
ΑΣΚΗΣΗ

7

Εικονική εξομοίωση ακτινοθεραπευτικής αγωγής

1. Σκοπός της άσκησης

Το αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι η εικονική εξομοίωση ακτινοθεραπευτικής αγωγής με χρήση κατάλληλου λογισμικού (εικονικού εξομοιωτή). Αρχικά περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία σχεδίασης πλάνου ακτινοθεραπευτικής αγωγής και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες ενός εικονικού εξομοιωτή. Κατά τη διάρκεια της άσκησης θα προσομοιωθούν τα βασικά βήματα σχεδίασης πλάνου ακτινοθεραπευτικής αγωγής με χρήση του εικονικού εξομοιωτή «Γαληνός».

2. Εισαγωγή στην Ακτινοθεραπεία

2.1 Τι είναι ακτινοθεραπεία;

Ακτινοθεραπεία ονομάζεται η χρήση ιοντίζουσας ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας για θεραπευτικούς σκοπούς. Όταν η πηγή της ακτινοβολίας βρίσκεται στο εξωτερικό του ασθενή η ακτινοθεραπευτική αγωγή ονομάζεται *ακτινοθεραπεία εξωτερικής δέσμης* (external beam radiotherapy), και περιλαμβάνει τη χρήση ακτίνων Χ, ακτίνων γ, ή δεσμών ηλεκτρονίων. Αντίθετα, *βραχυθεραπεία* ονομάζεται η ακτινοθεραπευτική αγωγή όπου η πηγή ακτινοβολίας βρίσκεται στο εσωτερικό του ασθενή, και συνήθως γίνεται με εμφύτευση ραδιοϊσοτόπων στην περιοχή του όγκου. Σκοπός της ακτινοθεραπείας είναι να καταστραφούν οι κακοήθεις όγκοι με όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στους υγιείς ιστούς. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάτμηση της συνολικής δόσης ακτινοβολίας και

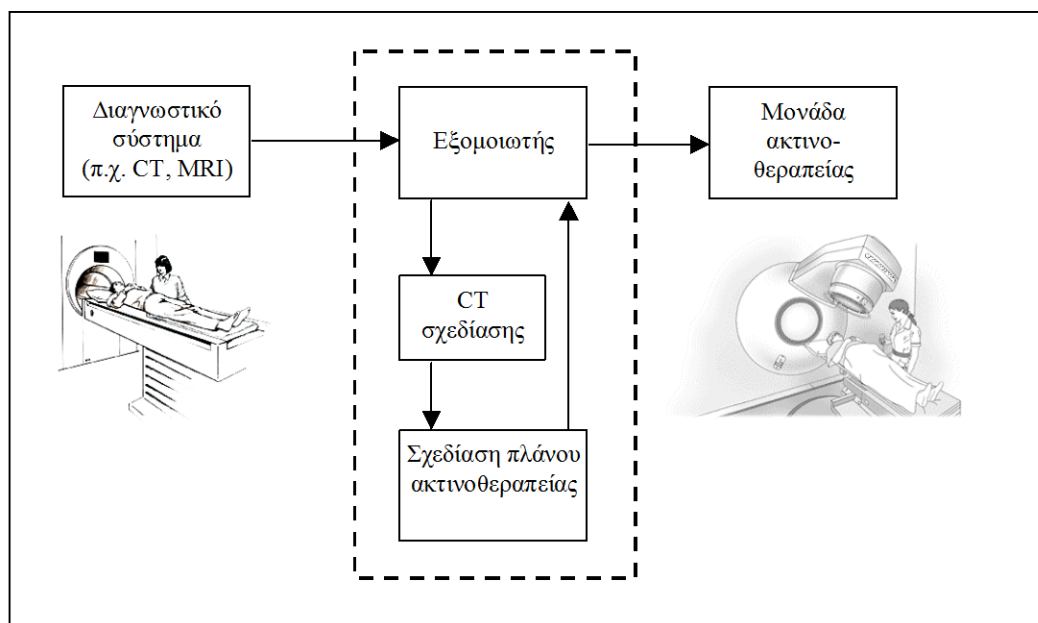
χορήγησή της σε διαδοχικές συνεδρίες έτσι ώστε να καταστρέφονται τα καρκινικά κύτταρα, ενώ παράλληλα να παρέχεται η δυνατότητα στα υγιή κύτταρα να αναρρώσουν.

2.2 Στάδια εργασίας στην ακτινοθεραπεία

Η ακτινοθεραπεία εξωτερικής δέσμης είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη μη επεμβατική μέθοδος για την αντιμετώπιση του καρκίνου. Η διαδικασία της ακτινοθεραπευτικής αγωγής στη συνήθη κλινική πράξη περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Σχ. 1):

- *Διάγνωση*, η οποία γίνεται με τη χρήση προηγμένων διαγνωστικών τεχνικών όπως η αξονική τομογραφία (CT), ή η μαγνητική τομογραφία (MRI), συνήθως σε διαφορετική κλινική ή νοσοκομείο από αυτό όπου σχεδιάζεται και υλοποιείται η ακτινοθεραπευτική αγωγή.
- Εισαγωγή ασθενή στον *εξομοιωτή* πλάνου ακτινοθεραπείας (simulator) για τον εντοπισμό της προς αγωγή ανατομικής περιοχής και τον καθορισμό συστήματος συντεταγμένων πάνω στον ασθενή.
- Εισαγωγή ασθενή στο *CT σχεδίασης* για τη λεπτομερή σάρωση της περιοχής κλινικού ενδιαφέροντος, που είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση πλάνου ακτινοθεραπείας.
- Σχεδίαση πλάνου ακτινοθεραπείας στο *σύστημα σχεδίασης πλάνου ακτινοθεραπείας* (Treatment Planning System – TPS), που περιλαμβάνει τον καθορισμό των περιγραμμάτων ανατομικών περιοχών και των πεδίων ακτινοβολήσης, και τον υπολογισμό της τρισδιάστατης κατανομής δόσης στο σώμα του ασθενή.
- Εισαγωγή ασθενή στον εξομοιωτή για εξομοίωση και επαλήθευση του πλάνου ακτινοθεραπείας που σχεδιάστηκε.
- Ακτινοβολήση του ασθενή στη *μονάδα ακτινοθεραπείας*.

Πάντως, πρέπει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ακολουθείται απλοποιημένη ροή εργασίας στη διαδικασία της ακτινοθεραπευτικής αγωγής. Για παράδειγμα, κατά τη σχεδίαση τυποποιημένων θεραπειών, ο ασθενής οδηγείται από τον αξονικό τομογράφο στον εξομοιωτή, όπου και γίνεται η σχεδίαση πλάνου και ο υπολογισμός δόσης χωρίς τη χρήση ειδικού λογισμικού, και από εκεί οδηγείται απευθείας στη μονάδα ακτινοθεραπείας.



Σχήμα 1. Τα στάδια της ακτινοθεραπευτικής αγωγής

2.3 Αξονικός τομογράφος για σχεδίαση ακτινοθεραπείας

Για τη σχεδίαση ακτινοθεραπείας απαιτείται η ύπαρξη αξονικού τομογράφου είτε συμβατικού ή ελικοειδούς (spiral), ο οποίος θα πρέπει να διαθέτει τραπέζι *επίπεδο* και όχι κοίλο, όπως συνηθίζεται, έτσι ώστε η τοποθέτηση του ασθενή να γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στο τραπέζι του γραμμικού επιταχυντή. Επιπλέον, θα πρέπει να διαθέτει δικτυακή σύνδεση έτσι ώστε τα δεδομένα εξέτασης των ασθενών να είναι διαθέσιμα σε *ψηφιακή μορφή* και η ανάκτησή τους να γίνεται με τη μικρότερη δυνατή παρέμβαση από το χρήστη.

Για τη σχεδίαση απαιτείται η λήψη από τον αξονικό τομογράφο τομών πάχους 2 ως 5 mm (ανάλογα με την υπό εξέταση ανατομική περιοχή). Η ανάλυση των παραγόμενων εικόνων πρέπει να είναι 512×512 pixels. Η μελέτη του ασθενή πρέπει να καλύπτει επαρκώς την ανατομική περιοχή κλινικού ενδιαφέροντος και ενδεχομένως να επεκτείνεται και πέρα από αυτή, έτσι ώστε να επιτρέπει την ακριβή τρισδιάστατη ανακατασκευή της ανατομίας και τον εντοπισμό των όγκων και των κρίσιμων δομών. Για το λόγο αυτό, ο αριθμός των τομών μπορεί να κυμαίνεται από 40 ως 100 (ή και περισσότερες) ανάλογα με την υπό εξέταση ανατομική περιοχή.

Για τη δημιουργία σταθερού συστήματος αναφοράς στο δωμάτιο του αξονικού τομογράφου απαιτείται η ύπαρξη *συστήματος Laser*. Ο εντοπισμός του σημείου αναφοράς γίνεται με την τοποθέτηση ενδεικτών αλουμινίου στα σημεία προβολής της δέσμης Laser στο δέρμα του ασθενή. Οι θέσεις των ενδεικτών αλουμινίου φαίνονται έντονα στις εικόνες αξονικής τομογραφίας. Επιπλέον, το δέρμα του ασθενή χρωματίζεται κατάλληλα στα σημεία που ορίζουν οι ακτίνες των Laser έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή επανατοποθέτηση του ασθενή στο γραμμικό επιταχυντή.

2.4 Εξομοιωτής

Ο εξομοιωτής διαθέτει πανομοιότυπα χαρακτηριστικά (γεωμετρικά, μηχανικά, οπτικά) με τη μονάδα ακτινοθεραπείας, μόνο που αντί για υψηλής ενέργειας ακτινοβολία χρησιμοποιεί ακτίνες X χαμηλής ενέργειας. Η εξομοίωση ακτινοθεραπείας αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα στη σωστή και αξιόπιστη σχεδίαση ακτινοθεραπευτικής αγωγής, και συνίσταται στον ακριβή *εντοπισμό* της προς αγωγή ανατομικής περιοχής και τον καθορισμό των γεωμετρικών ορίων της. Ακόμα, εξασφαλίζει τη σωστή *τοποθέτηση του ασθενή*, σε συμφωνία με το σύστημα συντεταγμένων της μονάδας ακτινοθεραπείας, με το σχεδιασμό στην επιφάνεια του δέρματος του ασθενή κατάλληλων ενδεικτών που θα βοηθήσουν στη σωστή επανατοποθέτησή του, όπως και στην *τοποθέτηση των πεδίων ακτινοβολίας*. Τέλος, ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται μετά τη σχεδίαση για την *επαλήθευση* του πλάνου ακτινοθεραπείας.

2.5 Υπολογιστικό σύστημα σχεδίασης πλάνου ακτινοθεραπείας

Η κατεξοχήν σχεδίαση του πλάνου ακτινοθεραπευτικής αγωγής με βάση τις εικόνες CT του ασθενή γίνεται με χρήση κατάλληλου λογισμικού, του συστήματος σχεδίασης αγωγής (TPS). Σε αυτό σχεδιάζονται τα περιγράμματα του προς στόχευση όγκου και των κρίσιμων δομών σε κάθε μία από τις διαθέσιμες CT εικόνες, και επιλέγονται και βελτιστοποιούνται οι παράμετροι αγωγής με σκοπό την απορρόφηση αποτελεσματικής δόσης ενέργειας από τον στοχευόμενο όγκο και ταυτόχρονα την προστασία κρίσιμων δομών. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με ακτινοβολία από διαφορετικές κατευθύνσεις γύρω από τον ασθενή, και συχνά με χρήση blocks (φραγμάτων δέσμης) κατασκευασμένων από βαρύ υλικό που τοποθετούνται στη δέσμη για την προστασία των κρίσιμων δομών. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απορρόφηση της δόσης μέσα στο σώμα του ασθενή, η οποία

παρουσιάζεται με τη μορφή γραμμών ή επιφανειών που χαρακτηρίζονται από την ίδια πυκνότητα ενέργειας (ισοδοσιακές καμπύλες / επιφάνειες). Μετά την τελική τεκμηρίωση του σχεδίου, αυτό επαναπροωθείται στον εξομοιωτή όπου γίνεται η επαλήθευση με την παρουσία του ασθενή.

2.6 Μονάδα ακτινοθεραπείας

Σήμερα η μονάδα ακτινοθεραπείας που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι ο γραμμικός επιταχυντής (linear accelerator – linac). Περιλαμβάνει το *τραπέζι* του ασθενή (table), το *βραχίονα* (gantry) και τον *κατευθυντήρα* της δέσμης (beam collimator). Το τραπέζι διαθέτει δυνατότητες μετατόπισης κατά μήκος τριών ορθογωνίων διευθύνσεων, καθώς και περιστροφής περί κατακόρυφο άξονα. Ο βραχίονας διαθέτει δυνατότητα περιστροφής περί τον άξονά του. Το σημείο τομής των αξόνων περιστροφής τραπεζιού και βραχίονα ονομάζεται *ισόκεντρο*. Ο κατευθυντήρας διαθέτει δυνατότητα περιστροφής και μεταβολής του εύρους των σιαγόνων του.

2.7 Εικονικός εξομοιωτής

Η χρήση εξομοιωτή στη συνήθη κλινική πρακτική της ακτινοθεραπείας συνεπάγεται πολλές μετακινήσεις ασθενών, μεγάλο φόρτο εργασίας, και καθυστερήσεις στη συνολική σχεδίαση. Η εισαγωγή της αξονικής τομογραφίας και η χρήση υπολογιστικών συστημάτων που επιτρέπουν υπολογισμούς υψηλής ακρίβειας και επαναληψιμότητα των εργασιών, οδήγησαν στην εμφάνιση του *εικονικού εξομοιωτή* (Virtual Simulator – VS). Ο εικονικός εξομοιωτής αποτελεί λογισμικό που στοχεύει στην αντικατάσταση του συμβατικού εξομοιωτή έτσι ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός του όγκου-στόχου της ακτινοθεραπείας και των κρίσιμων ανατομικών δομών, και η τοποθέτηση των πεδίων ακτινοβολίας, χωρίς να απαιτείται η *φυσική παρουσία* του ασθενή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται «εικονική» (virtual) η διαδικασία σχεδίασης της ακτινοθεραπευτικής αγωγής, αφού χρησιμοποιούνται ψηφιακά δεδομένα ασθενών και όχι οι ίδιοι οι «πραγματικοί» ασθενείς.

3. Εικονική Εξομοίωση

Η εικονική εξομοίωση οδηγεί σε *εξορθολογισμό* της διαδικασίας σχεδίασης ακτινοθεραπείας με την *μείωση των μετακινήσεων* του ασθενή, τη *μείωση χρήσης του εξομοιωτή*, και την *εξοικονόμηση χρόνου*. Επίσης, παρέχει αυξημένες δυνατότητες για *τηλεματική συνεργασία* με απομακρυσμένες κλινικές ή νοσοκομεία που δεν διαθέτουν σύγχρονο και ακριβό εξοπλισμό, καθώς και για *εκπαιδευτική χρήση*, εφόσον βασίζεται στη χρήση του «ψηφιακού» ασθενή, ο οποίος είναι πια «εικονικά διαθέσιμος» μέσω των τομογραφικών του δεδομένων.

Κατά τη διαδικασία εικονικής εξομοίωσης παρέχεται ένα σύνολο δυνατοτήτων και εργαλείων στο χρήστη του εικονικού εξομοιωτή, ώστε αυτός να διευκολύνεται στη σχεδίαση ακτινοθεραπευτικής αγωγής. Οι δυνατότητες του εικονικού εξομοιωτή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.1 Διαχείριση δεδομένων

Τα δεδομένα που πρόκειται να χειριστεί ή να δημιουργήσει ο χρήστης κατά τη διαδικασία εικονικής εξομοίωσης και σχεδίασης αγωγής κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Δημογραφικά δεδομένα ασθενή

- Εικόνες αξονικής (ή μαγνητικής τομογραφίας) καθώς και πληροφορίες που σχετίζονται με αυτές
- Δεδομένα εξομοίωσης και σχεδίασης ακτινοθεραπευτικής αγωγής (οριοθέτηση ανατομικών δομών και τοποθέτηση δεσμών ακτινοβολήσης)
- Προδιαγραφές μηχανημάτων ακτινοθεραπείας (γραμμικών επιταχυντών)
- Διάφορα (δεδομένα χρηστών-ιατρών)

Παρέχονται στο χρήστη δυνατότητες γρήγορης και αποτελεσματικής επισκόπησης των δεδομένων αλλά και τροποποίησης, διαγραφής, αποθήκευσης και εισαγωγής νέων δεδομένων. Επίσης, παρέχονται εργαλεία αναζήτησης (queries) ασθενών με βάση προκαθορισμένα κριτήρια.

3.2 Εργασία με δεδομένα DICOM

Για την κάλυψη των αναγκών των κατασκευαστών και χρηστών ιατρικού απεικονιστικού εξοπλισμού σχετικά με τη διασύνδεση των διαγνωστικών συστημάτων στα υφιστάμενα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, έχει αναπτυχθεί με πρωτοβουλία των οργανισμών ACR (American College of Radiology) και NEMA (National Electrical Manufacturers Association) το πρότυπο DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Η πιο πρόσφατη έκδοση του προτύπου είναι η DICOM 3.0. Το DICOM αποτελεί το βιομηχανικό πρότυπο για τη μεταφορά ιατρικών εικόνων καθώς και άλλου είδους ιατρικής πληροφορίας μεταξύ απεικονιστικών και διαγνωστικών συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών, υπολογιστικών συστημάτων διαχείρισης ιατρικής πληροφορίας, ανεξάρτητων σταθμών εργασίας κ.ά. Ένα σύστημα εικονικής εξομοίωσης πρέπει να έχει τη δυνατότητα λήψης δεδομένων σε μορφή DICOM από τον αξονικό τομογράφο.

3.3 Ορισμός ανατομικών δομών

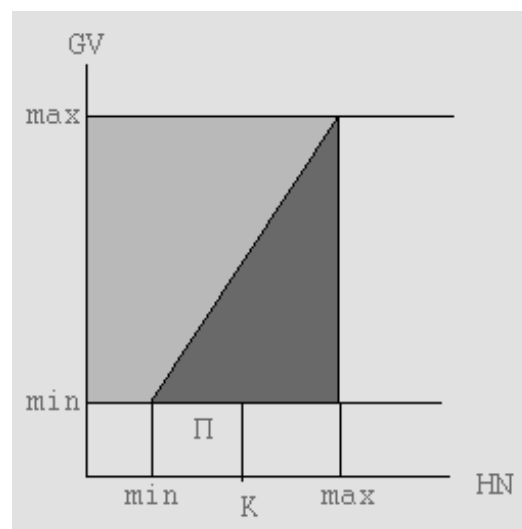
Η διαδικασία ορισμού από τον ιατρό-χρήστη, του προς ακτινοβολήση όγκου και των κρίσιμων ανατομικών δομών στο σταθμό εικονικής εξομοίωσης, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο της σχεδίασης ακτινοθεραπευτικής αγωγής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται είτε με χειροκίνητο ή ημι-αυτόματο τρόπο και για το σκοπό αυτό θα παρέχονται από το λογισμικό οι εξής διευκολύνσεις:

- Επισκόπηση τομογραφικών εικόνων και δυνατότητες πλοήγησης στο σύνολό τους
- Προσαρμογή παραθύρου απεικόνισης με ρύθμιση των μονάδων Hounsfield (χειροκίνητη επιλογή, χρήση προκαθορισμένων παραθύρων)
- Εμφάνιση πληροφοριών (πληροφορίες DICOM, δημογραφικά στοιχεία, ρυθμίσεις εικόνας, προσανατολισμός τομών)
- Καθορισμός ανατομικών δομών (τύπος, ονομασία, χρώμα)
- Εργαλεία για χειροκίνητη σχεδίαση και διόρθωση περιγραμμάτων
- Εργαλεία για ημι-αυτόματη σχεδίαση περιγραμμάτων
- Βοηθητικά εργαλεία (μεγέθυνση / σμίκρυνση, μέτρηση αποστάσεων)
- Τοποθέτηση σημείων αναφοράς
- Αυτόματη επέκταση δομών στις τρεις διαστάσεις
- Τρισδιάστατη αναπαράσταση ανατομικών δομών με δυνατότητες περιστροφής, μετακίνησης, zoom.

3.4 Απεικόνιση δεδομένων DICOM

Οι εικόνες αξονικού τομογράφου έχουν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος από τις συνήθεις ασπρόμαυρες εικόνες (8-bit), με τιμές που τυπικά κυμαίνονται από -1000 ως +1000

Hounsfield Units. Γι' αυτό το λόγο, η κωδικοποίηση των DICOM δεδομένων αξονικής τομογραφίας γίνεται συνήθως σε 12 bit. Η απεικόνιση δεδομένων DICOM ως εκ τούτου προϋποθέτει την προβολή τους σε 256 (8-bit) στάθμες του γκρι με χρήση ενός «παραθύρου». Αυτό προσδιορίζεται από δύο μεγέθη τα οποία καλούνται «Κέντρο Ενεργού Εύρους Τιμών» (K) (window center) και «Ενεργό Εύρος Τιμών» (Π) (window width). Με βάση αυτές τις δύο παραμέτρους, ο χρήστης μπορεί να «μεταφράζει» τις πραγματικές τιμές Hounsfield, σε κλίμακα 256 σταθμών με τρόπο, ώστε να περιέχουν τη μέγιστη οπτικά αξιοποιήσιμη πληροφορία για τον τύπο των ιστών που επιθυμεί να απεικονίσει. Ορίζεται έτσι μια γραμμική απεικόνιση των τιμών Hounsfield σε γκριζες στάθμες κατά τρόπο ώστε να απεικονίζονται επί του παραθύρου δεδομένα με ελάχιστη τιμή ίση με $K - (\Pi / 2)$, μέγιστη τιμή ίση με $K + (\Pi / 2)$, ενώ οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις δύο ακραίες τιμές των χρωματικών πυκνοτήτων που απεικονίζονται (Σχ. 2).



Σχήμα 2. Απεικόνιση τιμών Hounsfield (HN) σε στάθμες του γκρι (GV).

3.5 Τοποθέτηση πεδίων ακτινοβολήσης

Κατά τη διαδικασία τοποθέτησης πεδίων ακτινοβολήσης στο σταθμό εικονικής εξομοίωσης, παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα πλήρους και πιστής εξομοίωσης της θεραπευτικής αγωγής, με βάση τα τομογραφικά δεδομένα του ασθενή. Συγκεκριμένα, οι δυνατότητες που παρέχονται είναι οι εξής:

- Τρισδιάστατη απεικόνιση του δωματίου αγωγής και του επιταχυντή (Room View) με δυνατότητα πλοήγησης μέσα στο δωμάτιο και παρατήρησης από οποιαδήποτε γωνία και απόσταση με αλληλεπίδραση χρήστη-συστήματος.
- Απεικόνιση «Όψης μέσα από τη δέσμη» (Beam's Eye View, BEV) με απόδοση ψηφιακά ανακατασκευασμένης ακτινογραφίας (Digitally Reconstructed Radiograph, DRR) και με προοπτική απεικόνιση των περιγραμμάτων των ανατομικών δομών ενδιαφέροντος σε μορφή τρισδιάστατων πλεγμάτων (wireframes).
- Ανακατασκευή και απεικόνιση εγκάρσιων, οβελιαίων, στεφανιαίων καθώς και τομών τυχαίου προσανατολισμού, με ταυτόχρονη παρουσίαση των ακτινοβολούμενων περιοχών και των ανατομικών δομών που προσδιορίστηκαν στη διαδικασία ορισμού ανατομικών δομών.
- Τρισδιάστατη απεικόνιση των τομογραφικών δεδομένων του ασθενή με τεχνική απόδοσης όγκου (volume rendering).

- Τρισδιάστατη απεικόνιση των ανατομικών δομών που προσδιορίστηκαν στη διαδικασία ορισμού ανατομικών δομών, καθώς και των υπό σχεδίαση δεσμών ακτινοβολήσης, με την τεχνική απόδοσης επιφάνειας (surface rendering).
- Προσομοίωση όλων των κινήσεων του γραμμικού επιταχυντή (μετακινήσεις/περιστροφές τραπέζιού, ικρίωματος, κατευθυντήρα, εύρος σιαγόνων) και ταυτόχρονη απεικόνιση των αντίστοιχων παραμέτρων στην απεικόνιση BEV, στην τρισδιάστατη απεικόνιση των υπό σχεδίαση δεσμών και στις ανακατασκευασμένες τομές.

3.6 Οπτικοποίηση τρισδιάστατων ιατρικών δεδομένων

Τρισδιάστατη οπτικοποίηση

Τα δεδομένα εισόδου σε έναν εικονικό εξομοιωτή αποτελούνται από ένα σύνολο τομογραφικών εικόνων, που μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο τρισδιάστατων δεδομένων. Η απλούστερη μορφή παρουσίασής τους συνίσταται στον κατακερματισμό τους σε δισδιάστατες τομές, οι οποίες παρουσιάζονται στην οθόνη όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4. Υπάρχουν όμως και πιο προηγμένες μέθοδοι οι οποίες μπορούν να παρουσιάσουν απευθείας την τρισδιάστατη πληροφορία με χρήση τεχνικών επεξεργασίας ιατρικών δεδομένων και μεθόδων γραφικών με υπολογιστές (computer graphics). Ένας γενικός διαχωρισμός των τεχνικών οπτικοποίησης τρισδιάστατων δεδομένων είναι σε τεχνικές απόδοσης επιφάνειας (surface rendering) και απόδοσης όγκου (volume rendering).

Οι τεχνικές απόδοσης επιφάνειας προϋποθέτουν αρχικά τη δημιουργία *τρειςδιάστατου μοντέλου* του προς απεικόνιση αντικειμένου, εφαρμόζοντας πρώτα τμηματοποίηση (segmentation) των δομών ενδιαφέροντος, και στη συνέχεια πολυγωνοποίηση των επιφανειών τους και οπτικοποίηση με διάφορες μεθόδους γραφικών με υπολογιστές. Η τμηματοποίηση μπορεί να γίνεται είτε χειροκίνητα από τον ίδιο το χρήστη, είτε αυτόματα/ημι-αυτόματα με τη βοήθεια αλγορίθμων τμηματοποίησης. Η πολυγωνοποίηση πραγματοποιείται με χρήση ειδικών αλγορίθμων.

Οι τεχνικές απόδοσης όγκου συνίστανται στην *απευθείας προβολή* του συνόλου των τρισδιάστατων δεδομένων πάνω στο επίπεδο της οθόνης. Η βασική αρχή λειτουργίας των τεχνικών απόδοσης όγκου είναι η ανάθεση σε κάθε voxel (volume element) μίας τιμής αδιαφάνειας (opacity), που κυμαίνεται από 0 έως 100%. Στη συνέχεια, τα τρισδιάστατα δεδομένα προβάλλονται στο επίπεδο της οθόνης, με τεχνικές, όπως η εκπομπή ακτίνων (ray-casting), ή η προβολή στοιχειωδών σωματιδίων (element projection / splatting).

Ψηφιακά ανακατασκευασμένη ακτινογραφία

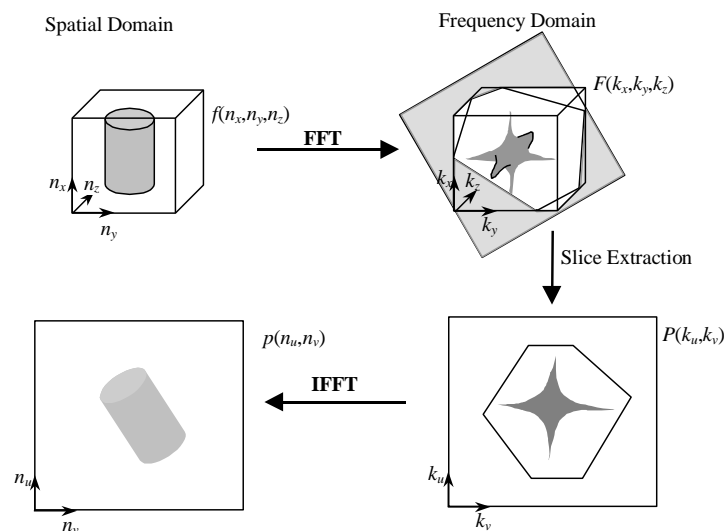
Η Ψηφιακά Ανακατασκευασμένη Ακτινογραφία (ΨΑΑ) με οπτικοποίηση όγκου (DRR Volume Rendering) είναι από τα σημαντικότερα απεικονιστικά εργαλεία για την υλοποίηση εικονικού εξομοιωτή. Η ΨΑΑ χρησιμοποιείται τόσο κατά τη σχεδίαση της ακτινοθεραπευτικής αγωγής, όσο και κατά τη διαδικασία επαλήθευσης. Η ΨΑΑ προσομοιώνει τη διάσχιση από ακτίνες X ενός απορροφητικού μέσου, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα δεδομένα αξονικής τομογραφίας. Λόγω της φύσης της, απαιτεί τον υπολογισμό της συνεισφοράς όλων των voxels των τομογραφικών δεδομένων, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, συνήθως γίνεται χρήση *προεπισκόπησης* ΨΑΑ με τεχνική που κάνει προσεγγιστικές παραδοχές και δίνει εικόνα κατώτερης ποιότητας, αλλά σε χρόνο της τάξης 0.5 sec ή λιγότερο. Στην περίπτωση που ο χρήστης του εικονικού εξομοιωτή θελήσει να έχει εικόνα υψηλής ακρίβειας, μπορεί να προχωρήσει σε υπολογισμό *αναλυτικής* ΨΑΑ.

Για την υλοποίηση της αναλυτικά υπολογισμένης ΨΑΑ χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος εκπομπής ακτίνων. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ένα σύνολο από ακτίνες, οι οποίες ξεκινούν από ένα σημείο του χώρου και αφού διασχίσουν το προς απεικόνιση αντικείμενο (σύνολο τομογραφικών δεδομένων), καταλήγουν στο επίπεδο της προβαλλόμενης εικόνας. Η τιμή η οποία αποδίδεται στο pixel της εικόνας αποτελεί το άθροισμα των γινομένων των τιμών των voxels, που διασχίζει η ακτίνα, και της απόστασης μεταξύ των σημείων εισόδου σε και εξόδου από το voxel.

Για την υλοποίηση της προεπισκόπησης ΨΑΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Fourier Volume Rendering, με κυριότερο πλεονέκτημα την υψηλή ταχύτητα εξαγωγής ΨΑΑ, που δίνει στο χρήστη την αίσθηση αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο, όπως και στο συμβατικό εξομοιωτή ακτινοθεραπείας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ζητούμενη προβολή λαμβάνεται απευθείας από το τρισδιάστατο φάσμα των δεδομένων, ελαττώνοντας κατ' αυτό το τρόπο την πολυπλοκότητα επεξεργασίας των δεδομένων από $O(N^3)$ σε $O(N^2 \log N)$. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται μπορεί να συνοψιστεί στα εξής τρία βήματα (Σχ. 3):

- Μετασχηματισμός των χωρικών δεδομένων στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT).
- Εξαγωγή μίας δισδιάστατης τομής από το τρισδιάστατο φάσμα, σε επίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει το κέντρο του φάσματος και είναι κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης του αντικειμένου.
- Αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός Fourier (IFFT) της δισδιάστατης τομής, που καταλήγει στη ζητούμενη προβολή.

Ο χρονοβόρος τρισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier του πρώτου βήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί off-line κατά την προ-επεξεργασία των δεδομένων.



Σχήμα 3. Μεθοδολογία της μεθόδου Fourier Volume Rendering.

3.7 Ενδο-νοσοκομειακή και δια-νοσοκομειακή σύνδεση και δυνατότητες τηλεματικής συνεργασίας

Ο σταθμός εικονικής εξομοίωσης συνδέεται στο τοπικό δίκτυο της ακτινοθεραπευτικής κλινικής. Στο ίδιο δίκτυο συνδέεται τουλάχιστον ο αξονικός τομογράφος της κλινικής, και εφόσον είναι διαθέσιμος και ο μαγνητικός τομογράφος. Τα προηγμένα συστήματα

εικονικής εξομοίωσης και σχεδίασης ακτινοθεραπευτικής αγωγής συχνά παρέχουν τη δυνατότητα σε δύο χρήστες διαφορετικών κλινικών να συνεργαστούν στην κατάρτιση του σχεδίου ακτινοθεραπευτικής αγωγής. Η τηλεματική συνεργασία προϋποθέτει ότι έχει πραγματοποιηθεί τηλεπικοινωνιακή (π.χ. ISDN) σύνδεση μεταξύ των σταθμών εικονικής εξομοίωσης των συνεργαζόμενων χρηστών. Τα εργαλεία τηλεματικής συνεργασίας μπορεί να παρέχουν στο χρήστη τις εξής λειτουργίες:

- Μεταφορά δεδομένων
- Εκκίνηση συνεργασίας μετά από συμφωνία και των δύο συνεργαζόμενων μελών
- Κοινή χρήση διεπιφάνειας εργασίας
- Ζωντανή συνομιλία

Η ανταλλαγή αρχείων ασθενών συνήθως μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρονικό προγραμματισμό. Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ασφάλεια των διακινούμενων ιατρικών δεδομένων.

4. Το Λογισμικό εικονικής εξομοίωσης «Γαληνός»

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

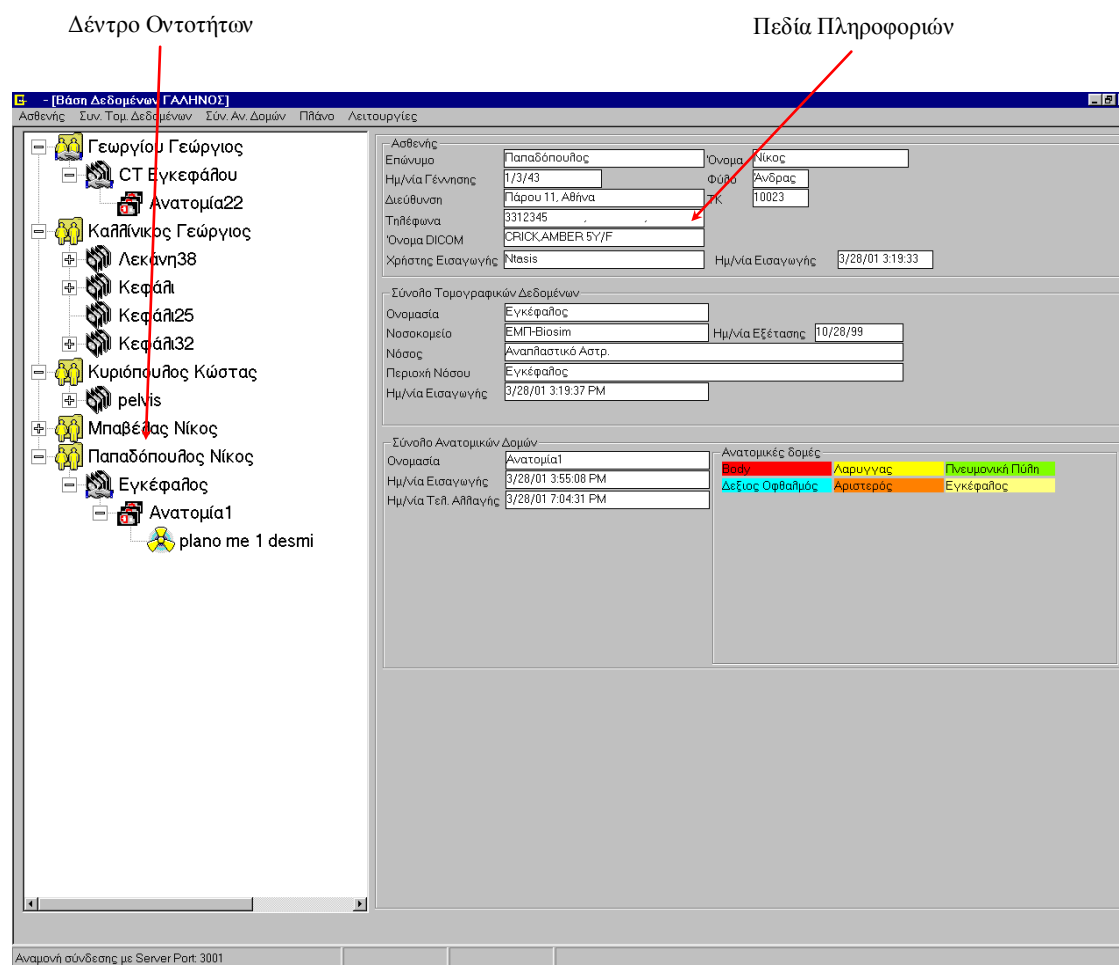
Το λογισμικό εικονικής εξομοίωσης «Γαληνός» σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας (BIOSIM). Ο σταθμός εργασίας «Γαληνός» πληρεί τις απαιτήσεις ιατρών-χρηστών και διαθέτει τα τυπικά χαρακτηριστικά εικονικού εξομοιωτή, όπως αυτά περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει:

- εξυπηρετητή DICOM για τη λήψη ιατρικών δεδομένων σε μορφή DICOM
- βάση δεδομένων ασθενών η οποία έχει υλοποιηθεί στο σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων Microsoft SQL Server 7.0
- διαπροσωπεία χρήστη (user interface) η οποία έχει υλοποιηθεί με χρήση του περιβάλλοντος ανάπτυξης εφαρμογών Microsoft Developer Studio 6.0, ενώ για τα τρισδιάστατα γραφικά έχει γίνει χρήση συναρτήσεων OpenGL (Open Graphics Library)
- εργαλεία τηλεματικής διασύνδεσης για τη συνεργασία μεταξύ χρηστών απομακρυσμένων κλινικών για την από κοινού κατάρτιση σχεδίου ακτινοθεραπευτικής αγωγής

Η διαπροσωπεία χρήστη περιλαμβάνει τη διεπιφάνεια διαχείρισης δεδομένων, και δύο κύριες επιφάνειες εργασίας, την διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών, και τη διεπιφάνεια τοποθέτησης πεδίων ακτινοβολήσης, οι οποίες παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

4.2 Διεπιφάνεια διαχείρισης δεδομένων

Η διεπιφάνεια διαχείρισης δεδομένων περιλαμβάνει το δέντρο οντοτήτων, την περιοχή των πεδίων πληροφοριών, και τη ράβδο των μενού επιλογών. Ένα στιγμιότυπο της διεπιφάνειας εικονίζεται στο Σχ. 4. Το δέντρο οντοτήτων απαρτίζεται από τις βασικές οντότητες της βάσης δεδομένων, οι οποίες είναι ο ασθενής, το σύνολο τομογραφικών δεδομένων, το σύνολο ανατομικών δομών, και το πλάνο ακτινοθεραπείας. Στα πεδία πληροφοριών φιλοξενούνται οι αντίστοιχες πληροφορίες, ενώ από το μενού επιλογών είναι δυνατή η πραγματοποίηση ενεργειών αναζήτησης, εισαγωγής νέων ασθενών, τροποποίησης των στοιχείων των ασθενών και των μηχανημάτων ακτινοθεραπείας, και πρόσβασης στις επόμενες επιφάνειες εργασίας.



Σχήμα 4. Στιγμιότυπο της διεπιφάνειας διαχείρισης δεδομένων.

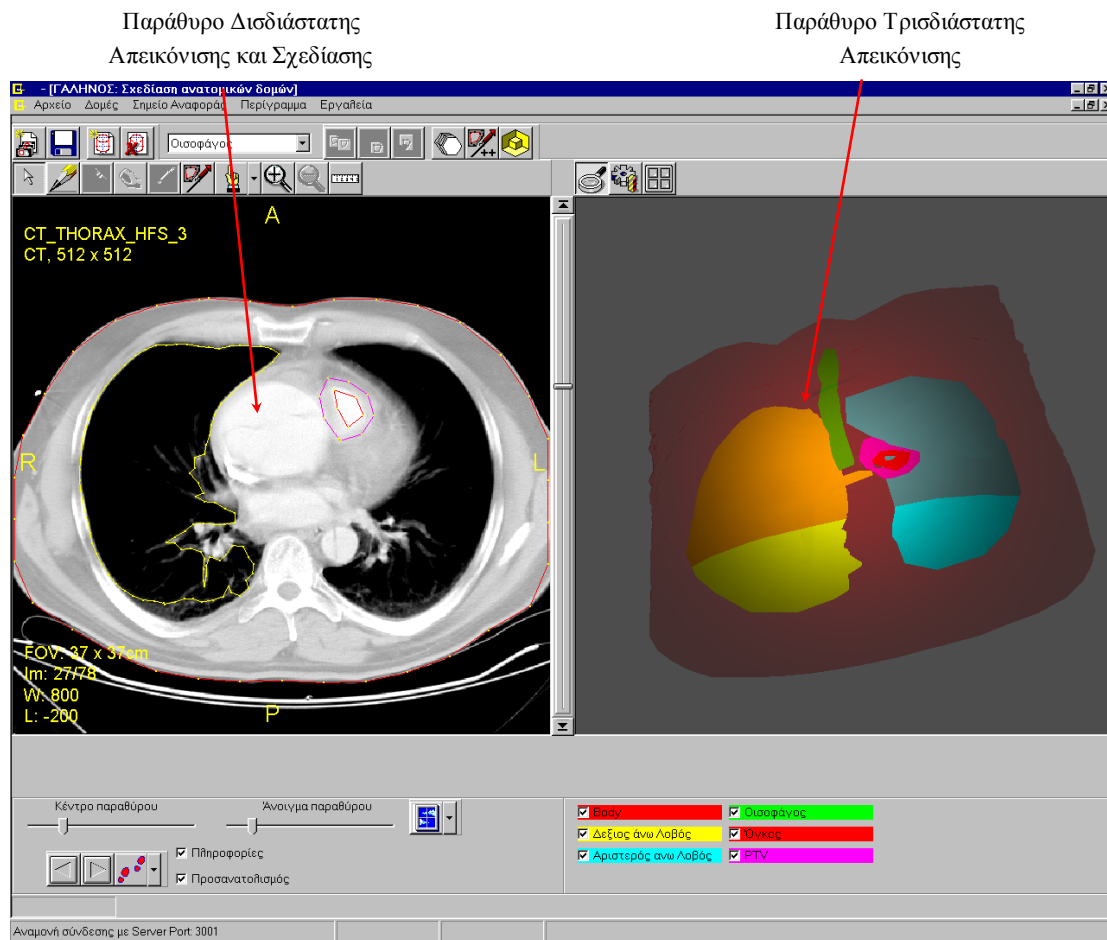
4.3 Διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών

Στη διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών πραγματοποιείται ο ορισμός των περιγραμμάτων του όγκου-στόχου της ακτινοθεραπείας, και των κρίσιμων ανατομικών δομών που τον περιβάλλουν. Η επιφάνεια εργασίας, που εικονίζεται στο Σχ. 5, αποτελείται από τη ράβδο του μενού επιλογών, από σειρές εργαλείων σχεδίασης και χειριστηρίων ελέγχου, και από δύο παράθυρα, το παράθυρο δισδιάστατης απεικόνισης και σχεδίασης, και το παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης.

Στο παράθυρο δισδιάστατης απεικόνισης και σχεδίασης παρουσιάζονται οι εικόνες CT (ή MRI) του ασθενή, τα περιγράμματα των ανατομικών δομών τα οποία έχουν οριστεί από τον χρήστη, και οι πληροφορίες σχετικές με την εικονιζόμενη τομή και τον ασθενή (χαρακτηριστικά εικόνας, προσανατολισμός τομής, δημογραφικά στοιχεία). Υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης, διαγραφής και μετακίνησης σημείων με χρήση του ποντικιού. Στο παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης γίνεται ανακατασκευή των επιφανειών από τα περιγράμματά τους με ειδικό αλγόριθμο ανακατασκευής τρισδιάστατων επιφανειών, ενώ η οπτικοποίηση της ανακατασκευασμένης τρισδιάστατης επιφάνειας πραγματοποιείται με χρήση συναρτήσεων τρισδιάστατης απεικόνισης και μετακίνησης, φωτισμού και σκίασης της OpenGL.

Κατά την εργασία στη διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών γίνεται χρήση της έννοιας της «ενεργής δομής». Τούτο σημαίνει ότι καθώς ο χρήστης πραγματοποιεί

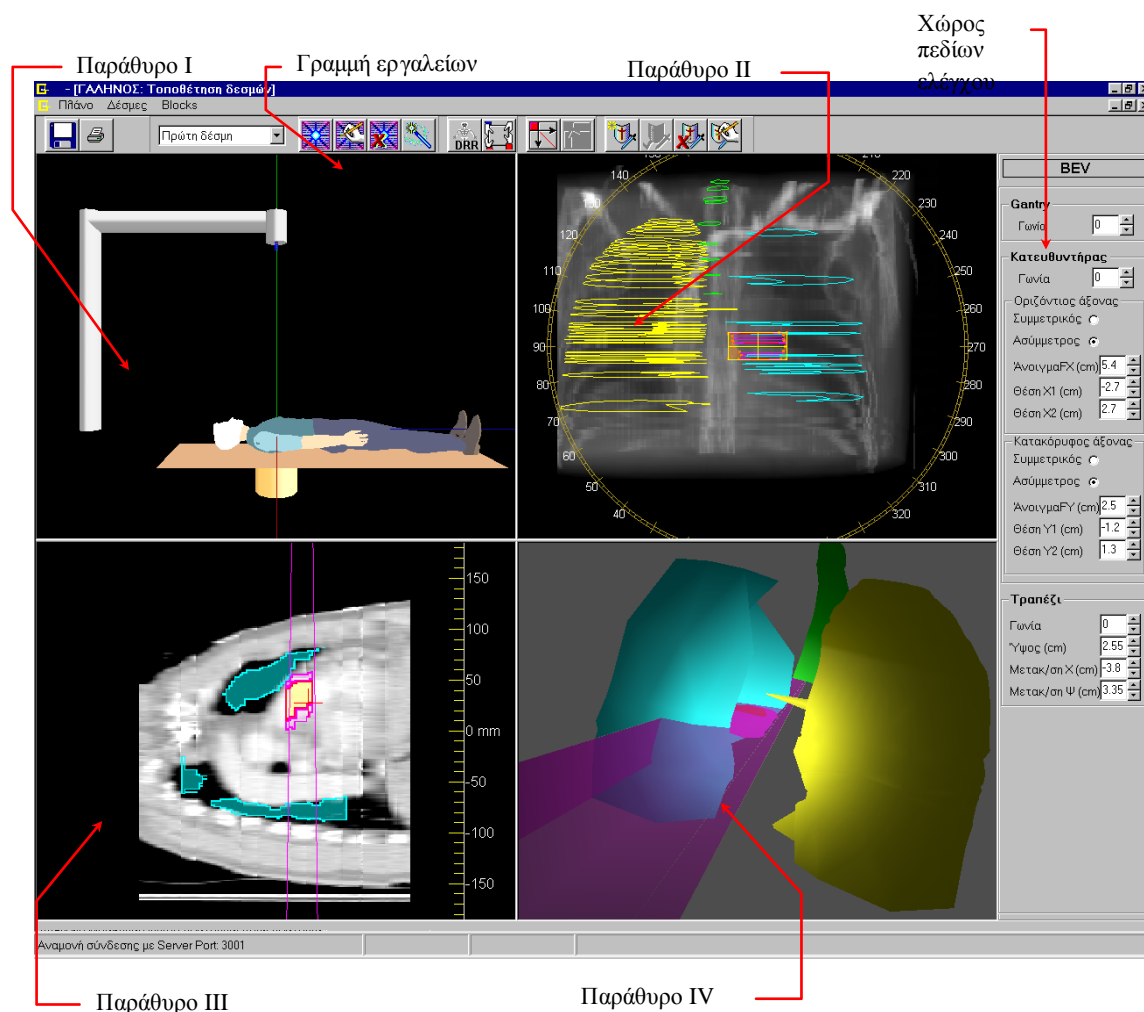
ενέργειες ή χρησιμοποιεί εργαλεία σχεδίασης (π.χ. προσθήκη-μετακίνηση-διαγραφή σημείων), αυτές δρουν μόνο στην ανατομική δομή η οποία έχει επιλεγεί ως ενεργή.



Σχήμα 5. Στιγμιότυπο της διεπιφάνειας ορισμού ανατομικών δομών.

4.4 Διεπιφάνεια τοποθέτησης δεσμών

Στη διεπιφάνεια τοποθέτησης δεσμών πραγματοποιείται η σχεδίαση και η τοποθέτηση των πεδίων ακτινοβολήσης πάνω στον εικονικό ασθενή. Για το σκοπό αυτό παρέχονται κατάλληλες δισδιάστατες και τρισδιάστατες όψεις των ιατρικών δεδομένων του ασθενή και του εικονικού δωματίου ακτινοθεραπείας. Η διαδικασία τοποθέτησης πεδίων ακτινοβολήσης υλοποιείται με μία σειρά ενεργειών που πραγματοποιούνται από το μενού επιλογών και τις γραμμές εργαλείων, και από τέσσερα παράθυρα, το καθένα από τα οποία συνοδεύεται από το δικό του πεδίο ελέγχου, όπως εικονίζεται στο Σχ. 6. Στο παράθυρο I δίνεται το εικονικό δωμάτιο εξομοιωτή ακτινοθεραπείας (Room View), στο παράθυρο II η όψη μέσα από τη δέσμη (Beam's Eye View, BEV) με προεπισκόπηση ΨΑΑ, στο παράθυρο III η δισδιάστατη απεικόνιση τομογραφικών δεδομένων (CT View), και στο παράθυρο IV η τρισδιάστατη απεικόνιση τομογραφικών δεδομένων με τεχνική απόδοσης όγκου (3D Volume) και η τρισδιάστατη απεικόνιση ανατομικών δομών και δεσμών ακτινοβολήσης με τεχνική απόδοσης επιφανείας (3D Surface). Κατά την εργασία στη διεπιφάνεια τοποθέτησης δεσμών, υπάρχει η έννοια του «ενεργού παραθύρου», στο οποίο εργάζεται ο χρήστης, και το οποίο συνοδεύεται από το αντίστοιχο πεδίο ελέγχου, καθώς και η έννοια της «ενεργής δέσμης», στην οποία εφαρμόζονται οι ενέργειες του χρήστη.



Σχήμα 6. Στιγμιότυπο της διεπιφάνειας τοποθέτησης δεσμών.

5. Εργαστηριακή Άσκηση

Βήμα 1: διαχείριση δεδομένων

A. Εντοπίστε στη διεπιφάνεια διαχείρισης δεδομένων τον ασθενή με όνομα «Lab Patient», και από το κατάλληλο μενού μεταβάλλετε τα δημογραφικά στοιχεία του. Ελέγξτε τα αποτελέσματά σας.

B. Επιλέξτε από το σύνολο τομογραφικών δεδομένων «Κεφαλή1» το σύνολο ανατομικών δομών με ονομασία «Ανατομία1» και από το κατάλληλο μενού επιλέξτε «αλλαγή» για να μεταβείτε στη διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών.

Βήμα 2: 2-d και 3-d παρουσίαση των ανατομικών δομών

A. Στη διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών, με χρήση των σχετικών χειριστηρίων πλοήγησης κάντε επισκόπηση των τομών αξονικής τομογραφίας, και μετά μεταβείτε στην 42η τομή του συνόλου τομογραφικών δεδομένων.

B. Με το χειριστήριο «αυτόματη επιλογή παραθύρου» επιλέξτε τις προεπιλεγμένες τιμές «κεφάλι / τράχηλος». Κατόπιν με τα χειριστήρια «εύρος» και «κέντρο» παραθύρου επιλέξτε τιμές παραθύρου με εύρος (W) 380, και κέντρο (L) +45. Κάντε χρήση της επιλογής «πληροφορίες» για να δείτε τις πληροφορίες εικόνας, και ελέγξτε τα αποτελέσματά σας.

Γ. Στο παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης, με χρήση των χειριστηρίων (αριστερό / δεξί κουμπί του ποντικιού, επιλογές zoom και pan) κάντε επισκόπηση των τρισδιάστατων δεδομένων σας.

Βήμα 3: ορισμός νέας δομής, σχεδίαση περιγραμμάτων

Α. Προχωρήστε στον ορισμό μίας νέας δομής, με την ονομασία «Δεξιός οφθαλμός», τύπου «ORGAN». Χρησιμοποιείτε τα εργαλεία σχεδίασης για να ορίσετε το περίγραμμα του δεξιού οφθαλμού στη θέση που θα σας υποδείξει ο επιβλέπων.

Β. Στις επόμενες τομές, με χρήση των χειριστηρίων «αντιγραφής»-«επικόλλησης» (copy-paste) μεταφέρετε ένα αντίγραφο του περιγράμματος που σχεδιάσατε προηγουμένως. Κάντε τις απαραίτητες αλλαγές και διορθώσεις για να προσαρμόσετε το περίγραμμα που επικολλήσατε πάνω στην ανατομική δομή.

Γ. Μεταβείτε στην επόμενη τομή. Με χρήση του εργαλείου «αυτόματο περίγραμμα» σχεδιάστε το επόμενο περίγραμμα του δεξιού οφθαλμού.

Βήμα 4: τρισδιάστατη επέκταση δομής

Με χρήση της επιλογής «PTV-αυτόματη επέκταση δομής» προχωρήστε σε τρισδιάστατη επέκταση της δομής «όγκος», χρησιμοποιώντας περιθώριο 5mm. Ονομάστε τη νέα δομή «Όγκος-PTV».

Βήμα 5: μετρήσεις

Μετρήστε τυπικές διαμέτρους των δομών «Δεξιός οφθαλμός», «Όγκος», «Όγκος-PTV» στην τομή που παρουσιάζουν τη μέγιστη επιφάνειά τους.

Βήμα 6: αποθήκευση εργασίας, μετάβαση στην επόμενη επιφάνεια εργασίας

Σώστε την εργασία σας με την επιλογή «αποθήκευση ως...» από το μενού. Κλείστε τη διεπιφάνεια ορισμού ανατομικών δομών. Μεταβείτε στη διεπιφάνεια τοποθέτησης δεσμών για τη σχεδίαση νέου πλάνου.

Βήμα 7: επισκόπηση του εικονικού εξομοιωτή

Α. Πατήστε με το ποντίκι σε καθένα από τα τέσσερα παράθυρα, ώστε να εμφανιστεί το αντίστοιχο πεδίο ελέγχου.

Β. Μεγιστοποιείτε το παράθυρο 2-d απεικόνισης, και παρατηρείστε τα δεδομένα εικόνων CT με χρήση εγκάρσιας, στεφανιαίας και οβελιαίας τομής.

Γ. Μεταβείτε στο παράθυρο 3-d απεικόνισης. Δείτε τα δεδομένα σας με απόδοση επιφανείας (surface rendering) και απόδοση όγκου (volume rendering).

Βήμα 8: ορισμός νέας δέσμης

Α. Προχωρήστε στον ορισμό νέας δέσμης την οποία θα ονομάσετε «Δέσμη1». Επιλέξτε «ασοκεντρική τεχνική», «ασύμμετρο» άνοιγμα σιαγόνων. Εισάγετε $X1=-2$, $X2=+2$, $Y1=-2$, $Y2=+2$ (τιμές σε cm), Gantry Angle= 0° . Καταχωρήστε τις επιλογές σας.

Β. Στο παράθυρο «όψη μέσα από τη δέσμη» (Beam's Eye View) ελέγξτε τα αποτελέσματά σας. Χρησιμοποιήστε την επιλογή για αυτόματη προσαρμογή κατευθυντήρα. Θέστε το βραχίονα (gantry) σε γωνία 45° και το τραπέζι σε γωνία 20° .

Γ. Ελέγξτε τα αποτελέσματα στα παράθυρα 2-d απεικόνισης και 3-d απεικόνισης.

Βήμα 9: σχεδίαση blocks

Σχεδιάστε δύο blocks (φράγματα δέσμης) με στόχο να επιτύχετε πιο ομοιόμορφη κάλυψη του προς ακτινοβολήση όγκου και αποφυγή έκθεσης στην ακτινοβολία ευαίσθητων ανατομικών δομών.

Βήμα 10: εκτύπωση πλάνου

Προχωρήστε σε εκτύπωση του πλάνου που σχεδιάσατε.

Εργασία

Περιγράψτε τα βήματα που ακολουθήσατε κατά τη διαδικασία εικονικής εξομοίωσης ακτινοθεραπευτικής αγωγής. Αναφέρετε τις ανατομικές δομές που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τις τυπικές διαμέτρους αυτών. Αναφέρετε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης ακτινοβολίας (θέση τραπεζιού, γωνίες τραπεζιού, ικριώματος, κατευθυντήρα, άνοιγμα σιαγόνων κατευθυντήρα). Επισυνάψτε την εκτύπωση του πλάνου.

Βιβλιογραφία

- [1] ΕΠΙΕΤ-II NEO-EKBAN-1.3-70, *Μεθοδολογία Υλοποίησης Έργου “Ανάπτυξη Συστήματος Εικονικής Προσομοίωσης και Σχεδίασης Θεραπευτικής Αγωγής στην Κλινική Ακτινο-ογκολογία «ΓΑΛΗΝΟΣ»*”, ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ, Ιούλιος 2001
- [2] Κ.Σ. Νικήτα, Θ.Α. Μανιάτης, Ε. Ντάσης, Μ. Γκλέτσος, Ν. Μουραβλιάνσκυ, Χ. Βάσιος, Ε. Ζαχαράκη, “Το Πρόγραμμα Εικονικής Εξομοίωσης «Γαληνός»”, *Ογκολογική Ενημέρωση*, Τόμος 3ος, Τεύχος 3ο, σελ. 180-186, Ιούλιος-Σεπτέμβριος 2001.
- [3] F.M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, Second Edition, Lippincott Williams & Wilkins, 1994
- [4] S. Webb, *The Physics of Three-Dimensional Radiation Therapy*, IOP, 1993.
- [5] G.C. Bentel, *Radiation Therapy Planning*, McGraw-Hill, 1992.
- [6] J.K. Udupa, Herman, *3-D Imaging in Medicine*, CRC Press, Washington D.C., 2000.
- [7] J. Foley, A. Van Dam, S. Feiner, J. Hughes, *Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1990.
- [8] E. Ntasis, T.A. Maniatis and K.S. Nikita, “Fourier Volume Rendering for Real Time Preview of Digital Reconstructed Radiographs: A Web-Based Implementation,” *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 26/1, 1-8, January 2002.
- [9] ACR-NEMA, *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) Version 3.x*, Final Text, NEMA Standards Publication PS3.x, 1993.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC) Subcommittee 62C, IEC Draft 1217: *Radiotherapy Equipment – Coordinates, Movements and Scales*, 26 March 1993