δεδομένα οργανώνονταν σε ταινία και σε στιγμιότυπα Polaroid.

Ο τεράστιος χρόνος για την περαίωση της διαδικασίας συντέλεσε αρχικά στο να θεωρηθεί δαπανηρή και όχι ελκυστική ιδέα. Η ανάπτυξη ωστόσο των ηλεκτρονικών υπολογιστών και ιδιαίτερα των ισχυρών μικροϋπολογιστών έκανε δυνατή τη βελτίωση της τεχνολογίας, τη μείωση του χρόνου εξέτασης και την αυτόματη ανάκτηση και επεξεργασία των δεδομένων.

⁴ Ήταν Οκτώβριος του 1971 Atkinson Morley Hospital του Λονδίνου και αφορούσε σε γυναίκα ασθενή με πιθανό όγκο στον πρόσθιο εγκεφαλικό λοβό. Με την εξέταση αποδείχθηκε πως πράγματι υπήρχε κυστικό αστροκύτωμα.



Εικόνα 18: Η πρώτη αξονική τομογραφία εγκεφάλου σε ζώσα ασθενή. 1^η Οκτωβρίου 1971,. Πηγή: (Beckmann, 2014)

Τα επόμενα χρόνια δεκαοχτώ κατασκευαστές σε παγκόσμιο επίπεδο ανταγωνίστηκαν για την κατασκευή του αρτιότερου τομογράφου και την κυριαρχία τους στην αγορά ιατρικού εξοπλισμού.⁵ (Robb, 2003).

Μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η τεχνική που χρησιμοποιούνταν στην απεικόνιση με αξονική τομογραφία ήταν αυτή των περασμένων δεκαετιών: Οι

⁵ Στο Μόναχο γύρω στο 1967, μια ομάδα επιστημόνων της Siemens που ήταν εξοικειωμένοι με την ιατρική απεικόνιση, άρχισε να μελετά την ικανότητα αυτής της μεθόδου για την εξέταση διατομών του ανθρώπινου σώματος, όπως θα μπορούσε κανείς να εξετάσει τις μεμονωμένες φέτες ενός ψωμιού. Αυτοί οι επιστήμονες υπέθεσαν ότι κάθε νέα ακτινογραφική τεχνική πρέπει να παράγει εικόνες με χωρική ανάλυση τουλάχιστον τόσο καλή όσο αυτή των εικόνων που παράγονται με την υπάρχουσα τεχνολογία που βασίζεται σε ακτίνες Χ. Έτσι, μια μήτρα τουλάχιστον 1.000 × 1.000 pixels θα ήταν απαραίτητη για την επίτευξη χωρικής ανάλυσης 0,5 mm σε μια σάρωση κεφαλής που αποκτάται με οπτικό πεδίο 30 × 30 cm. Με άλλα λόγια, θα έπρεπε να ληφθούν περίπου 1 εκατομμύριο ανεξάρτητες μετρήσεις μετάδοσης ακτίνων Χ- δηλαδή, 1.000 ξεχωριστές μετρήσεις σε όλο το κεφάλι προς μία κατεύθυνση, επαναλαμβανόμενες 1.000 φορές, κάθε φορά προς διαφορετική κατεύθυνση. Περισσότερα στο (Robb, 2003)

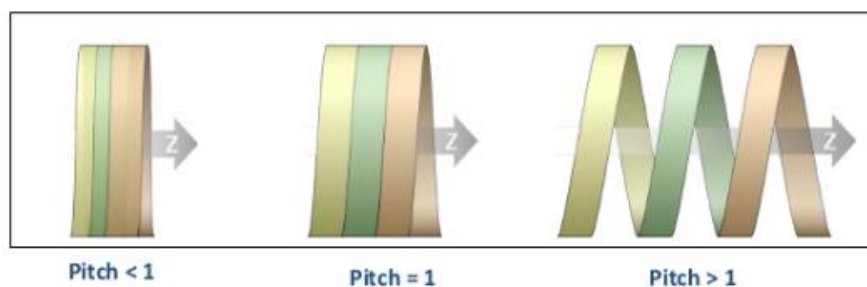
εικόνες λαμβάνονταν με εγκάρσιες τομές - φέτες με σταδιακή κίνηση του εξεταστικού τραπέζιού ακολουθούμενη από την κυκλική περιστροφή της λυχνίας ακτίνων X γύρω από τον ασθενή σε συγκεκριμένη διάταξη, ώστε να παραχθεί εικόνα. Η διαδικασία αν και συντομότερη εξακολουθούσε να είναι χρονοβόρα ενώ οι παραγόμενες εικόνες - φέτες ήταν σχετικά αδρές και ασυνεχείς. Από το 1990 και μετά η πρόοδος που συντελέστηκε τόσο στον τομέα της μείωσης της ακτινοβολίας όσο και σε αυτόν της απεικόνισης, ήταν μεγάλη και συνεχής.

Γ. Οι σύγχρονες εξελίξεις: 1990-σήμερα

Τα τελευταία τριάντα χρόνια οι βελτιώσεις στη λειτουργία των αξονικών τομογράφων ήταν σημαντικές. Οι τεχνολογικές εξελίξεις της διαδικασίας μπορούν να ταξινομηθούν χρονολογικά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες και αφορούν: α) στην ισοτροπική κάλυψη του όγκου (isotropic volume coverage), β) στη βελτιωμένη χρονική ανάλυση και γ) στις φασματικές πληροφορίες για την ταξινόμηση και διαφοροποίηση των υλικών.

Η αρχική ανάπτυξη της αξονικής τομογραφίας επικεντρώθηκε κυρίως στην παραγωγή εικόνων για ένα στατικό αντικείμενο. Η σάρωση ιστών με την τεχνική συγκράτησης αναπνοής έγινε δυνατή με την εισαγωγή της ελικοειδούς/σπειροειδούς σάρωσης και πρόσκτησης δεδομένων. Έτσι σε μία συγκράτηση αναπνοής λαμβάνονταν εικόνες από μεγάλο εύρος ιστού σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αργότερα, με την ισότροπη χωρική ανάλυση ολόκληρου του σώματος και με την εισαγωγή πολυτομικών αξονικών τομογράφων η πρόσκτηση των δεδομένων έγινε ακόμα πιο γρήγορη.

Το επόμενο βήμα της ανάπτυξης επικεντρώθηκε στη χρονική πτυχή της σάρωσης: «πάγωμα» της κίνησης του ασθενούς και λήψη δυναμικών πληροφοριών για μεγαλύτερα εύρη σάρωσης με ταχύτερη περιστροφή σκελετού. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν αξονικοί τομογράφοι δέσμης βεντάλιας (fan beam CT), διπλής πηγής (Dual-Source Computed Tomography - DSCT), με μεγαλύτερο ελικοειδές βήμα (pitch), όπως φαίνεται στην εικόνα 19 και προηγμένους αλγόριθμους ανακατασκευής και ανασύνθεσης. Με αυτά τα μέσα οι εξετάσεις αξονικής τομογραφίας έγιναν ταχύτερες καθώς δόθηκε η δυνατότητα διενέργειας νέων εξετάσεων που απαιτούσαν γρήγορες και πολλαπλές σαρώσεις (π.χ. αγγειογραφίες).



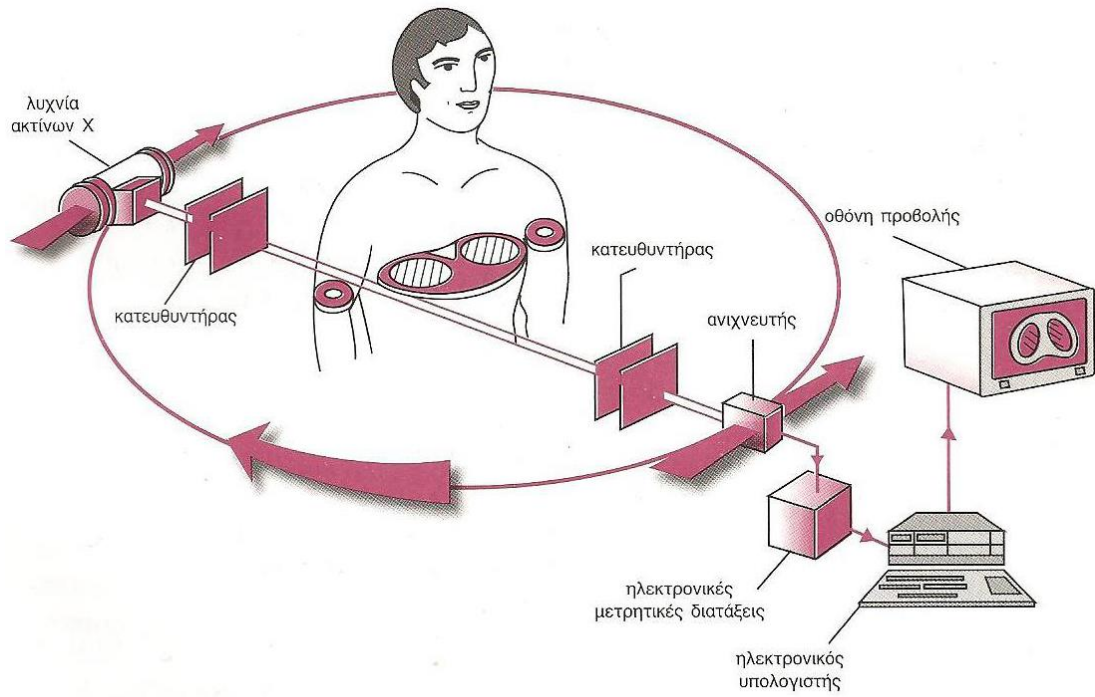
Εικόνα 19. Σχηματική αναπαράσταση του βήματος της έλικας (pitch) στους υπολογιστικούς τομογράφους με δυνατότητα ελικοειδούς σάρωσης . Πηγή:(Awda, 2019).

Το τρίτο βήμα της ανάπτυξης του τομογράφου ήταν να πάει «πίσω» από την καθαρή ανατομική απεικόνιση και να δώσει «χρώμα» στις εικόνες, αξιοποιώντας τις ανακτήσεις δεδομένων διπλής ή πολλαπλής ενέργειας. Αυτές οι λειτουργίες ανάκτησης και επεξεργασίας βασίζονται σε προηγούμενες εξελίξεις στην κατηγορία της ισοτροπικής κάλυψης όγκου και της βελτίωσης της χρονικής ανάλυσης. (Hsieh&Flohr, 2021). Η επιλογή ισοτροπικού voxel και το λεπτού πάχους των τομών έδωσε τη δυνατότητα ανασύνθεσης εικόνων υψηλής ποιότητας σε όλα τα επίπεδα.

Ο σημερινός σύγχρονος αξονικός τομογράφος αποτελείται από κάποια βασικά μέρη κοινά για το σύνολο σχεδόν των τομογράφων, ανεξάρτητα από τις ενδεχόμενες βελτιώσεις που έχουν γίνει. Τα μέρη αυτά είναι:

- Η λυχνία παραγωγής ακτίνων X
- Οι κατευθυντήρες
- Το ανιχνευτικό σύστημα
- Το σύστημα απόκτησης δεδομένων και ανακατασκευής των εικόνων
- Ένας H/Y για τον έλεγχο της διαδικασίας και παρουσίαση των ανακατασκευασμένων εικόνων
- Εξεταστική κλίνη

Σχηματικά ένας τομογράφος αναπαρίσταται στην την εικόνα 20.



Εικόνα 20: Διαδικασία σύγχρονης τομογραφίας, Πηγή: (Παντελής, 2021)

Οι γενιές των αξονικών τομογράφων

Η ταξινόμηση των υπολογιστικών τομογράφων γίνεται με βάση τη διάταξη των εξαρτημάτων και τη μηχανική κίνηση που απαιτείται για τη συλλογή δεδομένων. Ως γενιά θεωρείται η χρονολογική σειρά με την οποία ο αξονικός τομογράφος έχει εμφανιστεί. Η κάθε νέα γενιά στηρίζεται στα επιτεύγματα της προηγούμενης, τα οποία βελτιώνει τόσο όσο αφορά στη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία όσο και στο χρόνο, τρόπο και ποιότητα της παραγόμενης εικόνας.

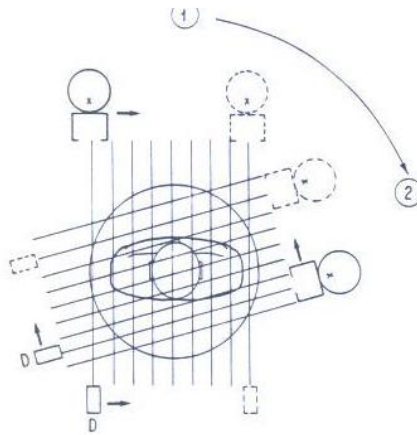
Γενικότερα η χρονολογική σειρά εμφάνισης νέων τύπων αξονικών τομογράφων περιγράφεται στον πίνακα 1 που ακολουθεί:

Γενιά	Χρόνος εμφάνισης	Λόγος εμφάνισης βελτιώσεις	Ανατομική περιοχή	Κίνηση Πηγής/ ανιχνευτή	Χρόνος δημιουργίας 1 εικόνας
1^η Γενιά	1971	απόκτηση εικόνων τομών	Κρανίο	Περιστροφή	5min
2^η Γενιά	1974	Ταχύτερη πρόσκτηση εικόνων	Κρανίο	Περιστροφή	20sec
3^η Γενιά	1975	Ταχύτερη πρόσκτηση εικόνων	Σύνολο οργάνων	Περιστροφή Περιστροφή	2sec
4^η Γενιά	1976	Εικόνες χωρίς δαχτυλίδι (ring artifact)	Σύνολο Οργάνων	Περιστροφή Σταθερός	1sec
5^η Γενιά	1980	Ταχύτατη αξονική καρδιάς	Μόνο καρδιά	Σταθερός Σταθερός	50 ms

Πίνακας 1. Γενιές αξονικών τομογράφων, χρόνος εμφάνισής τους με την ανάλογη κίνηση πηγής ανιχνευτή και τον χρόνο δημιουργίας εικόνας.

A. Η πρώτη γενιά αξονικών τομογράφων

Στους αξονικούς τομογράφους πρώτης γενιάς υπήρχε μία πηγή και ένας ανιχνευτής ακτίνων X. Για να ληφθεί μια εγκάρσια εικόνα του ασθενούς, μια δέσμη ακτίνων-X διαπερνούσε το σώμα του και οι πληροφορίες καταγράφονταν χρησιμοποιώντας έναν και μόνο ανιχνευτή. Στη συνέχεια, η πηγή και ο ανιχνευτής περιστρέφονταν αντιδιαμετρικά σε σχέση με τον ασθενή, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 21. Προκειμένου να ανακατασκευαστεί μια εγκάρσια τομή - φέτα, η δέσμη ακτίνων X θα έπρεπε να «υπολογιστεί» πολλές φορές για κάθε προβολή. Αυτή η διαδικασία ήταν πολύ χρονοβόρα καθώς οι σαρωτές ήταν εξαιρετικά αργοί.

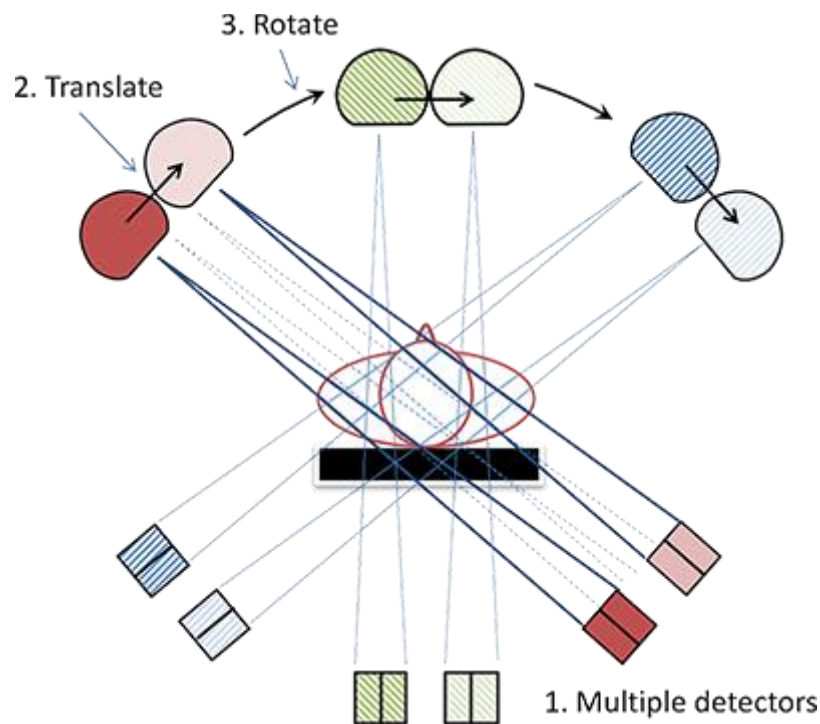


Εικόνα 21: Σχηματική προβολή τομογράφου πρώτης γενιάς, Πηγή: (Παντελής, 2021)

Στους αξονικούς τομογράφους πρώτης γενιάς συγκαταλέγεται ο πρώτος χρησιμοποιούμενος στα παγκόσμια χρονικά, γνωστός ως EMI. Στον EMI ο ασθενής τοποθετούνταν σε ύπτια θέση σε κλίνη με τα γόνατα λυγισμένα. Ο εξεταζόμενος τοποθετούνταν με το κεφάλι στο εσωτερικό ενός πεντάπλευρου κουτιού με διαστάσεις 25 εκατοστών που ήταν γεμάτο με νερό, προκειμένου να μειωθούν οι κίνδυνοι από την ακτινοβολία αλλά και να παραχθεί ένας αλγόριθμος εκκίνησης για την ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων του υπό σάρωση οργάνου. Οι πρώτες εκδόσεις αυτού του τομογράφου χρειάζονταν 4,5 λεπτά για μία σάρωση. Σε μεταγενέστερες εκδόσεις η διαδικασία του χρόνου σάρωσης μειώθηκε με τη χρήση δύο αντί ενός ανιχνευτών, έτσι ώστε να παράγονται ταυτόχρονα δύο τομές με μία σάρωση.

B. Η δεύτερη γενιά αξονικών τομογράφων

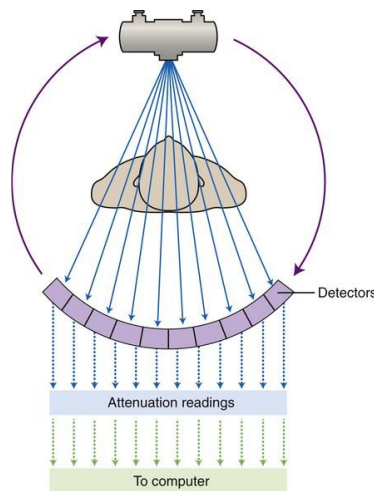
Οι αξονικοί τομογράφοι δεύτερης γενιάς μοιράζονταν τις ίδιες αρχές με αυτούς της πρώτης, σε βελτιωμένη ωστόσο έκδοση. Χρησιμοποιούσαν ένα σύστημα πολλαπλών ανιχνευτών (30 ανιχνευτές), ενώ η δέσμη των ακτίνων ήταν αποκλίνουσα κατά 10 μοίρες. Επιπλέον ήταν κατά πολύ ταχύτεροι. Η μέση σάρωση σ' αυτούς τους τομογράφους ήταν περίπου 20 δευτερόλεπτα. Οι αξονικοί τομογράφοι δεύτερης γενιάς ήταν συστήματα μονής τομής. Οι πολλαπλοί ανιχνευτές στην κατεύθυνση επιπέδου όπως είχαν ήδη εφαρμοστεί στην πρώτη γενιά σαρωτών CT, εξαλείφθηκαν από τους περισσότερους σαρωτές μέχρι την πρόσφατη αναβίωση της σάρωσης «πολλαπλών τμημάτων» στα μέσα της δεκαετίας του 1990, όπως αναπαρίσταται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας τομογράφου 2^{ης} γενιάς. Πηγή: (link.pengyizhang.github.io)

Γ. Η τρίτη γενιά αξονικών τομογράφων

Το πρόβλημα της αργής σάρωσης που υπήρχε στις δύο προηγούμενες γενιές, επιχειρήθηκε να λυθεί με τους τομογράφους τρίτης γενιάς. Βασικός στόχος των ερευνών ήταν η μείωση του χρόνου σάρωσης σε κάτω από 20 δευτερόλεπτα καθώς και η μείωση της χορηγούμενης δόσης ακτινοβολίας. Κάτι τέτοιο θα επέτρεπε τη σάρωση π.χ. της κοιλιάς του ασθενή στο χρονικό διάστημα που αυτός μπορούσε να κρατήσει την ανάσα του, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα αναπνευστικής κίνησης που θα αλλοίωναν την εικόνα. Ο τομογράφος τρίτης γενιάς ήταν ένα σύστημα περιστροφής δέσμη τύπου βεντάλιας (fan beam). Ο αριθμός των ανιχνευτών είχε αυξηθεί σημαντικά (> 800) και το εύρος της δέσμης αυξήθηκε, προκειμένου να καλύψει ολόκληρο τον ασθενή. Η συστοιχία λυχνίας ακτίνων X και ανιχνευτών ενώνονταν μηχανικά και περιστρέφονταν μαζί. Τα νεότερα συστήματα είχαν χρόνους σάρωσης της τάξης των $< 0,5$ δευτερολέπτων και χρησιμοποιούσαν σημαντικά μειωμένη δόση ακτινοβολίας, (εικόνα 23).

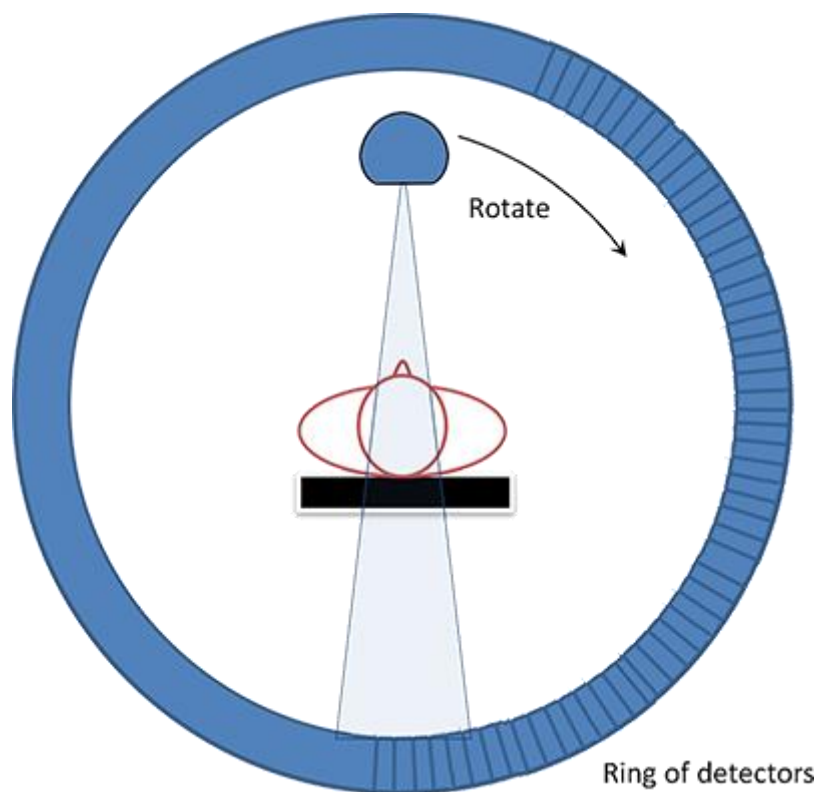


Εικόνα 23: Γραφική αναπαράσταση τομογράφου 3^{ης} γενιάς. Πηγή: (link <https://radiologykey.com>)

Η κάθε τομή δεν ξεπερνούσε τα 10mm (1-10mm) και η δέσμη ήταν οργανωμένη σε σχήμα βεντάλιας (30° έως 60°) που κάλυπτε όλο το όργανο. Οι ανιχνευτές ήταν ισομερώς τοποθετημένοι κυκλικά, έτσι ώστε να μπορεί η ανακατασκευασμένη εικόνα να είναι συμμετρική. Οι ανιχνευτές και η πηγή ακτίνων X (fan beam) περιστρέφονταν ταυτόχρονα κυκλικά από την κλίνη του ασθενούς, η οποία μετακινούνταν για τις ανάγκες της εξέτασης.

Δ. Η τέταρτη γενιά αξονικών τομογράφων

Οι τομογράφοι τέταρτης γενιάς δανείστηκαν αρκετά στοιχεία από αυτούς της προηγούμενης. Είχαν ένα σταθερό δακτύλιο με 4800 ανιχνευτές και ευρεία κινούμενη δέσμη ακτίνων, όπως φαίνεται στην εικόνα 24. Η δυνατότητα που είχε η λυχνία των ακτίνων X να κινείται περιμετρικά εντός ή εκτός του δακτυλίου, εξασφάλιζε πολύ γρήγορους χρόνους σάρωσης. Η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων είχε εξάρτηση από την εκάστοτε επιχειρούμενη μέτρηση.

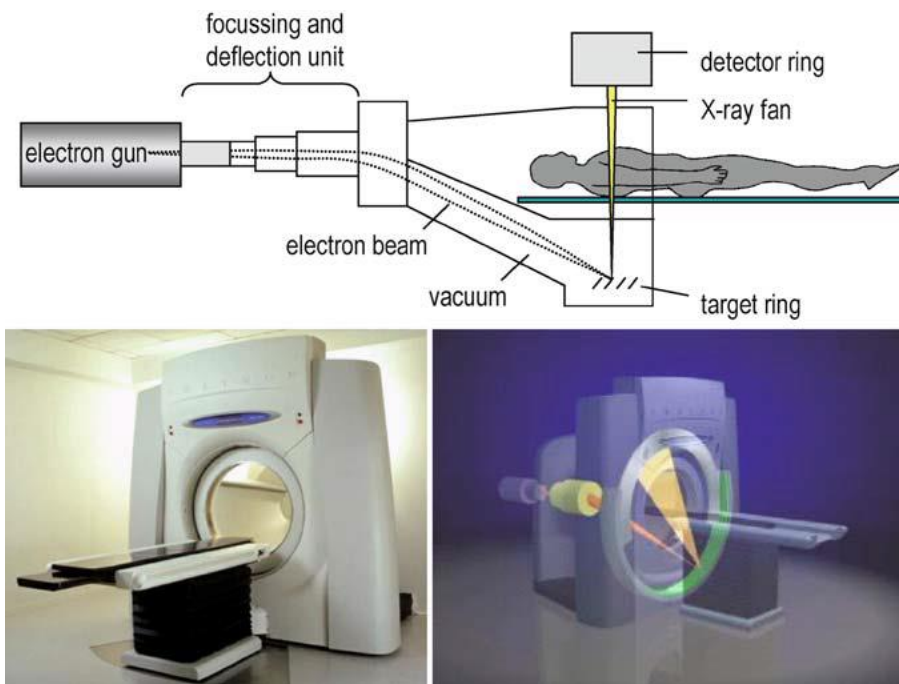


Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση τομογράφου 4^{ης} Γενιάς. Πηγή: (link www.radiologycafe.com/)

Οι αξονικοί τέταρτης γενιάς γρήγορα εγκαταλείφθηκαν γιατί είχαν εξαιρετικά υψηλό λειτουργικό κόστος και αντιμετώπιζαν ποικίλα τεχνικά προβλήματα ιδίως με την επεξεργασία του τεράστιου όγκου δεδομένων που παραγόταν στη διάρκεια της εξέτασης. Επίσης εμφάνιζαν αρκετά συχνά σφάλματα και βλάβες εξαιτίας του σταθερού δακτυλίου των ανιχνευτών.

Ε. Η πέμπτη γενιά

Οι πέμπτης γενιάς αξονικοί τομογράφοι έχουν πολλά κοινά στοιχεία με τους προηγούμενους. Η διαφοροποίησή τους έγκειται στο ότι η μηχανική κίνηση των ακτίνων X γύρω από το δακτύλιο αντικαταστάθηκε από ηλεκτρονικά στοιχεία. Η ηλεκτρονική τομογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Computed Tomography - EBCT) χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την καρδιακή απεικόνιση. Η EBCT ή Ultra Fast CT (UFCT) έχει τουλάχιστον μία γεννήτρια δέσμης ηλεκτρονίων, ένα σύστημα εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων και μία άνοδο βολφραμίου για την παραγωγή ακτίνων-X σε διάφορες διευθύνσεις. Ένας δακτύλιος ανιχνευτών περιβάλλει το εξεταστικό τραπέζι ημικυκλικά και ο ασθενής βρίσκεται κατά έναν τρόπο μέσα στο σύστημα της λυχνίας η οποία δεν περιστρέφεται γύρω του όπως στη συμβατική αξονική τομογραφία. Το σύστημα αυτό λαμβάνει εικόνες ταχύτερα (σε χρόνους μικρότερους του δευτερολέπτου), όπως φαίνεται στην εικόνα 25. Παρά το μεγάλο του αυτό πλεονέκτημα της ταχύτητας δεν αποτέλεσε ακόμα εργαλείο ρουτίνας καθώς το κόστος του είναι αρκετά μεγάλο και έχει εξειδικευμένες εφαρμογές (Buzug, 2008).



Εικόνα 25: Αναπαράσταση τομογράφου 5^{ης} Γενιάς, Πηγή: (Buzug, 2008)

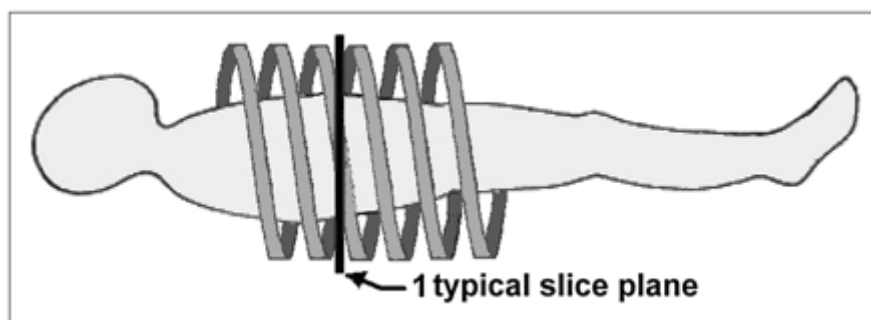
Οι σύγχρονοι τομογράφοι 1990- σήμερα

Τα τελευταία 30 χρόνια οι εξελίξεις των αξονικών τομογράφων ήταν τέτοιες που έκαναν δυνατή την ακριβέστερη διάγνωση μίας σειράς παθήσεων όπως τα αγγειακά εγκεφαλικά επεισόδια, τις καρδιακές παθήσεις και μέρος ογκολογικών παθήσεων σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ωστόσο, η ανάγκη για συνεχή εξέλιξη και βελτίωση ακόμα και των νέων μηχανημάτων εξακολουθεί να υφίσταται, καθώς οι απαιτήσεις συνεχώς αυξάνονται.

Στα αρχικά της στάδια η αξονική τομογραφία φιλοδοξούσε να παράγει απλά ικανοποιητικές εικόνες ενός στατικού αντικειμένου. Η απόκτηση εικόνας «με τεχνική συγκράτησης αναπνοής» έγινε δυνατή με την ανακάλυψη της ελικοειδούς/σπειροειδούς σάρωσης. Αργότερα με την ισοτροπική χωρική ανάλυση του συνόλου του ανθρώπινου σώματος με την εισαγωγή πολυτομικής αξονικής τομογραφίας (Multi-Slice Computed Tomography- MSCT), δόθηκαν ακόμα περισσότερες δυνατότητες στην απεικονιστική αυτή μέθοδο. Στη συνέχεια εισήλθαν ακόμα πιο εξειδικευμένα συστήματα όπως ο τομογράφος ευρέος κώνου (Wide Cone beam CT) με εφαρμογή κυρίως σε οδοντιατρικά περιστατικά και ο τομογράφος διπλής πηγής (Dual Source Computed Tomography – DSCT) με διαφορετικές εφαρμογές προηγμένους αλγορίθμους και διαφορά στο κόστος και την τεχνική σάρωσης (Hsieh & Flohr, 2021).

Ο ελικοειδής τομογράφος

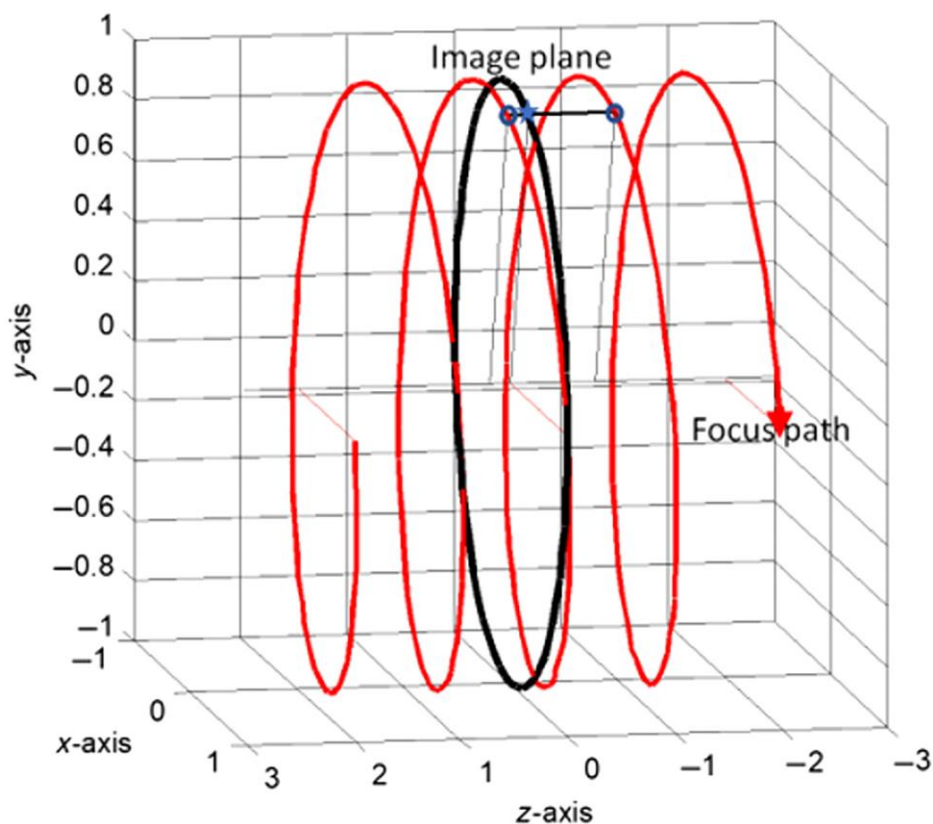
Ο πρώτος ελικοειδής τομογράφος δημιουργήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και χρησιμοποιούσε μηχανισμό δακτυλίου ολίσθησης, που επέτρεπε στο σύστημα της διάταξης λυχνίας/ανιχνευτών ακτίνων X να περιστρέφονται ομαλά γύρω από τον ασθενή. Ο ελικοειδής τομογράφος εισήγαγε το δακτύλιο ολίσθησης, είχε λυχνία ακτίνων X πολύ υψηλής ταχύτητας και χρησιμοποιούσε αλγόριθμους παρεμβολής για το χειρισμό δεδομένων προβολής. Η ελικοειδής αξονική τομογραφία δημιούργησε νέα δεδομένα στην ανακατασκευή εικόνας. Η σάρωση από συμβατική έγινε ελικοειδής και λυχνία κινούνταν κυκλικά κατά μήκος μίας σπείρας χωρίς διακοπή της ακτινοβολήσης, κάνοντας έτσι τη σάρωση ακόμα πιο γρήγορη, εικόνα 26. Αυτή η λεγόμενη σπειροειδής ή ελικοειδής απόκτηση δεδομένων αποτέλεσε θεμελιώδη εξελικτική διαδικασία στις απεικονιστικές τεχνικές. Για πρώτη φορά «με τεχνική συγκράτησης αναπνοής» ή «breath hold – BH» μπορούσαν να απεικονιστούν ολόκληρα τα όργανα, να αποφευχθούν τεχνικά σφάλματα λόγω αναπνευστικής κίνησης ή επικαλυπτόμενες τομές. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτέλεσε και το θεμέλιο λίθο της βελτίωσης άλλων τεχνικών όπως είναι η αγγειογραφίες, καθώς έκανε δυνατή την καλύτερη απεικόνιση αγγείων, αφού σε πολύ μικρούς χρόνους μπορούσαν να απεικονιστούν αγγεία (αρτηρίες ή φλέβες) με πολύ μεγάλο εμπλουτισμό. Επίσης λόγω της ταχείας και συνεχόμενης σάρωσης μπορούσαμε πλέον να λαμβάνουμε δεδομένα όγκου με τη δυνατότητα αυτή



Εικόνα 26: Αναπαράσταση λειτουργίας ελικοειδούς τομογράφου. Πηγή: (<http://ikee.lib.auth.gr/>)

να ανοίγει το δρόμο για τη χρήση τρισδιάστατης εικόνας, τεχνικές επεξεργασίας όπως ποιοτικές πολυεπίπεδες ανασυνθέσεις, προβολές μέγιστης έντασης (Maximum Intensity Projection - MIP), προβολές ελάχιστης έντασης (Minimum Intensity Projection - MIN) ή τεχνικές απόδοσης όγκου (Volume Rendering Techniques -

VRT) σε αξονικές τομογραφίες και προηγμένους αλγορίθμους, όπως αυτός της παρεμβολής (εικόνα 27).



Εικόνα 27: Αλγόριθμος παρεμβολής σε ελικοειδή σάρωση, Πηγή: (Hsieh & Flohr, 2021)

Αρχικά η διαδικασία της εξέτασης εξακολουθούσε να είναι χρονοβόρα καθώς η κάθε περιστροφή έδινε μόνο μία εικόνα. Έτσι, απαιτούνταν ικανός αριθμός εργατωρών για την εκτέλεση μίας και μόνης εξέτασης, και, παράλληλα, περιοριζόταν το εύρος των ασθενειών που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως απεικονιστική μέθοδος (Dolmatch, 2005).

Το βασικό πλεονέκτημα της ελικοειδούς σάρωσης πέρα από το μικρό χρόνο σε σχέση με τη συμβατική σάρωση, είναι ότι μπορεί να εντοπίσει σε πρώιμο στάδιο βλάβες που τα παλαιότερης τεχνολογίας μηχανήματα δεν απεικόνιζαν. Αυτό μπορούσε να συμβεί σε περιπτώσεις όπου η συμβατική σάρωση πραγματοποιούνταν με συγκεκριμένο, μικρό σχετικά, αριθμό τομών σε συγκεκριμένες ανατομικές περιοχές. Λόγω του χρόνου πρόσκτησης των δεδομένων και της περισσότερης ακτινοβολήσης ίσως η εξεταζόμενη περιοχή να μην καλυπτόταν πάντα επαρκώς σε μικρό χρονικό διάστημα. Η συνεχόμενη ελικοειδής σάρωση βελτίωσε τέτοια

προβλήματα λαμβάνοντας ταχύτερα δεδομένα όγκου μιας περιοχής, όπως προαναφέραμε. Έτσι, ενδεχόμενες κινήσεις του ασθενούς όπως π.χ. η αναπνευστική κίνηση μπορούσε να αποκρύψει χρήσιμες πληροφορίες οι οποίες δίνονται ξεκάθαρα με την τεχνική ελικοειδούς σάρωσης και μία συγκράτηση αναπνοής (εικόνα 28).



Εικόνα 28: MIP ανασύνθεση από αξονική τομογραφία θώρακος με ελικοειδή σάρωση όπου διακρίνονται ξεκάθαρα δομές και παθολογίες του πνεύμονα. Πηγή: ([link www.spiedigitallibrary.org](http://www.spiedigitallibrary.org))

Γενικότερα τα πλεονεκτήματα του ελικοειδούς τομογράφου συνοψίζονται ως εξής: (Παντελής, 2021)

- Ελαχιστοποίηση του χρόνου εξέτασης.
- Βέλτιστη ποιότητας εικόνας (ελαχιστοποίηση ασαφειών λόγω κίνησης οργάνων).
- Μείωση δόσης ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο.
- Τα λαμβανόμενα δεδομένα είναι σε έναν όγκο και όχι σε μια τομή, για τον λόγο αυτό μπορούν να αναπαραχθούν στεφανιαίες ή οβελιαίες τομές και

όχι μόνο εγκάρσιες όπως γίνεται στην περίπτωση της κλασσικής αξονικής τομογραφίας.

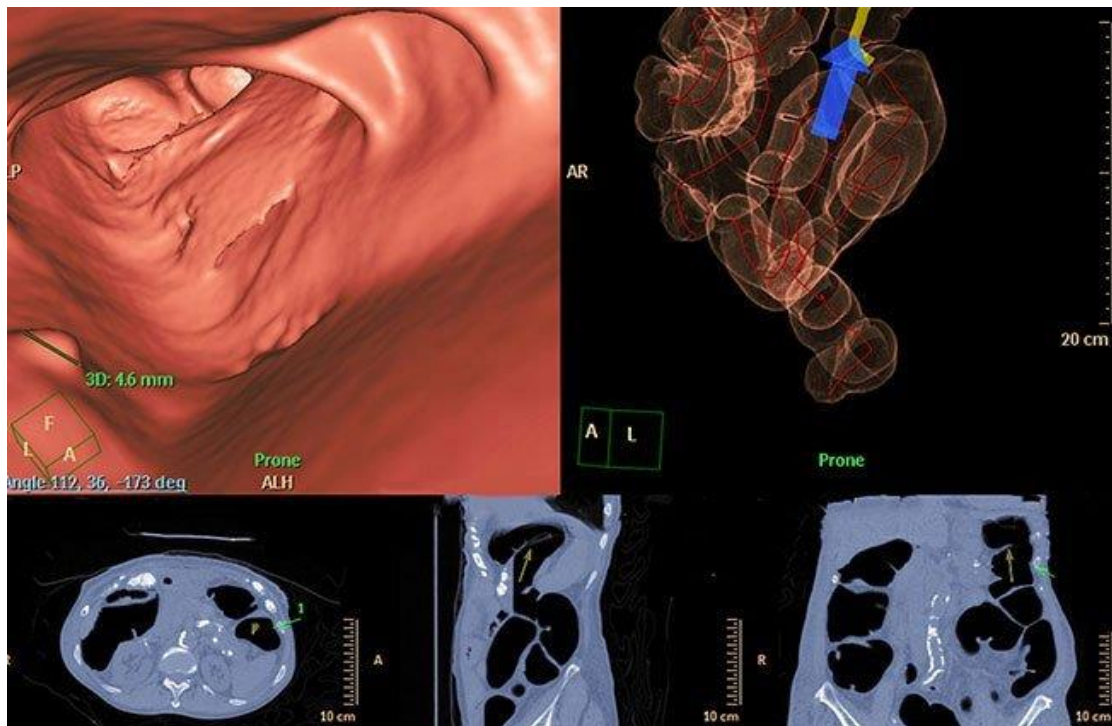
- Παραγωγή σύνθετων εικόνων όπως π.χ. τρισδιάστατες εικόνες από τον συνδυασμό των βασικών τομών που λήφθηκαν.

Σημαντική είναι η συμβολή των ελικοειδών αξονικών τομογράφων σε διαδικασίες όπως η αξονική κολονοσκόπηση και αυτή του λεπτού εντέρου.

Η αξονική- εικονική κολονοσκόπηση

Η συμβατική οπτική κολονοσκόπηση (Optical Colonoscopy - OC) εξακολουθεί να παραμένει εξέταση επιλογής για την ανίχνευση καρκίνου σε ασθενείς με αίμα στα κόπρανα και ως προληπτική στρατηγική σε ασθενείς με αυξημένο κίνδυνο εκδήλωσης της νόσου. Ωστόσο, καθώς θεωρείται από κάποιους ασθενείς δυσάρεστη ως εμπειρία, απαιτήθηκαν εναλλακτικές λύσεις για τη βελτίωση της συμμόρφωσής τους στα προγράμματα προσυμπτωματικού ελέγχου. Επιπλέον, ως επεμβατική τεχνική ενέχει τον κίνδυνο διάτρησης του εντέρου και αιμορραγίας, Απαιτείται επίσης καταστολή, η οποία αυξάνει τον κίνδυνο ιδιαίτερα σε ηλικιωμένους ασθενείς. (Wang, Mannalithara, Singh, & Ladabaum, 2018)

Η αξονική κολονοσκόπηση (CT colonography) γνωστή και ως εικονική κολονοσκόπηση είναι μία μέθοδος σχετικά καινούρια, που έγινε εφικτή χάρη στη χρήση των σύγχρονων ελικοειδών αξονικών τομογράφων. Η τεχνική εισήχθη για πρώτη φορά το 1994 από τον Vining ως εναλλακτική μέθοδος απεικόνισης του παχέος εντέρου. Σε αυτή τα δεδομένα της ελικοειδούς υπολογιστικής τομογραφίας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τρισδιάστατων εικόνων που προσομοιώνουν μια εικονική ενδοαυλική όψη (εικόνα 29).

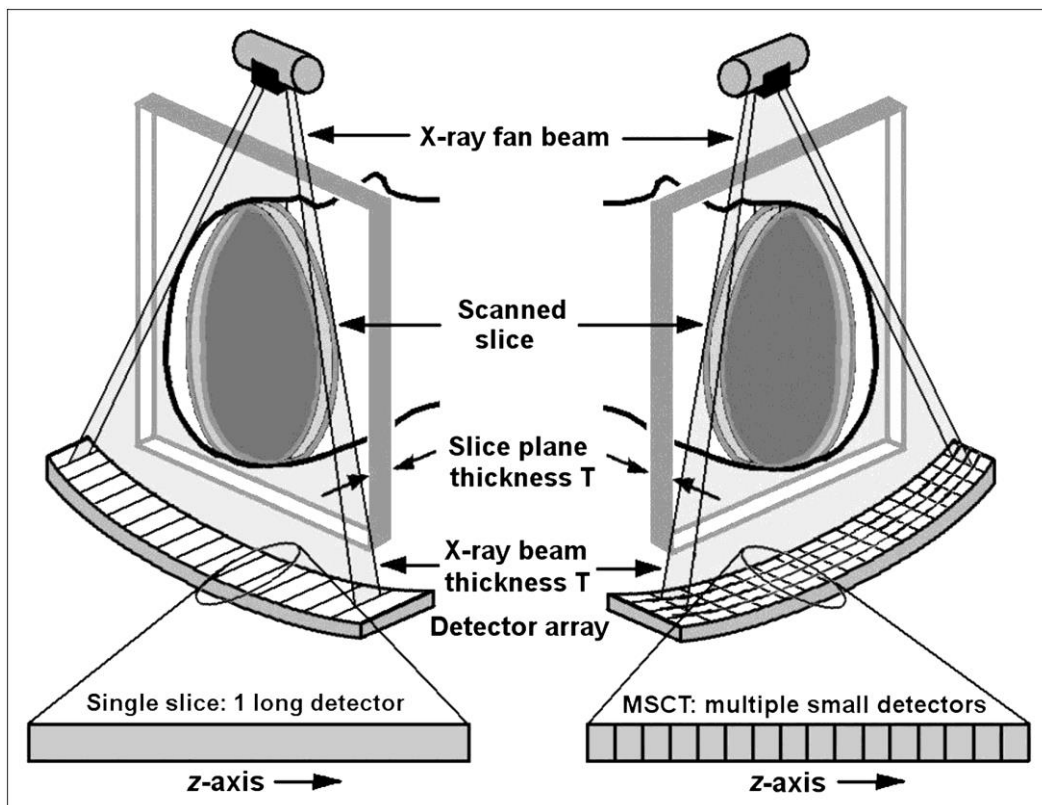


Εικόνα 29: Απεικόνιση του εντέρου που προκύπτει μετά την ανασύνθεση των εικόνων σε διάφορα επίπεδα και 3D απεικόνιση με τη χρήση ειδικού αλγορίθμου ανακατασκευής. Πηγή: ([link www.parafestas-diagnostika-ergastiria.gr/](http://linkwww.parafestas-diagnostika-ergastiria.gr/))

Πρόκειται μια αξιόπιστη, μη επεμβατική τεχνική και γίνεται αξιολόγηση ολόκληρου του παχέος εντέρου, η οποία σήμερα προτιμάται από τους ασθενείς σε σχέση με τη συμβατική κολonosκόπηση. Οι ασθενείς δεν χρειάζεται να υποστούν καταστολή ούτε χρήζουν παρακολούθησης μετά την εξέταση, επομένως μπορούν αμέσως να επιστρέψουν στη ρουτίνα τους χωρίς την ανάγκη ακόμα και της παραμικρής νοσηλείας. Η μέθοδος σημειώνει υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση πολύποδων και καρκίνου και μπορεί να φιλτράρει επιλεκτικά και μη επεμβατικά εκείνους τους ασθενείς που θα ωφελούνταν περισσότερο από τη θεραπευτική συμβατική οπτική κολonosκόπηση. (Kim, etal., 2007). Σε μια πρόσφατη μετα-ανάλυση, οι (Pickhardt, Hassan, Halligan, &Marmo, 2011) κατέληξαν πως η ευαισθησία της αξονικής κολonosκόπησης στην ανίχνευση του καρκίνου του παχέος εντέρου ήταν περίπου 96% σε σύγκριση με 95% που παρατηρήθηκε στην οπτική κολonosκόπηση.

Τομογράφος πολλαπλών τομών

Η βασική διαφορά μεταξύ των αξονικών μονής τομής (Single Slice Computed Tomography - SSCT) και των αξονικών πολλαπλών τομών (Multi Slice Computed Tomography - MSCT) είναι ο σχεδιασμός των συστοιχιών των ανιχνευτών. Οι συστοιχίες ανιχνευτών SSCT είναι μονοδιάστατες και αποτελούνται από ένα αριθμό ανιχνευτών τοποθετημένων σε μονή σειρά κατά μήκος της ακτινοβολούμενης τομής που υποδέχονται τη δέσμη των ακτίνων X μετά την ακτινοβολήση. Στους τομογράφους πολλαπλών τομών (MSCT), οι συστοιχίες ανιχνευτών στην κατεύθυνση Z χωρίζονται σε πολλά μικρότερα στοιχεία, σχηματίζοντας μια διδιάστατη συστοιχία. Πολλαπλές παράλληλες σειρές ανιχνευτών υποδέχονται την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, όπως φαίνεται στην εικόνα 30 (Goldman, 2007).



Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση της διαφοράς απλού και πολυτομικού τομογράφου.

Πηγη: (link www.neurologica.com/blog/slice-of-ct-scanners)

Ο πρώτος τομογράφος με περισσότερες της μίας σειράς ανιχνευτών δημιουργήθηκε το 1992 από τον Elscint, ο οποίος κατασκεύασε μηχάνημα με δύο σειρές ανιχνευτών και διευρυμένη δέσμη ακτίνων κατά μήκος του άξονα z. Έτσι έγινε δυνατή η ταυτόχρονη λήψη δεδομένων για δύο τομές.

Ο σύγχρονος τομογράφος πολλαπλών τομών εισήχθη στα τέλη του 1998 και είχε 16 σειρές ανιχνευτών μήκους 1,25 mm στην κατεύθυνση του άξονα z και κατά μήκος του. Κάθε μία από τις 16 σειρές ανιχνευτών του τομογράφου μπορούσε να παράγει δεδομένα από 16 ταυτόχρονες τομές πάχους 1,25 mm με 1000 προβολές ανά περιστροφή. Έτσι αν υπάρχουν 800 ανιχνευτές ανά σειρά σε 16 σειρές κατά τη διάρκεια μίας και μόνης περιστροφής σε χρόνο μικρότερου του μισού δευτερολέπτου μπορούν να παραχθούν 13.000.000 μετρήσεις. Έτσι δημιουργούνταν ένας τεράστιος όγκος δεδομένων που έπρεπε να αποθηκευτούν και επεξεργαστούν κάτι που τότε ήταν δύσκολο. Για τον παραπάνω λόγο αυτοί οι πρώτοι τομογράφοι περιορίστηκαν στις τέσσερις σειρές ανιχνευτών, οι οποίες αργότερα έγιναν οχτώ.

Στα τέλη του 2002 επανήλθε ο τομογράφος 16 σειρών με ανασχεδιασμένους ωστόσο τους ανιχνευτές προκειμένου να παράγουν λεπτότερες φέτες- τομές.

Τα πλεονεκτήματα του τομογράφου πολλαπλών τομών σύμφωνα με τον (Παντελής, 2021) είναι:

- Η περιοχή σάρωσης ανά περιστροφή είναι μεγαλύτερη.
- Μικρότερος χρόνος σάρωσης (0,3sec /περιστροφή)
- Απεικόνιση κινούμενων οργάνων σε μια στιγμή π.χ. καρδιά με αξονική στεφανιογραφία
- Μεγαλύτερη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.
- Μεγαλύτερη μείωση της δόσης στον ασθενή.

Η πρόοδος και η βελτίωση των τομογράφων πολλαπλών τομών αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια εξασφαλίζοντας τόσο για τους επαγγελματίες υγείας όσο και τους ασθενείς ακριβέστερα δεδομένα και περισσότερες επιλογές θεραπείας.

Η αξονική εντερογραφία

Η αξονική εντερογραφία είναι μια νέα μη επεμβατική τεχνική απεικόνισης, που έγινε δυνατή χάρη στους τομογράφους πολλαπλών τομών και τη δυνατότητα χορήγησης από το στόμα σκιαγραφικών παραγόντων χαμηλής πυκνότητας. Η συγκεκριμένη τεχνική προσφέρει άριστη απεικόνιση του λεπτού εντέρου. Έτσι, μπορεί να γίνει εφικτή η αποτελεσματική εκτίμηση της παθολογίας που προκύπτει στο τοίχωμα του λεπτού εντέρου ή στα γύρω όργανα. Για πρώτη φορά διενεργήθηκε το 1997 από τους (Raptopoulos, Schwartz, McNicholas, Movson, Pearlman, & Joffe, 1997) στην προσπάθειά τους να μελετήσουν τις αλλοιώσεις στο λεπτό έντερο, που δημιουργούνται από τη φλεγμονώδη νόσο του Crohn. Με τη χρήση από του στόματος ειδικού σκιαστικού και στη συνέχεια λήψη εικόνων από τομογράφους νέας γενιάς, προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν την ανάλυση αντίθεσης μεταξύ βλεννογόνου και αυλού. Μεγιστοποίησαν έτσι την ευκρίνεια των ανωμαλιών που προκύπτουν από το τοίχωμα του λεπτού εντέρου σε μια συμβατική αξονική τομογραφία κοιλίας, (εικόνα 31).



Εικόνα 31: Εικόνα αξονικής εντερογραφίας με ενδοφλέβια χορήγηση σκιαγραφικής ουσίας που δείχνει την παρουσία οπισθοπεριτοναϊκού αποστήματος (μακρύ βέλος) και φλεβοκομβικής οδού (κοντό βέλος) που συνδέει το απόστημα και τον φλεγμονώδη περιφερικό ειλέο σε γυναίκα 62 ετών, στα πλαίσια επιπλοκών της νόσου Crohn.

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης χορηγείται στον ασθενή 1000-1200 ml σκιαγραφικό υγρό, το οποίο καλείται να πει πριν την εξέταση σε σύντομο χρονικό

διάστημα, 40 περίπου λεπτά. Γι' αυτό το λόγο η συνεργασία του ασθενούς είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία της εν λόγω εξέτασης. Το υγρό δημιουργεί διάταση του λεπτού εντέρου και στη συνέχεια ακολουθεί αξονική τομογραφία της κοιλιακής-πυελικής χώρας. Η μόνη αντένδειξη της τεχνικής αφορά σε ενδεχόμενη αλλεργία των ασθενών στους σκιαγραφικούς παράγοντες, κάτι που μπορεί να αντιμετωπιστεί ενδεχομένως με αλλαγή του σκιαστικού παράγοντα. Η πυκνότητα των σκιαστικών παραγόντων είναι πολύ σημαντική για την επιτυχή διενέργεια της εξέτασης, καθώς μπορούν να ενισχύσουν το τοίχωμα του λεπτού εντέρου διευκολύνοντας την αξιολόγηση της πάχυνσης του βλεννογόνου και των μοτίβων ενίσχυσης του τοιχώματος (Wold, Fletcher, Johnson, & Sandborn, 2003). Το διάλυμα νερού-μεθυλοκυτταρίνης, η πολυαιθυλενογλυκόλη, το εμπορικά διαθέσιμο βάριο χαμηλής πυκνότητας και το γάλα είναι παραδείγματα ουδέτερων από του στόματος σκιαγραφικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αξονικές εντερογραφίες. (Hingovan, Burling, George, Gupta, Marshall, & Taylor, 2012)

Αγγειογραφία

A. Ορισμοί και είδη αγγειογραφίας

Η αγγειογραφία αφορά στη μελέτη των αγγείων του ανθρώπινου σώματος μέσω της χρήσης ακτίνων X κατόπιν έγχυσης ειδικού υγρού. Η έγχυση του σκιαγραφικού υγρού γίνεται με καθετήρα και ειδική αντλία ή αλλιώς εγχυτή. Ταυτόχρονα με την έγχυση αρχίζει και η λήψη εικόνων. Η διάρκεια της έγχυσης είναι λίγα δευτερόλεπτα, ώστε να διασφαλιστεί η ανάδειξη του αγγείου ή των αγγείων, κατά την χρονική στιγμή της μεγαλύτερης συγκέντρωσης του σκιαγραφικού υγρού στην υπό εξέταση περιοχή. Η χρήση σκιαγραφικού υγρού θεωρείται αναγκαία, καθώς τα αγγεία έχουν την ιδιότητα να εξασθενούν το ίδιο με τους περιβάλλοντες ιστούς με τη διέλευση της ακτινοβολίας. Συνεπώς η έγχυση υγρών (σκιαγραφικό υλικό) διασφαλίζει ότι θα υπάρχει μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ ιστών και αγγείων ώστε τα τελευταία να απεικονίζονται ευκρινέστερα. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αγγειογραφίας ανάλογα με τα εξεταζόμενα όργανα ενδιαφέροντος, (πίνακας 2).

Είδος	Ενδείξεις
Στεφανιογραφία	<ul style="list-style-type: none">• Διάγνωση της στεφανιαίας νόσου και άλλες καρδιακές παθήσεις.• Για να προσδιοριστεί εάν η αγγειοπλαστική ή η χειρουργική επέμβαση παράκαμψης στεφανιαίας αρτηρίας είναι εφικτή.• Προσδιορισμός της σοβαρότητας μιας καρδιακής διαταραχής.• Προσδιορισμό των αιτιών του πόνου στο στήθος, της δύσπνοιας ή άλλων συμπτωμάτων.• Αποσαφήνιση συγκεκριμένης δομής της καρδιάς πριν από την επέμβαση αντικατάστασης καρδιακής βαλβίδας.
Αορτογραφία	<ul style="list-style-type: none">• Ανευρύσματα• Διαρροή της βαλβίδας μεταξύ της αορτής και της αριστερής κοιλίας. (αορτική ανεπάρκεια)
Αγγειογραφία εγκεφάλου	<ul style="list-style-type: none">• Στενώσεις ή φραγμένα αιμοφόρα αγγεία (που μπορεί να προκαλέσουν εγκεφαλικό)• Ανευρύσματα• Μη φυσιολογικές συνδέσεις μεταξύ αρτηριών και φλεβών. (αρτηριοφλεβώδεις δυσπλασίες)• Φλεγμονή των αιμοφόρων αγγείων. (αγγειίτιδα)
Αρτηριογραφία περιφερικών αγγείων	<ul style="list-style-type: none">• Στένωση ή απόφραξη (αποφρακτική περιφερική αρτηριακή νόσος)• Ανευρύσματα• Μη φυσιολογικά κανάλια μεταξύ αρτηρίας και φλέβας. (αρτηριοφλεβικά συρίγγια)• Μη φυσιολογικές συνδέσεις μεταξύ αρτηριών και φλεβών. (αρτηριοφλεβώδεις δυσπλασίες)
Πνευμονική Αγγειογραφία	<ul style="list-style-type: none">• Διάγνωση της πνευμονικής εμβολής (απόφραξη από θρόμβους αίματος στις πνευμονικές αρτηρίες και τον εντοπισμό ανωμαλιών των πνευμονικών αρτηριών και φλεβών.

Πίνακας 2: Είδη αγγειογραφίας και κυριότερες ενδείξεις διενέργειάς τους.

Η συμβατική αγγειογραφία ήταν αρχικά μια στατική δισδιάστατη καταγραφή των αγγείων. Αργότερα εξελίχθηκε σε δισδιάστατες απεικονίσεις αγγείων σε πραγματικό χρόνο σε ειδικά monitors και έπειτα σε τρισδιάστατες ανακατασκευές αξονικών τομογραφικών εικόνων. Η αγγειογραφία είναι σε θέση να αποδώσει σε πραγματικό χρόνο τις βλάβες των αγγείων χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές όπως είναι οι ακτίνες X. Επιπλέον μπορεί και προσφέρει θεραπευτικές επιλογές κατά τη στιγμή της αρχικής διάγνωσης, όπως για παράδειγμα η στεφανιογραφία (διαγνωστική και θεραπευτική μέθοδος κατά περίπτωση). Η συμβατική αγγειογραφία θεωρείται επεμβατική μέθοδος. Εκτός από την παροχή θεραπευτικών επιλογών, η επεμβατική αγγειογραφία παραμένει το gold standard για τη διάγνωση των περισσότερων ενδοαγγειακών παθολογιών. Η πρόοδος στην τεχνολογία απεικόνισης τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει επεκτείνει το πεδίο της αγγειογραφίας για να συμπεριλάβει μη επεμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι αξονικής και μαγνητικής τομογραφίας (Omeh&Shlofmitz, 2022). Η αγγειογραφία παρουσιάζει κάποιες αντενδείξεις σε ορισμένες κατηγορίες ασθενών όπως:

α) Υπερβολικά παχύσαρκα άτομα. Τα τραπέζια των συμβατικών αγγειογράφων «σηκώνουν» βάρος μέχρι 350 κιλά. Νοσολογικά παχύσαρκοι ασθενείς με βάρος που υπερβαίνει αυτό το όριο ενδέχεται να μην υποβάλλονται σε αγγειογραφία για λόγους τεχνικής ασφάλειας.

β) Γυναίκες σε κατάσταση εγκυμοσύνης εκτός και αν υπάρχει ανίατη αιμορραγία με κίνδυνο θανάτου.

γ) Για άτομα με ιστορικό σοβαρής αλλεργίας ιωδιούχου σκιαγραφικού που εκδηλώνεται ως βρογχόσπασμος, λαρυγγόσπασμος, αγγειοοίδημα και καρδιαγγειακή κατάρρευση.

δ) Ασθενείς με ιστορικό ήπιων αλλεργικών αντιδράσεων μπορούν να υποβληθούν σε προηγούμενη θεραπεία με στεροειδή και αντιισταμινικά.

ε) Οι ασθενείς με υποκείμενη νεφρική δυσλειτουργία ή αφυδάτωση διατρέχουν υψηλό κίνδυνο ανάπτυξης νεφρικής ανεπάρκειας μετά από έκθεση σε σκιαγραφικό μέσο (Omeh & Shlofmitz, 2022).

Η χρήση σκιαγραφικού υγρού δε διασφάλιζε την απόλυτη απεικόνιση γιατί οι μικρότερες διαφορές αντίθεσης που αναπτύσσονται στα αγγεία από το σκιαγραφικό μέσο δεν είναι εύκολο να παρατηρηθούν, καθώς το μάτι δεν έχει την ικανότητα να ανιχνεύει διαφορές αντίθεσης μικρότερες από περίπου 3%. Έτσι η συμβατική αγγειογραφία άρχισε να αντικαθίσταται με άλλες μεθόδους όπως η ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία Digital Subtraction Angiography – DSA, (εικόνα 32) για την περαιτέρω ενίσχυση της αντίθεσης (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2020).

Η ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία (DSA) αποτελεί εξέλιξη της συμβατικής και συμβάλλει τα μέγιστα στην αρτιότερη απεικόνιση και διαχείριση των παραγόμενων εικόνων, καθώς καθιστά δυνατή την αφαίρεση του «θορύβου» που παράγουν γειτονικά με τα αγγεία στοιχεία όπως οστά και ιστοί (Κατσάνος, 2009). Ως τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως στην επεμβατική ακτινολογία για την απεικόνιση των αιμοφόρων αγγείων. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αιμάτωσης. Σήμερα, η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί τη μέθοδο εκλογής σε περιπτώσεις ανίχνευσης μία σειράς στενώσεων με προεξάρχουσες τις καρδιακές (Chng, Petersen, Zimine, Sitoh, Lim, & Golay, 2008).

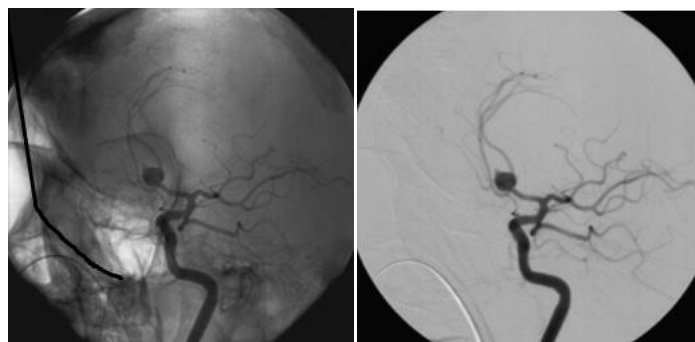
Η υπεροχή της ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας έγκειται στο γεγονός πως κατέστησε δυνατή την απεικόνιση των αγγειακών βλαβών σε πραγματικό χρόνο με σκιαγραφικό υλικό με βάση το ιώδιο. Ως εκ τούτου, η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως για την παρακολούθηση και την καθοδήγηση ελάχιστα επεμβατικών ενδοαγγειακών παρεμβάσεων (Cheon, 2015).

Η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου ανάγεται στο 1934 και περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Ziedes des Plantes⁶. Ο παραπάνω διαπίστωσε πως αν ληφθούν εικόνες πριν και μετά την έγχυση σκιαγραφικού υγρού όταν το τελευταίο βρίσκεται στη μέγιστη συγκέντρωσή του στα αγγεία, τότε η εικόνα που προκύπτει από τη διαφορά τους είναι αυτή που απεικονίζει μόνο τα αγγεία και το σκιαγραφικό υγρό (Valk, Braun, & Wackenheim, 1994).

⁶Ο Bernard George Ziedes des Plantes (1902-1993) σπούδασε νευρολογία στην Ουτρέχτη της Ολλανδίας. Ασχολήθηκε με τη βελτίωση της ακτινογραφίας ζωντανών ιστών. Στη δεκαετία του 1930 όχι μόνο κατασκεύασε το πρώτο μηχάνημα για πλανιγραφία στο οποίο ο σωλήνας ακτίνων X και το φιλμ κινούνταν μαζί γύρω από το επίπεδο ενδιαφέροντος, αλλά σχεδίασε επίσης τη μέθοδο αφαίρεσης για τη βελτίωση των εικόνων μετά την έγχυση σκιαγραφικών υγρών. Τελικά, ως ακτινολόγος πλήρους απασχόλησης, ανέπτυξε επίσης την τεχνική της κοιλιογραφίας και συμμετείχε στη δημιουργία πρωτοκόλλων για το ισότοπο σπινθηρογράφημα.

Για πρώτη φορά η τεχνική χρησιμοποιήθηκε σε μία προσπάθεια απεικόνισης του εγκεφάλου και των καρωτίδων, με τη διαδικασία ωστόσο να είναι επίπονη, χρονοβόρα και κοστοβόρα, καθώς απαιτούνταν ειδικά φιλμ και πολλές επαναλήψεις. Στα χρόνια που ακολούθησαν και κυρίως μετά το 1970, διάφορα ερευνητικά κέντρα των ΗΠΑ (Αριζόνα) και της Γερμανίας την εξέλιξαν και την ανέπτυξαν βρίσκοντας τρόπους για αποφυγή του «θορύβου» που παραγόταν από οστά, αέρα και γειτονικούς ιστούς. Στη συνέχεια βελτιώθηκε ακόμα παραπάνω, και το φιλμ αντικαταστάθηκε από ψηφιακές εικόνες με ότι αυτό σημαίνει για την ευχερέστερη επεξεργασία του παραγόμενου αποτελέσματος.

Σήμερα, ο σύγχρονος αγγειογράφος DSA με κάθε έγχυση κάνει δυνατή τη λήψη πολλών εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Με τη διαδικασία αφαιρούνται ακτινοσκιερές δομές όπως τα οστά και εξαλείφεται η εικόνα της «μάσκας» που προκύπτει μετά την έγχυση σκιαγραφικού μέσου στα αγγεία μέσω του καθετήρα (Tateishi, Kuroki, Machida, & al, 2020). Η διαδικασία της αφαίρεσης μπορεί να νοηθεί, σαν μια μαθηματική πράξη μεταξύ εικόνων (αφαίρεση στο δυαδικό σύστημα). Λαμβάνεται αρχικά μία σειρά εικόνων χωρίς σκιαγραφικό στην περιοχή ενδιαφέροντος, η γνωστή «μάσκα». Στη συνέχεια εγχέεται σκιαγραφικό μέσο και λαμβάνονται ξανά εικόνες στην ίδια περιοχή. Τέλος, γίνεται αφαίρεση της «μάσκας» από την εικόνα με σκιαγράφιση και σα αποτέλεσμα έχουμε μόνο τις εμπλουτιζόμενες με σκιαγραφικό περιοχές. Κατόπιν εφαρμόζονται άλλες ψηφιακές επεξεργασίες για τη βελτιστοποίηση της εικόνας, με δυνατότητα περικοπής και απομόνωσης ,απεικονιστικά, συγκεκριμένων αγγείων ενδιαφέροντος (Κατσάνος, 2009).



Εικόνα 32: Διαφορά ευκρίνειας απλής- αφαιρετικής αγγειογραφίας,

Πηγή: (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας)

Κατά τη διαδικασία μίας σύγχρονης αφαιρετικής εκλεκτικής διαδικασίας, η αρχικά παραγόμενη εικόνα αποθηκεύεται στη μνήμη. Όσες ακολουθούν αφαιρούνται και παρουσιάζονται ως σύνολο στην οθόνη ενός μόνιτορ. Αυτό επιτρέπει την πλήρη παρακολούθηση της εξέτασης σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες εικόνας αποθηκεύονται ταυτόχρονα και σε πραγματικό χρόνο σε ψηφιακό δίσκο.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για μείωση της έκθεσης σε ακτινοβολία τόσο για τους ασθενείς όσο και το παραϊατρικό προσωπικό που ενδεχομένως εμπλέκεται στη διαδικασία μίας συμβατικής ή ψηφιακής αγγειογραφίας. Όπως άλλωστε τονίστηκε και παραπάνω, στο αρχικό διάστημα χρήσης των ακτίνων για τον εντοπισμό βλαβών στο ανθρώπινο σώμα, τόσο οι ασθενείς όσο και οι επαγγελματίες υγείας αντιμετώπιζαν τραυματισμούς ή και θάνατο από την ακτινοβολία. Γι' αυτό το λόγο, η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας με δημοσιεύσεις της παρείχε οδηγίες για όλες τις πτυχές ακτινοπροστασίας κατά τη διάρκεια διενέργειας αγγειογραφικών παρεμβάσεων, (πίνακας 3).

Μετά τις αρχές της δεκαετίας του 1990 οι ακτινοσκοπικά καθοδηγούμενες επεμβατικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη διάγνωση και τη θεραπεία διαφόρων νευροαγγειακών παθήσεων. Η βελτίωση της ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας (DSA) και η εισαγωγή νέων συσκευών συμπεριλαμβανομένων μικροκαθετήρων και ειδικών καθοδηγούμενων σπινάλ καθώς και λοιπών εμβολικών υλικών, έχουν διευκολύνει κατά πολύ την επεμβατική διαδικασία. (Okamoto, Ito, Sakai, & Yioshimura, 2000)

<h3>Αιτιολόγηση</h3>	<ul style="list-style-type: none"> •Καμία πρακτική που να περιλαμβάνει έκθεση δεν πρέπει να εγκρίνεται εκτός εάν η εισαγωγή του παράγει καθαρό όφελος
<h3>Βελτιστοποίηση</h3>	<ul style="list-style-type: none"> •όλες οι εκθέσεις σε ακτινοβολία πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα. •Να λαμβάνονται υπόψη οικονομικοί και κοινωνικοί παράγοντες
<h3>Περιορισμός</h3>	<ul style="list-style-type: none"> •Η δόση δεν πρέπει να υπερβαίνει το ανώτερο δυνατό που είναι καθορισμένο για κάθε άτομο

Πίνακας 3: Βασικές αρχές ακτινοπροστασίας

Σε πείραμα των (Söderman, Holmin, Andersson, Palmgren, Babić, & Hoornaert, 2013) αποδείχθηκε ότι ένας αλγόριθμος μείωσης θορύβου εικόνας σχεδιασμένος για ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία (DSA) στην επεμβατική νευροακτινολογία επιτρέπει τον υποτετραπλασιασμό της δόσης εισόδου του ασθενούς διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα της εικόνας.⁷

Αρκετές μελέτες έχουν συγκρίνει την διαφορά αποτελεσματικότητας και επικινδυνότητας μεταξύ ενδοφλέβιας (Intra Venous IV-DSA) και ενδοαρτηρικής (Intra Arterial - IA-DSA) ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας στην εκτίμηση της στένωσης κυρίως σε κρανιοτραχηλικά αγγεία σε ασθενείς με συμπτώματα εγκεφαλικής ισχαιμίας (Sheldon, Janowitz, Leborgne, Sivina, & Rojo, 1984), (Thijssen, Merx, Mostart, Thijssen, Wong Chung, & al., 1988). Η ενδοφλέβια αφαιρετική ψηφιακή αγγειογραφία αποδείχθηκε επαρκής σε περιπτώσεις σοβαρής

⁷Το πείραμα διεξήχθη με υποκείμενα 20 ασθενείς μετά από γραπτή τους συγκατάθεση. Η DSA πραγματοποιήθηκε με το προεπιλεγμένο πρόγραμμα αναφοράς DSA, ένα πρόγραμμα DSA τετάρτης δόσης με τροποποιημένες παραμέτρους λήψης (για τη μείωση της έκθεσης στη δόση ακτινοβολίας του ασθενούς) και έναν αλγόριθμο μείωσης θορύβου σε πραγματικό χρόνο. Σε κάθε ασθενή ελήφθησαν δύο διαδοχικά σύνολα δεδομένων DSA διπλών επιπέδων. Περισσότερα στο : Söderman, M., Holmin, S, Andersson, T, Palmgren, C, Babić, D, Hoornaert, B(2013)Image Noise Reduction Algorithm for Digital Subtraction Angiography: Clinical Results Radiology 269(2)Q 553-560

στένωσης σε ποσοστό 93,3%, σύμφωνα με τους (Sheldon, Janowitz, Leborgne, Sivina, & Rojo, 1984). Σε άλλες μελέτες αποδείχθηκε πως η ενδοαρτηριακή αφαιρετική ψηφιακή αγγειογραφία είναι υπεύθυνη για θρομβοεμβολές και θάνατο στο 2% περίπου των ασθενών με εγκεφαλικές αγγειακές νόσους (Steiner, Perkin, Greenhalgh, & Clifford-Rose, 1987).

Αξονική αγγειογραφία

Πέραν των επεμβατικών αγγειογραφιών τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε η μη επεμβατική αξονική αγγειογραφία, η οποία χρησιμοποιείται ιδίως για την αξιολόγηση της αθηροσκλήρωσης της στεφανιαίας αρτηρίας. Πέρα από την ανίχνευση στένωσης, η ικανότητα της τεχνικής να απεικονίζει και να χαρακτηρίζει τη στεφανιαία αθηρωματική πλάκα καθώς δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής τρισδιάστατων εικόνων των στεφανιαίων αγγείων. Η 3D αυτή απεικόνιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο πλαίσιο του προεγχειρητικού σχεδιασμού για την επαναγγείωση των χρόνιων ολικών αποφράξεων.

Η τεχνική έγινε εφικτή χάρη στην ανάπτυξη των ελικοειδών τομογράφων καθώς και αυτών των πολλαπλών ανιχνευτών. Έτσι, προσπεράστηκαν τα εμπόδια της ταχύτητας λήψης και της ανάλυσης που απαιτούνταν για την απεικόνιση οποιουδήποτε αγγειακού στρώματος καθώς και των μικρής διαμέτρου αδιαφανών αγγείων, (εικόνα 31).

Η αξονική αγγειογραφία καρδιάς ή αξονική στεφανιογραφία (εικόνα 33) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1995 και, έκτοτε, σημείωσε σημαντικότερη πρόοδο. Η τρέχουσα τεχνική απαιτεί ενδοφλέβια χορήγηση σκιαγραφικού (συνήθως 50–80 cc /σάρωση) και συγκράτηση της αναπνοής διάρκειας περίπου 5 -10 δευτερολέπτων, ώστε να καταστεί δυνατή η διαστολική λήψη εικόνων. Η όλη διαδικασία συνήθως εκτελείται σε περίπου 15 λεπτά, ως μη επεμβατική μέθοδος λήψης πλήρων τρισδιάστατων εικόνων της καρδιάς με χρήση τομών πλάτους μικρότερες του χιλιοστού. Επίσης ο ασθενής συνδέεται με συσκευή παρόμοια με αυτή του καρδιογραφήματος, ώστε να μπορεί να παρακολουθείται η καρδιακή φάση (συστολική – διαστολική) και να λαμβάνονται εικόνες στον ανάλογο χρόνο (cardiac triggering).

Με την πάροδο του χρόνου και τη δημιουργία τομογράφων πολλαπλών ανιχνευτών η διαχείριση της ακτινοβολίας X έγινε αποτελεσματικότερη, καθώς

κατέστη δυνατή η λήψη εικόνας από περισσότερους ανιχνευτές. Επιπλέον, η δυνατότητα λήψης ταυτόχρονων εικόνων με μία περιστροφή του συστήματος λυχνίας - ανιχνευτών επέτρεψε σημαντικά μειωμένες δόσεις ακτινοβολίας, με χαμηλές απαιτήσεις του χρόνου συγκράτησης της αναπνοής. Περαιτέρω βελτιώσεις, συμπεριλαμβανομένων των προόδων στους αλγόριθμους λογισμικού, της επεξεργασίας σταθμών εργασίας και υλικού έχουν προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα εικόνας και καλύτερη επαναληψιμότητα (Kumamaru, Hoppe, Mather, & Rybicki, 2010).



Εικόνα 33: Ανακατασκευή εικόνας καρδιάς και στεφανιαίων αγγείων με τομογράφο πολλαπλών σειρών ανιχνευτών. Πηγή : ([link stavroulis.gr/](http://link.stavroulis.gr/))

Σήμερα η αξονική στεφανιογραφία προτιμάται από πληθώρα ασθενών στα πλαίσια του ελέγχου της καρδιακής λειτουργίας, καθώς είναι ευκολότερη ως διαδικασία και δεν απαιτεί ειδική προετοιμασία ούτε ιατρική παρακολούθηση με τα πέρας της. Σε αντίθεση ωστόσο με τη συμβατική αγγειογραφία, δεν μπορεί να γίνει καμία παρέμβαση (πχ. τοποθέτηση στεντ), με αποτέλεσμα αν η συγκεκριμένη τεχνική αναδείξει ένα πρόβλημα, στη συνέχεια ο ασθενής θα πρέπει να καταφύγει στη συμβατική στεφανιογραφία προκειμένου να το αντιμετωπίσει. Επομένως αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο μη επεμβατικό εργαλείο απεικόνισης-διάγνωσης αλλά όχι θεραπείας.

A. Ιστορία της αγγειογραφίας

Η ιστορία της αγγειογραφίας ξεκινά από πολύ παλιά. Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι προσπάθησαν να βρουν λύσεις στο πρόβλημα της απόφραξης των αρτηριών. Η έρευνα λοιπόν σχετικά με το θέμα ξεκινά από την απαρχή της ανθρώπινης ιστορίας, με κυρίαρχο σταθμό την ανακάλυψη των ακτίνων X. Ο πίνακας 4 που ακολουθεί, παρουσιάζει τα ανθρώπινα επιτεύγματα στον τομέα μέχρι και το 1895, οπότε η ανακάλυψη των ακτίνων X άλλαξε άρδην την πορεία στον τομέα της μελέτης των ανθρώπινων αγγείων (Alegria & Holmes, 2016).

3000 π.Χ.	Οι Αιγύπτιοι έκαναν καθετηριασμούς της ουροδόχου κύστης.
400 π.Χ.	Αέρας και νερό ωθήθηκαν μέσα από κοίλα καλάμια σε πτωματικές αρτές.
1651	Ο William Harvey προχωρά στον Καθετηριασμό της κάτω κοίλης φλέβας.
1665	Ο Wren έκανε την πρώτη ενδοφλέβια ένεση σε σκύλο.
1667	Ο Major έκανε την πρώτη ενδοφλέβια ένεση σε άνθρωπο.
1711	Ο Hales εκτελεί τον πρώτο τεκμηριωμένο καρδιακό καθετηριασμό χρησιμοποιώντας άλογο.
1844	Ο Claude Bernard μετρά τη θερμοκρασία του αίματος στην αριστερή κοιλία ενός αλόγου.
1847	Ο Claude Bernard καταγράφει τις ενδοκαρδιακές πιέσεις σε έναν σκύλο.
1870	Ο Adolph Fick υπολογίζει τη ροή του αίματος με οξυμετρία.
1895	Ανακάλυψη ακτίνων X από τον Ρέντγκεν στις 8 Νοεμβρίου.

Πίνακας 4. Οι σταθμοί στην ανάπτυξη της αγγειογραφίας πριν την ανακάλυψη των ακτίνων X

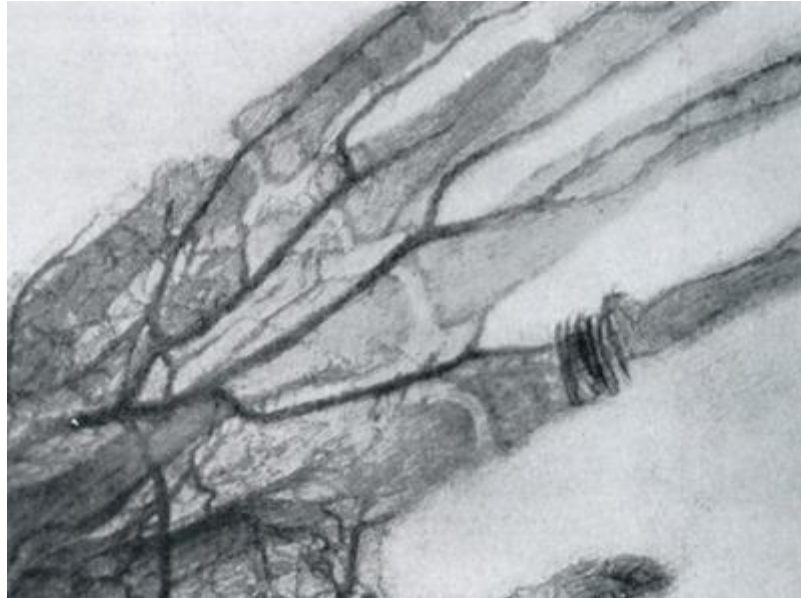
Η ιστορία της αγγειογραφίας είναι στενά συνδεδεμένη με την ανακάλυψη των ακτίνων X. Ουσιαστικά δεν θα μπορούσαμε να κάνουμε λόγο για αγγειογραφία χωρίς την παραπάνω ανακάλυψη. Η είδηση του παράξενου είδους ακτινοβολίας που

αψηφούσε όλες τις μέχρι τότε θεωρίες του φωτός και της ύλης και επέτρεπε στους ανθρώπους να βλέπουν μέσα από αδιαφανή αντικείμενα είχαν προκαλέσει παγκόσμιο ενθουσιασμό. Σχεδόν σε μια νύχτα οι μυστηριώδεις ακτίνες και οι απόκοσμες εικόνες τους άρχισαν να κυκλοφορούν όχι μόνο σε επιστημονικά και ιατρικά περιοδικά αλλά και σε άρθρα εφημερίδων και περιοδικών. Η ακτινογραφία αποτέλεσε το πρώτο σκαλοπάτι στη μελέτη των αγγείων. Τα πρώτα πειράματα έγιναν αρχικά σε ζώα και μετέπειτα σε πτώματα. Οι αρτηρίες και οι φλέβες των νεκρών σωμάτων μπορούσαν να εγχυθούν με μια διαυγή ουσία και στη συνέχεια να παρακολουθείται ακτινοσκοπικά η πορεία αυτής της ουσίας. Το αποτέλεσμα θεωρήθηκε καλύτερο από κάθε άλλη ανατομική προσέγγιση. Αφού τα αποτελέσματα σε πτώματα θεωρήθηκαν πετυχημένα, η επόμενη σκέψη ήταν να εφαρμοστεί και σε ζώντα υποκείμενα. Ο ασθενής θα μπορούσε πριν την ακτινογραφία να πει ένα αβλαβές υγρό περισσότερο ή λιγότερο διαυγές, το οποίο θα προκαλούσε διάταση και στη συνέχεια θα απεικονιζόταν με ακτινοσκόπηση. Εννέα μόλις μήνες μετά τη δημοσίευση από τον Roentgen της ανακάλυψης των ακτίνων X, το Σεπτέμβριο του 1896 ο Μόρτον ο καθηγητής «Ασθενειών του Νου και του Νευρικού Συστήματος και της Ηλεκτροθεραπευτικής» στην Ιατρική Σχολή της Νέας Υόρκης και ένας από τους πρώτους Αμερικανούς γιατρούς που πειραματίστηκαν με τις νέες ακτίνες, δημοσίευσε το έργο του «The X- Ray; Or Photography of the invisible and its value to Surgery», όπου για πρώτη φορά περιγράφονται οι περιπτώσεις που μπορούσε να γίνει χρήση των ακτίνων.

Το 1896, ένα χρόνο μόλις μετά την ανακάλυψη των ακτίνων X από τον Roentgen, οι Eduard Haschek και Otto Theodor Lindenthal εκτέλεσαν την πρώτη αγγειογραφία ομοιόμορφης αντίθεσης (ή ακτινογραφία ενισχυμένης αντίθεσης) στις φλέβες ενός ακρωτηριασμένου χεριού, όπως φαίνεται στην εικόνα 34, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα κιμωλίας, θειούχου υδραργύρου και βαζελίνης (Kusuyama, 2011). Η τεχνική αυτή δε χρησιμοποιήθηκε στην κλινική πράξη τις επόμενες δύο δεκαετίες. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1920 μέχρι και το 1950 η χρήση της ήταν εξαιρετικά σπάνια.

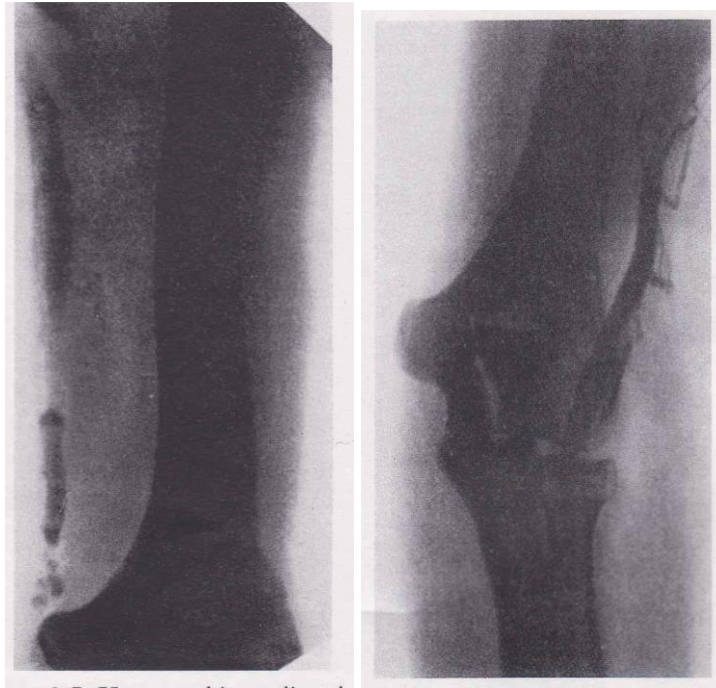
Η χρησιμότητα των αγγειογραφικών μεθόδων θα πρέπει να αναζητηθεί στις αρχές του 1923, όταν ο Osborn σε μία προσπάθεια για θεραπεία της σύφιλης παρατήρησε πως η ενδοφλέβια χορήγηση ιωδιούχου νατρίου μετέτρεψε την ουροδόχο κύστη σε ακτινοσκιερή, με αποτέλεσμα να μπορούν να απεικονιστούν με ακρίβεια βλάβες στα

αγγεία που δεν ήταν προηγουμένως ορατές με χρήση άλλων μεθόδων (Franch, King, & Douglas, 1990).



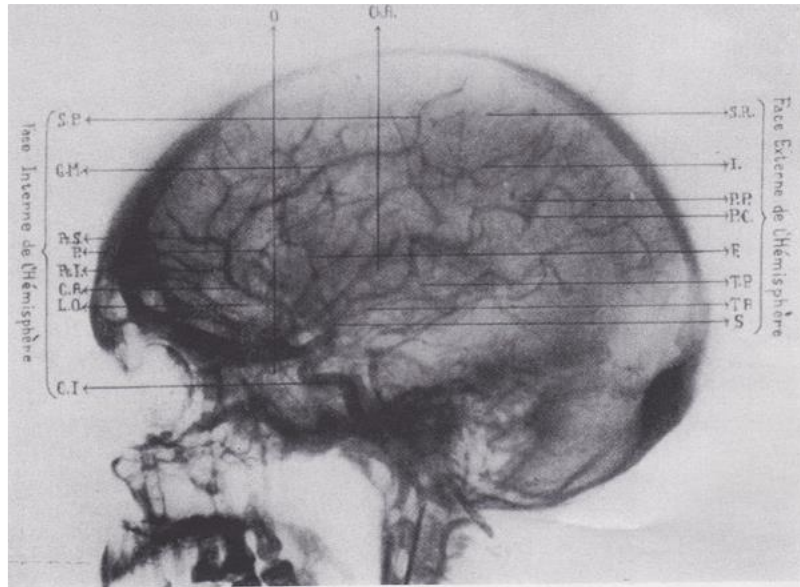
Εικόνα 34. Εικόνα του ακρωτηριασμένου χεριού όπως προέκυψε από την ακτινογραφία των Lindenthal & Haschek, Πηγή: (Kusuyama, 2011)

Το 1923 οι Berberich και Hirsch διενέργησαν τις πρώτες αρτηριογραφίες και φλεβογραφίες σε ανθρώπινα υποκείμενα, χρησιμοποιώντας μείγμα με περιεκτικότητα 20% σε βρωμιούχο στρόντιο, (εικόνα 35).



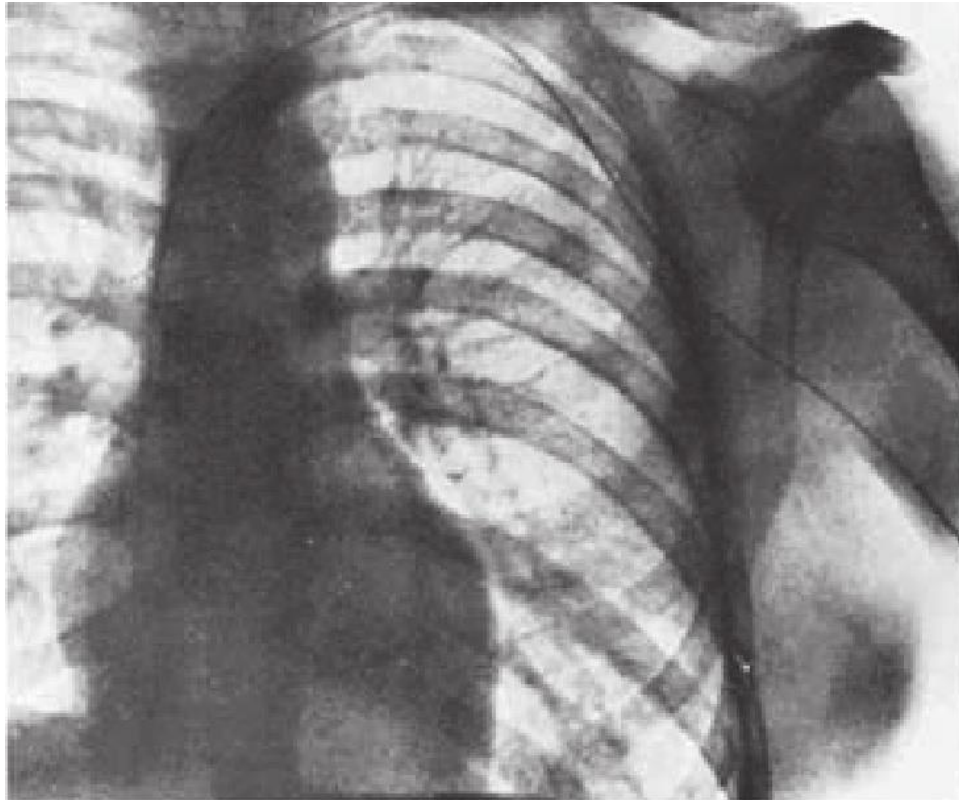
Εικόνα 35. Εικόνα ραδιογραφήματος των Berberich και Hirsch, πηγή: (Kusuyama, 2011)

Για πρώτη φορά η αγγειογραφία ως απεικονιστική μέθοδος για την κατάσταση των αγγείων του εγκεφάλου χρησιμοποιήθηκε το 1920 από τον Moniz, ο οποίος και πραγματοποίησε έγχυση διαλύματος ιωδιούχου νατρίου στην καρωτίδα αρτηρία προκειμένου να απεικονιστεί η ενδοκρανιακή κυκλοφορία. Δυστυχώς αυτή η προσπάθεια δεν ήταν επιτυχημένη και ο ασθενής κατέληξε. Αυτή η πρώτη απόπειρα ωστόσο, βοήθησε στη συνειδητοποίηση της σημασίας της αγγειογραφίας ως απεικονιστικής μεθόδου για μία σειρά νευροαγγειακών διαταραχών και στην προσπάθεια ανεύρεσης υλικών και τεχνικών που θα έκαναν την εξέταση ασφαλέστερη για τον ασθενή και αποτελεσματική απεικονιστική (Ligon, 1998). Ο ίδιος ερευνητής και η ομάδα του προχώρησαν το 1928 στη διενέργεια της αγγειογραφίας καρωτίδας για την ανίχνευση εγκεφαλικών βλαβών (εικόνα 36). Ο Moniz τιμήθηκε το 1949 με το Βραβείο Nobel για την εφεύρεση τεχνικής για την αγγειογραφία του εγκεφάλου.



Εικόνα 36. Αγγειογραφία εγκεφάλου από τον Moniz, Πηγή: (Moniz E. J Radiol Electrol Med Nucl 1928;12:72.)

Ο πρώτος αγγειακός καθετηριασμός σε ζωντανό άνθρωπο είναι αυτός που εκτέλεσε στον εαυτό του ο Werner Forssmann το 1929. Είχε προηγουμένως δει μια εικόνα βιβλίου που έδειχνε πώς ένας σωλήνας που εισήχθη στην καρδιά ενός αλόγου μέσω μιας φλέβας, οδηγούσε με τη βοήθεια ενός μπαλονιού σε αλλαγές στην πίεση. Ο Forssmann ήταν πεπεισμένος ότι ένα παρόμοιο πείραμα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε ανθρώπους. Από την άκρη του χεριού του εισήγαγε έναν λεπτό καθετήρα μέσω μιας φλέβας στην καρδιά του και τράβηξε μια φωτογραφία με ακτίνες X, χρησιμοποιώντας ένα καθρέπτη που βρισκόταν μπροστά από μια οθόνη ακτινοσκοπίου. Το τολμηρό πείραμα του Forssmann καταδικάστηκε εκείνη την εποχή ως ανόητο και επικίνδυνο και δέχτηκε σφοδρή κριτική. Το πείραμα άνοιξε ωστόσο το δρόμο για πολλούς τύπους καρδιολογικών μελετών. Οι εργασίες του, του χάρισαν το 1956 το Νόμπελ Ιατρικής, (εικόνα 37).



Εικόνα 37. Ο πρώτος καρδιακός καθετηριασμός από τον Forssmann, Πηγή: (Kusuyama, 2011)

Η ιδέα της έγχυσης σκιαγραφικού μέσου στις στεφανιαίες αρτηρίες κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής καρδιακής δραστηριότητας για σχεδόν 2 δεκαετίες είχε σχεδόν εγκαταλειφτεί. Μέχρι και τις αρχές τις δεκαετίας του 1940, η αγγειογραφική απεικόνιση των στεφανιαίων αρτηριών θεωρούνταν επικίνδυνη και πιθανώς θανατηφόρα και αντί αυτής επιλέγονταν άλλες μεθόδους απεικόνισης. Το 1932 ο Loro de Carvalho πραγματοποίησε την πρώτη πνευμονική αγγειογραφία μέσω φλεβικής παρακέντησης άνω μέλους. Ο Πορτογάλος καρδιολόγος Eduardo de Arayjo Coelho το 1934 δημοσίευσε στη Γαλλία την πρώτη ευρωπαϊκή μονογραφία για το έμφραγμα του μυοκαρδίου με τίτλο «L'Infarctus du Myocarde» και διενήργησε τις πρώτες στεφανιαίες αγγειογραφίες σε ζωντανό άνθρωπο. Ο Coelho παρατήρησε την συσχέτιση μεταξύ παθολογικών αλλοιώσεων που εμφανίζονται στις στεφανιαίες αρτηρίες και το έμφραγμα του μυοκαρδίου (CardioPulseArticles, 2010).

Η διαδικασία του Forssmann, με μικρές τροποποιήσεις εφαρμόστηκε το 1941 από τους Richards και Cournand και έκτοτε έχει γίνει ένα εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο στη διάγνωση και την έρευνα. Κατέστησε δυνατή μεταξύ άλλων, την ακριβή μέτρηση της ενδοκαρδιακής πίεσης και της ροής του αίματος, την έγχυση στην καρδιά

φαρμάκων και σκιαγραφικού μέσου και την εισαγωγή ηλεκτροδίων για τη ρύθμιση του καρδιακού παλμού (Vecchia, 2012).

Το 1953 ο Σουηδός ακτινολόγος Seldinger ανέπτυξε μια τεχνική (γνωστή σήμερα ως τεχνική Seldinger) που επέτρεψε τη διαδερμική τοποθέτηση ειδικού μικρού σχετικά καθετήρα. Αυτή η εξέλιξη αποδείχθηκε επαναστατική, καθώς μέχρι τότε η πρόσβαση στο αγγειακό σύστημα γινόταν με μεγάλες βελόνες αυξάνοντας έτσι πιθανές παρενέργειες της εξέτασης καθώς και το βαθμό δυσφορίας των ασθενών. Η τεχνική του χρησιμοποιείται ελαφρά τροποποιημένη μέχρι και σήμερα.

Ωστόσο η απαρχή της επεμβατικής ακτινολογίας έγινε το 1965 όταν ο Charles Dotter με αφορμή καρδιακούς καθετηριασμούς, μίλησε για τη δυνατότητα καθετηριασμού σε εκτέλεση επεμβάσεων. Κατά τον προαναφερόμενο η μέθοδος του αγγειογραφικού καθετηριασμού μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα διαδικασιών, ανοίγοντας με αυτό τον τρόπο δρόμους στη νέα ειδικότητα: αυτή του επεμβατικού ακτινολόγου. Στις μελέτες του οφείλεται και ο όρος «διαδερμική διαυλική αγγειοπλαστική» που χρησιμοποιείται μέχρι και τις μέρες μας. Το 1977 μία σειρά ερευνητών ανάμεσα στους οποίους ήταν και ο Gruntzig, εισήγαγαν την τεχνική της αγγειοπλαστικής με μπαλόνι, γνωστή και ως διαδερμικής στεφανιαίας αγγειοπλαστικής (Gruntzig, Senning, & Siegenthaler, 1979).

Η εμφάνιση της ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας (DSA) το 1980 σηματοδότησε την αρχή μιας νέας εποχής τόσο στη διαγνωστική χρησιμότητα της αγγειογραφίας με ακτίνες X, όσο και στην ικανότητα εκτέλεσης ελάχιστα επεμβατικών ενδαγγειακών επεμβάσεων. Οι διαγνωστικές ενδείξεις για DSA περιλαμβάνουν την αξιολόγηση ανευρυσμάτων σε υπαραχνοειδή αιμορραγία όταν η αξονική αγγειογραφία και η μαγνητική τομογραφία (CTA/MR) είναι αρνητικές, την ακριβή εκτίμηση αρτηριοφλεβικών δυσπλασιών και την ενδοεγκεφαλική αιμορραγία άγνωστης αιτιολογίας. Οι ενδοαγγειακές νευροεπεμβατικές διαδικασίες με ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία περιλαμβάνουν μηχανική θρομβεκτομή σε οξύ εγκεφαλικό επεισόδιο, περιέλιξη ανευρύσματος κ.ά.

Στα χρόνια που ακολούθησαν έγιναν προσπάθειες για βελτίωση των συστημάτων απεικόνισης, τα ιατροτεχνολογικά υλικά καθετηριασμού και τα φιλμ που χρησιμοποιούνταν έγιναν ασφαλέστερα για τους ασθενείς και πιο αποτελεσματικά σχετικά με τη διάγνωση.

Για πολλές δεκαετίες η αγγειογραφία με καθετήρα αποτελούσε την εξέταση εκλογής για την ακριβή ανατομική απεικόνιση των αιμοφόρων αγγείων. Σήμερα η πρόοδος που σημειώθηκε στον τομέα της απεικόνισης οδήγησε στη χρήση της υπολογιστικής τομογραφίας, καθώς και της μαγνητικής τομογραφίας και διάφορων υπερηχογραφικών τεχνικών που αντικατέστησαν τον επεμβατικό καθετηριασμό. Επιπρόσθετα η μετ-επεξεργασία εικόνας που κατέστη δυνατή με την ανάπτυξη της τεχνολογίας καθώς και η χρήση συστοιχιών ανιχνευτών πολλαπλών σειρών, λυχνίας ακτίνων X υψηλού φορτίου έκαναν δυνατή την ακριβέστερη σάρωση και συνακόλουθα την εξατομίκευση των θεραπευτικών πρωτοκόλλων για κάθε ασθενή⁸(Dolmatch, 2005).

⁸Dolmatch, B.L. (2005). "The history of Angiography" *Endovascular today*online at: https://assets.bmctoday.net/evtoday/pdfs/EVT0705_vu_Dolmatch.pdf

B: Διαφορές αξονικής τομογραφίας- Αγγειογραφίας και ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας

Η αξονική αγγειογραφία (CTA) είναι μια μη επεμβατική διαγνωστική εξέταση που χρησιμοποιεί ακτίνες X και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή παράγονται εικόνες διαφόρων αγγείων του σώματος. Οι εικόνες των εξεταζόμενων οργάνων έχουν τη μορφή εγκάρσιας φέτας και η απεικόνιση που προκύπτει βασίζεται στη σύνθεση πολλαπλών προβολών των εγκάρσιων τομών που συνδυαζόμενες δημιουργούν την εικόνα του εξεταζόμενου αγγείου. Η σημασία της σύγχρονης αξονικής αγγειογραφίας είναι πολύ μεγάλη. Για μία ολοκληρωμένη αγγειογραφική μελέτη το μόνο που χρειάζεται είναι η έγχυση του ειδικού σκιαγραφικού υγρού στον ασθενή και χρόνος της εξέτασης δεν υπερβαίνει τα 15 λεπτά. Οι χρόνοι σάρωσης ακόμη και για την πιο ολοκληρωμένη μελέτη είναι κάτω από 1 λεπτό. Όταν ολοκληρωθεί η σάρωση, ο ασθενής μπορεί να φύγει. Φυσικά αποφεύγονται όλοι οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την επεμβατική αγγειογραφία, με εξαίρεση την ενδοφλέβια χορήγηση σκιαγραφικού και την έκθεση σε ακτινοβολία (Dolmatch, 2005). Η αξονική αγγειογραφία αποτελεί χρήσιμο απεικονιστικό εργαλείο, καθώς δεν τους επιβαρύνει τόσο πολύ με δόση τον ασθενή, δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία, ούτε και είναι απαραίτητη η παρακολούθησή και νοσηλεία του ασθενούς του μετά την εξέταση, ούτε η επανεξέταση των παραμέτρων πήξης ή η τροποποίηση αντιπηκτικών ή αντιαιμοπεταλιακών φαρμάκων. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τον καθετηριασμό αποφεύγονται πλήρως. Τα πρωτόκολλα σάρωσης είναι εύκολο να τυποποιηθούν και οι περισσότεροι τεχνολόγοι είναι σε θέση να επιτύχουν αξιόπιστες εξετάσεις χωρίς την άμεση συνεργασία με επεμβατικό ιατρό. Χρόνος εξοικονομείται περαιτέρω, επειδή οι περισσότερες αξονικές αγγειογραφίες απαιτούν 15 λεπτά έως 45 λεπτά (κυρίως για διάγνωση), την ώρα που η συμβατική αγγειογραφία με καθετήρα καταναλώνει τουλάχιστον μία ώρα ή περισσότερο από το χρόνο του γιατρού από το σημείο άφιξης του ασθενούς μέχρι την αφαίρεση του καθετήρα- πέραν της απαιτούμενης εξέτασης και διάγνωσης. Επιπλέον η αξονική αγγειογραφία επιτρέπει την κατανόηση της διαδικασίας της αγγειακής νόσου πολύ πέρα από ένα επεμβατικό αγγειόγραμμα, επειδή μετρά δεδομένα όγκου και μπορεί να δείξει την αγγειακή ανατομία από οποιονδήποτε προσανατολισμό ή επίπεδο (Dolmatch, 2005).

Η ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία (Digital Subtraction Angiography - DSA) είναι μία ιδιαίτερη απεικονιστική επεμβατική τεχνική για τον εντοπισμό αγγειακών παθήσεων. Η απεικονιστική εξέταση των αγγείων που προκύπτουν, δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για τη διάγνωση διάφορων ασθενειών, όπως εμφράγματα, στενώσεις αρτηριών, ανευρύσματα κλπ. Ένας αριθμός μελετών συνέκρινε την αξονική αγγειογραφία (CTA) με την ψηφιακή αφαιρετική αγγειογραφία των κάτω άκρων, και της νεφρικής αρτηρίας. Ο Rubin βρήκε συγκρίσιμα διαγνωστικά αποτελέσματα μεταξύ αξονικής αγγειογραφίας και ψηφιακής αφαιρετικής αγγειογραφίας για περιφερειακά αγγεία απορροής, με το ένα τέταρτο της δόσης ακτινοβολίας, με τη χρήση αξονικής αγγειογραφίας. (Rubin, Schmidt, & Logan, 2001) Οι Willmann et al κατέδειξαν τη χρησιμότητα της αξονικής αγγειογραφίας για την αξιολόγηση μοσχευμάτων περιφερικής αρτηριακής παράκαμψης (Willmann, Mayer, Banyai, & etall, 2003).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι Kaatee et al έδειξαν ότι η αξονική αγγειογραφία μπορεί να προσφέρει συγκρίσιμα αποτελέσματα με την ψηφιακή αφαιρετική για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό της στένωσης της νεφρικής αρτηρίας. Η αξονική αγγειογραφία έδειξε όχι μόνο τον βαθμό στένωσης του αυλού, αλλά και τη συνυπάρχουσα πλάκα. (Kaatee, Beek, DeLange, & etal, 1997)

Οι (Miller, Rochitte, Dewey, Arbab-Zadeh, Niinuma, & Gottlieb, 2008) πραγματοποίησαν πολυκεντρική μελέτη προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια αξονικής αγγειογραφίας πολλαπλών ανιχνευτών 64 σειρών, 0,5 mm σε σύγκριση με τη συμβατική στεφανιογραφία σε ασθενείς με υποψία στεφανιαίας νόσου. Εννέα κέντρα ενέγραψαν 291 ασθενείς που υποβλήθηκαν σε βαθμολόγηση ασβεστίου και αξονική αγγειογραφία πολλαπλών ανιχνευτών πριν από τη συμβατική στεφανιογραφία, χωρίς ωστόσο να προκύψουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων όσον αφορά στην ακρίβεια της διάγνωσης. Οι ερευνητές κατέληξαν πως η αξονική αγγειογραφία πολλαπλών ανιχνευτών δεν μπορεί να αντικαταστήσει τη συμβατική στεφανιογραφία επί του παρόντος.

Οι (Gorenoi, Schönermark, & Hagen, 2012) πραγματοποίησαν το 2010 συστηματική βιβλιογραφική αναζήτηση σε ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων (MEDLINE, EMBASE κ.λπ.) σχετικά με την προγνωστική αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων όσον αφορά στον εντοπισμό καρδιακών στενώσεων. Τα αποτελέσματα

της μελέτης συνδυάστηκαν σε μια μετα-ανάλυση με 95 % διάστημα εμπιστοσύνης. Δεν βρέθηκαν μελέτες σχετικά με την κλινική αποτελεσματικότητα ή την προγνωστική αξία της αξονικής στεφανιαίας αγγειογραφίας έναντι της συμβατικής. Επιπλέον ενώ η πρώτη είχε ποσοστό διαγνωσιμότητας 96%, η δεύτερη περιορίστηκε στο 80%.

Η αξονική αγγειογραφία σήμερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η μοναδική αγγειογραφική τεχνική πριν από τη θεραπεία του ανευρύσματος κοιλιακής αορτής με ενδομοσχεύματα, καθιστώντας την αγγειογραφία με καθετήρα περιττή για τις περισσότερες περιπτώσεις. Έτσι, είναι πιθανό πολλοί επεμβατικοί καρδιακοί καθετηριασμοί να αντικατασταθούν από την προαναφερόμενη τεχνική (Dolmatch, 2005).

Αντί Επιλόγου

Από το 1895 όταν ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά οι ακτίνες X, η πρόοδος στον τομέα της διάγνωσης και της θεραπείας διαφόρων ασθενειών υπήρξε τεράστια, και το κυριότερο συνεχίζει να εξελίσσεται. Πρωτοπόροι στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, της μηχανικής και της ιατρικής επιστήμης εργάστηκαν πολλές φορές και με κίνδυνο της ζωής τους, ώστε να έχουμε σήμερα τα θαυμαστά επιτεύγματα των αξονικών τομογράφων και αγγειογράφων που βελτίωσαν την ποιότητα και το προσδόκιμο ζωής του σύγχρονου κόσμου. Η αρχικά απλή και θολή απεικόνιση του «αόρατου» κόσμου των αγγείων σε λιγότερο από ένα αιώνα έδωσε τη θέση της σε τρισδιάστατες απεικονίσεις που βελτίωσαν τη διαγνωστική δυνατότητα και συνακόλουθα και της προσπάθεια θεραπείας πλήθους ασθενειών.

Τα σύγχρονα συστήματα υπολογιστικών τομογράφων είναι πλέον σε θέση να προσφέρουν άμεση απεικόνιση των αγγείων και των ιστών του ανθρώπινου σώματος σε ελάχιστο χρόνο μόνο με τη χρήση σκιαστικού μέσου και την τοποθέτηση ενός απλού φλεβοκαθετήρα. Δίνεται έτσι η δυνατότητα ανάδειξης αγγειακών παθολογιών ή δυσπλασιών, όγκων, εγκεφαλικών επεισοδίων κ.α. σε ιδιαίτερα πρώιμα στάδια με μία μη επεμβατική, σύντομη και με μεγάλη διαθεσιμότητα μέθοδο. Παράλληλα, η τεχνολογική εξέλιξη και η χρήση νέων ασφαλέστερων υλικών κατέστησαν και την συμβατική αφαιρετική αγγειογραφία πιο ασφαλή και αποτελεσματική και σίγουρα αναντικατάστατη λόγω και του θεραπευτικού της χαρακτήρα έναντι της αξονικής αγγειογραφίας. Οι παραπάνω μέθοδοι σε συνδυασμό ή εξατομικευμένα ανάλογα πάντα με το ερώτημα και την κλινική εικόνα του ασθενούς αποτελούν εξετάσεις εκλογής για απεικόνιση και μελέτη των οργάνων και των αγγείων του ανθρώπινου σώματος. Οι επεμβατικές τεχνικές, όπως η ψηφιακή αγγειογραφία κατέχουν σημαντικό ρόλο τόσο στην απεικόνιση, όσο και στη θεραπεία παθολογιών και ανωμαλιών των αγγείων.

Βιβλιογραφία

- Alegría, J., & Holmes, D. (2016, June). *History of Coronary Balloon Angioplasty and Current Indications*. Ανάκτηση June 11, 2022, από Thoracic Key: <https://thoracickey.com/history-of-coronary-balloon-angioplasty-and-current-indications/>
- Ambrose, J. (1996). You never know what's just around the next corner. *Rivista Neuroradiology*, 9 (4), σσ. 399-404.
- Ambrose, J., & Hounsfield, G. (1973). Computerized transverse axial tomography. *Journal of British Institute of Radiology*, 46, σσ. 148-49.
- Beckmann, E. (2014, March 5). *CT scanning the early days*. Ανάκτηση June 02/06/2022, 2022, από <https://www.birpublications.org/doi/10.1259/bjr/29444122>
- Berrington, d. G., Mahesh, M., Kim, K., Bhargavan, M., Lewis, R., Mettler, F., και συν. (2009, December 14). Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Archives of Internal Medicine*, 169 (22), σσ. 2071-2077.
- Brenner, D., & Hall, E. (2007). Computed Tomography - An Increasing Source of Radiation Exposure. *The New England Journal of Medicine*, 357, σσ. 2277-2284.
- Bull, J. (. (1980). The History of Computed Tomography. Στο J. Caillé, & G. Salamon, *Computerized Tomography* (σσ. 3-6). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Buzug, T. (2008). Milestones of Computed Tomography. Στο *Computed Tomography* (σσ. 75-100). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Buzzi, A., & Suárez, M. (2013). Tomografía lineal: nacimiento, gloria y ocaso de un método. *Revista argentina de radiología.*, 77. [10.7811/rarv77n3a10](https://doi.org/10.7811/rarv77n3a10).
- CardioPulse Articles, C. (2010, April). *European Heart Journal*, 31 (7), σσ. 757-763.
- Cheon, J. E. (2015). Quantitative digital subtraction angiography in pediatric moyamoya disease. . *Journal of Korean Neurosurgery. Society*, 57, σσ. 432-435.
- Chng, S. M., Petersen, E. T., Zimine, I., Sitoh, Y. Y., Lim, C., & Golay, X. (2008). Territorial arterial spin labeling in the assessment of collateral circulation: comparison with digital subtraction angiography. *Stroke* 39, 39, σσ. 3248–3254.
- Doi, K., Morita, K., & Sakuma, S. (2012.). Shinji Takahashi, M.D.(1912–1985): pioneer in early development toward CT and IMRT. *Radiological Physics and Technology*, 5, σσ. 1-4.
- Dolmatch, B. T. (2005). *IMAGING & DIAGNOSTICS*. Ανάκτηση από Endovascular today: https://assets.bmctoday.net/evtoday/pdfs/EVT0705_vu_Dolmatch.pdf

- Doss, M. (2014). Linear no-threshold model may not be appropriate for estimating cancer risk from CT. *Radiology*, 270, σσ. 307-308.
- Fazel, R., Krumholz, H., Wang, Y., Ross, J., Chen, J., Ting, H., και συν. (2009). Exposure to low-dose ionizing radiation from medical imaging procedures. *New England Journal of Medicine*, σσ. 849-857.
- Filler, A. (2009). The History, Development and Impact of Computed Imaging in Neurological Diagnosis and Neurosurgery: CT MRI, and DTI. *The Internet Journal of Neurosurgery*, 7 (1), σσ. 1-37.
- Franch, R., King, S., & Douglas, J. (1990). Techniques of cardiac catheterization including coronary arteriography. Στο H. JW, S. RC, R. CE, & e. al, *The Heart*, (7th ed εκδ., σσ. 1858-1898). New York: cGraw-Hill.
- Goldman, W. (2007, September). Principles of CT and CT Technology. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 35 (3), σσ. 115-128.
- Gorenoi, V., Schönemark, M. P., & Hagen, A. (2012). CT coronary angiography vs. invasive coronary angiography. *CHD. GMS health technology assessment*, 8, σ. <https://doi.org/10.3205/hta000100>.
- Gruntzig, A., Senning, A., & Siegenthaler, W. (1979). Nonoperative dilatation of coronary-artery stenosis: percutaneous transluminal coronary angioplasty. *New England Medicine*, 301 (2), σσ. 61-68.
- Hsieh, J., & Flohr, T. (2021). Computed tomography recent history and future perspectives. *Journal of Medical Imaging*, 8 (5).
- Ilangovan, R., Burling, D., George, A., Gupta, A., Marshall, M., & Taylor, S. A. (2012). CT enterography: review of technique and practical tips. *The British journal of radiology*, 85 (101), σσ. 876-886.
- Kaatee, R., Beek, F., De Lange, E., & et al. (1997). Renal artery stenosis: detection and quantification with spiral CT angiography versus optimized digital subtraction angiography. *Radiology*, 205, σσ. 121-127.
- Kim, D., Pickhardt, P., Taylor, A., Leung, W., Winter, T., Hinshaw, J., και συν. (2007). CT colonography versus colonoscopy for the detection of advanced neoplasia. *New England Journal of Medicine*, 357, σσ. 1403-1412.
- Koehler, P. (2022, May 15). *World Neurology*. Ανάκτηση June 7, 2022, από Early Endeavors to Build a CT Scan: The Ukraine Pioneers: <https://worldneurologyonline.com/article/early-endeavors-to-build-a-ct-scan-the-ukraine-pioneers/>
- Kotzur, I. (1994). Kotzur, IM. *Radiology*, 193, σσ. 329-332.

- Kumamaru, K. K., Hoppel, B. E., Mather, R., & Rybicki, F. J. (2010). CT angiography: current technology and clinical use. *Radiologic clinics of North America*, 48 (2), σσ. 213-235.
- Kusuyama, T. (2011, November). *History of Coronary Angiography*. Ανάκτηση May 29/05/2022, 2022, από <https://www.researchgate.net/publication/221919486>
- Ligon, B. (1998). The mystery of angiography and the unawarded nobel prize: Egas Moniz and Hans Christian Jacobaeus. *Neurosurgery*, 43, σσ. 602-11.
- Littleton, J., & Durizch, M. (n.d.). *Conventional Tomography*. Ανάκτηση June 9, 2022, από The American Roentgen Ray Society: http://www.arrs.org/publications/hrs/diagnosis/rci_d_c15.pdf
- Margulis, A. (1967). Interventional Diagnostig Radiology. *American Journal of Roentgenology*, 99, σσ. 763-765.
- Mettler, F., Wiest, P., Locken, J., & Kelsey, C. (2000;20). CT scanning: patterns of use and dose. *Joyrnal of Radiology Protection*, σσ. 353-359.
- Miller, J., Rochitte, C., Dewey, M., Arbab-Zadeh, A., Niinuma, H., & Gottlieb, I. (2008). Diagnostic Performance of Coronary Angiography by 64-Row CT. *New England Medicine*, σ. DOI: 10.1056/NEJMoa0806576.
- Mira, J., Potter, L., Fullerton, D., & Ezekiel, J. (1982). Advantages and limitations of computed tomography scans for treatment planning of lung cancer. *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics*, 8 (9), σσ. 1617-1623.
- Mowatt, G., Cook, J., Hillis, G., Walker, S., Fraser, C., Jia, X., και συν. (2008). 64-Slice computed tomography angiography in the diagnosis and assessment of coronary artery disease: systematic review and meta-analysis. *Heart*, 94, σσ. 1386–1393.
- Okamoti, K., Ito, J., Sakai, K., & Yioshimura, S. (2000). The Principle of Digital Subtraction Angiography and Radiological Protection. *Interventional Neuroradiology*, 6 (1), σσ. 25-31.
- Omeh, J., & Shlofmitz, E. (2022). *Angiography*. Treasure Island: StatPearls Publishing.
- Pickhardt, P., Hassan, C., Halligan, S., & Marmo, R. (2011). Colorectal cancer: CT colonography and colonoscopy for detection-systematic review and meta-analysis. *Radiology*, 259, σσ. 393-405.
- Power, S., Moloney, F., Twomey, M., James, K., O'Connor, O., & Maher, M. (2016). Computed tomography and patient risk: Facts, perceptions and uncertainties. *World Journal of Radiology*, 8 (2), σσ. 902-915.

- Power, S., Moloney, F., Twomey, M., James, K., O'Connor, O., & Maher, M. (2016). Computed tomography and patient risk: Facts, perceptions and uncertainties. *World Journal of Radiology*, 8 (12), σσ. 902-915.
- Raptopoulos, V., Schwartz, R., McNicholas, M., Movson, J., Pearlman, J., & Joffe, N. (1997). Multiplanar helical CT enterography in patients with Crohn's disease. *AJR Am J Roentgenol*, 169, σσ. 1545-1550.
- Robb, W. (2003). Perspective on the First 10 Years of the CT Scanner Industry. *Academic Radiology*, 10 (7), σσ. 756-760.
- Royal, H. (2008). Effects of low level radiation-what's new? *Seminart in nuclear Medicine*, 38 (5), σσ. 392-402.
- Rubin, G., Schmidt, A., & Logan, L. (2001). Multi-detector row CT angiography of lower extremity arterial inflow and runoff: initial experience. *Radiology*, 221, σσ. 146-158.
- Schulz, A., Stein, A., & Pelc, J. (2021). How CT happened: the early development of medical computed tomography. *Journal of Medical Imaging*, 8 (5), σ. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.8.5.052110>.
- Sheldon, J., Janowitz, W., Leborgne, J., Sivina, M., & Rojo, N. (1984). Intravenous DSA of extracranial carotid lesions: comparison with other techniques and specimens. *American Journal of Roentgenology*, 143, σσ. 1289-1294.
- Söderman, M., Holmin, S., Andersson, T., Palmgren, C., Babić, D., & Hoornaert, B. (2013). Image Noise Reduction Algorithm for Digital Subtraction Angiography: Clinical Results. *Radiology*, 269 (2), σσ. 553-560.
- Stein, P., Yaekoub, A., Matta, F., & Sostman, H. (2008). 64-slice CT for diagnosis of coronary artery disease: a systematic review. *American Journal of Medicine*, 121, σσ. 715-725.
- Steiner, T., Perkin, G., Greenhalgh, R., & Clifford-Rose, F. (1987). Neurological morbidity of arch and carotid arteriography for cerebrovascular disease. The influence of contrast medium and radiologist. *British Journal of Radiology* (60), σ. 117 122.
- Tateishi, H., Kuroki, K., Machida, H., & al, e. (2020). Clinical applications of digital angiography with the harmonization function in body interventional radiology. *Japanese Journal of Radiology*, 38, σσ. 922-933.
- Tetelbaum, S. (1957). About a method of obtaining volumetric images by means of X-ray radiation. *Bulletin of the Kiev Polytechnic Institute*, 22, σσ. 154-160.
- Thijssen, H., Merx, J., Mostart, J., Thijssen, M., Wong Chung, R. S., & al., e. (1988). Comparison of brachiocephalic angiography and IV-DSA in the same group of patients. *Neuroradiology*, (30), σσ. 91-97.

- Valk, J., Braun, J., & Wackenheim, A. (1994). George Ziedses des Plantes. *Neuroradiology*, 36, σσ. 85-86.
- Vecchia, L. (2012). The History of Research on Coronary Angiography and Coronary Angioplasty. Στο M. Picichè, *Dawn and Evolution of Cardiac Procedures*. (σσ. 145-162).
- Wang, L., Mannalithara, A., Singh, G., & Ladabaum, U. (2018). Low rates of gastrointestinal and non-gastrointestinal complications for screening or surveillance colonoscopies in a population-based study. *Gastroenterology*, 154, σσ. 540-555.
- Willmann, J., Mayer, D., Banyai, M., & et all. (2003). Evaluation of peripheral arterial bypass grafts with multi-detector row CT angiography: comparison with duplex US and digital subtraction angiography. *Radiology*, 229, σσ. 465-474.
- Wold, P., Fletcher, J., Johnson, C., & Sandborn, W. (2003). Assessment of small bowel Crohn disease: noninvasive peroral CT enterography compared with other imaging methods and endoscopy - feasibility study. *Radiology*, 229, σσ. 275-281.
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. (2020). *Επεμβατική ακτινολογία - ψηφιακή αγγειογραφία*. Ανάκτηση 2022, από <https://eeae.gr/%CE%BC%CE%B5-%CE%BC%CE%B9%CE%B1-%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%AC/%CE%B8%CE%AD%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CE%B5%CE%BD%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AD%CF%81%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%82/%CE%B9%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%AD%CE%BA%CE%B>
- Κατσάνος, Κ. (2009). *Μελέτη των αγγειογενετικών και αρτηριογενετικών ιδιοτήτων της θρομβίνης σε πειραματικό μοντέλο ισχαιμίας κάτω άκρων*. Πάτρα: Διδακτορική Διατριβή.
- Μανιάτης, Π. (2002). *Ιστορία της Ιατρικής*. Αθήνα: Εντός.
- Παντελής, Ε. (2021). *Αξονική Τομογραφία*. Ανάκτηση Ιούνιος 8, 2022, από <http://eclass.uoa.gr/courses/>
- Πρωτονοτάριος, Ν. (2019). *Ο μετασχηματισμός Radon, οι γενικεύσεις του και εφαρμογές αυτών στις ιατρικές απεικονίσεις PET και SPECT*. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

ORIGINALITY REPORT

14%	13%	6%	8%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	polynoe.lib.uniwa.gr Internet Source	1 %
2	docplayer.gr Internet Source	1 %
3	nemertes.lis.upatras.gr Internet Source	1 %
4	Submitted to University of Ulster Student Paper	1 %
5	Submitted to Hellenic Open University Student Paper	<1 %
6	www.didaktorika.gr Internet Source	<1 %
7	repository.library.teimes.gr Internet Source	<1 %
8	Submitted to South Bank University Student Paper	<1 %
9	Submitted to University of Johannesburg Student Paper	<1 %