



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

Συστήματα Τοποθέτησης Ασθενών στην Ακτινοθεραπεία

Αβράμη Ιωάννα

Αριθμός Μητρώου: 48016001

Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας, Καθηγητής

Αθήνα 8/10/2024

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας

Καθηγητής

Αικατερίνη Σκουρολιάκου

Καθηγήτρια, Αντιπρόεδρος Τμήματος

Παντελεήμων Ασβεστάς

Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η υπογράφουσα Ιωάννα Αβράμη του Αναστάσιου, με αριθμό μητρώου 16001 φοιτήτρια του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:


«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και 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 διπλώματός μου».

Ημερομηνία

Ο/Η Δηλών/ούσα

Τρίτη 8/10/2024


Αβράμη Ιωάννα

Περίληψη

Ο στόχος της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η ανάλυση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην ακτινοθεραπεία για την βέλτιστη τοποθέτηση των ασθενών πετυχαίνοντας την λιγότερη δόση ακτινοβολίας με κύρια την τεχνική της επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (SGRT).

Αναλύθηκαν οι τεχνικές ακτινοθεραπείας που υπάρχουν και τι εξυπηρετεί η κάθε μια και πως δημιουργήθηκε η ανάγκη συστημάτων τοποθέτησης των ασθενών. Έτσι βασικό θέμα ήταν τα εμπορικά συστήματα που έχουν δημιουργηθεί για την επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία αναλύοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά του καθενός. Έπειτα μέσω της επιστημονικής βάσης PubMed αναλύθηκαν άρθρα τα όποια βασίστηκαν στα εμπορικά συστήματα και δημιουργήθηκαν διαγράμματα ροής με βάση την έρευνα.

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν πως η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία βοηθά τον θεραπευτή να παρακολουθεί και να διορθώνει όλες τις κινήσεις του ασθενούς ώστε να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Τα εμπορικά συστήματα έχουν βοηθήσει πολύ στην επίτευξη της σωστής τοποθέτησης με το κάθε ένα να καλύπτει τις ανάγκες που χρειάζονται.

Λέξεις Κλειδιά : *Επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία, Τοποθέτηση, Εμπορικά συστήματα, Ακινητοποίηση*

Abstract

The objective of this work was to analyze the systems used in radiotherapy for the optimal positioning of patients achieving the least dose of radiation with the main technique of surface guided radiotherapy (SGRT).

The radiation therapy techniques that exist were analyzed and what each one serves and how the need for patient positioning systems was created. Thus, the main topic was the commercial systems that have been created for surface-guided radiation therapy, analyzing the technical characteristics of each one. Then, through the scientific database PubMed, articles based on the commercial systems were analyzed and flow charts were created based on the research.

The results of the work showed that the surface-guided radiation therapy helps the therapist to monitor and correct all the patient's movements so that they are within the permissible limits. Commercial systems have been very helpful in achieving the right placement with each one meeting the needs that are needed.

Keywords: *Surface-guided radiation therapy, Placement, Commercial systems, Immobilization*

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	8
2. Γραμμικός επιταχυντής.....	8
3. Σύγχρονες Τεχνικές Ακτινοθεραπείας.....	9
Τρισδιάστατη Σύμμορφη Ακτινοθεραπεία (3D-CRT).....	9
Ακτινοθεραπεία διαμορφούμενης έντασης (IMRT/VMAT).....	9
• Segmental (step and shoot) MLC IMRT.....	10
• Dynamic.....	10
• Dynamic Arc.....	10
Στερεοτακτική Ακτινοχειρουργική (SRS).....	11
Απεικονιστικά Καθοδηγούμενη Ακτινοθεραπεία (IGRT).....	11
4. Ανάγκη Συστημάτων Τοποθέτησης.....	11
5. Επιφανειακά Καθοδηγούμενη Ακτινοθεραπεία (SGRT).....	12
Κύριες Τεχνολογίες Σάρωσης.....	13
• Καταγραφή Βίντεο.....	13
• Laser.....	13
Ψηφιακή Απεικόνιση Επιφανειών.....	13
• Δομημένο Φως.....	13
• Βαθμονόμηση της Προβολής «Δομημένου» Φωτός.....	14
• Αλγόριθμος ICP (Iterative Closest Point).....	14
6. Εμπορικά Συστήματα SGRT.....	14
Vision RT AlignRT System.....	14
Τεχνικές ανακατασκευής και καταχώρησης επιφάνειας.....	15
Hardware.....	16
Περιοχή Ενδιαφέροντος (Region of Interest-ROI).....	17
Βαθιά Εισπνοή και κράτηση της Αναπνοής- Deep Inspiration Breath Hold (DIBH).....	17
Διαχείριση Αναπνευστικής Κίνησης.....	17
Συμπέρασμα.....	18
C-RAD Catalyst.....	18
Σχεδιασμός Συστήματος.....	19
Κύριες Διαδικασίες Κλινικής Λειτουργίας.....	22
Διασφάλιση Ποιότητας.....	23
Identify.....	24
Σχεδιασμός Συστήματος.....	24

Ροή εργασίας IDENTIFY	26
Διασφάλιση Ποιότητας.....	29
7. Τα Συστήματα Τοποθέτησης Ασθενών στην Έρευνα	32
• Vision RT AlignRT System	32
Επαναληψιμότητα της ρύθμισης του ασθενούς με σύστημα καταγραφής εικόνας επιφάνειας σε σύμμορφη ακτινοθεραπεία του καρκίνου του προστάτη	32
Οι μετατοπίσεις στο στήσιμο της ακτινοθεραπείας για ασθενείς με καρκίνο του μαστού: εμπειρία της τρισδιάστατης απεικόνισης επιφάνειας	33
Αξιολόγηση της χρήσης διαφορετικών τεχνικών απεικόνισης και χορήγησης για κρανιακές θεραπείες στο Halcyon linac	34
Επαλήθευση του ισοκέντρου στο ρομποτικό κρεβάτι με τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας.....	35
Ανάθεση και δοκιμές απόδοσης του πρώτου πρωτοτύπου AlignRT InBore™ για Halcyon™ και Ethos™ -αποκλειστική πλατφόρμα ακτινοθεραπείας καθοδηγούμενης επιφάνειας.....	35
Σύγκριση της δοσιμετρικής ακρίβειας των σχεδίων θεραπείας μαστού πρωτονίων που παρέχονται με ρυθμίσεις SGRT και CBCT	36
Επαναληψιμότητα των θεραπειών Deep-Inspiration Breath Hold στο Halcyon™ που εκτελούνται χρησιμοποιώντας την πρώτη κλινική έκδοση του AlignRT InBore™: Αποτελέσματα μελέτης CYBORE	37
Συγκριτική αξιολόγηση της παραμορφωμένης επιφάνειας μέτρησης του AlignRT για την έγκαιρη ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του οιδήματος στην ακτινοθεραπεία του καρκίνου του μαστού.....	38
Διερεύνηση της ανθεκτικότητας της διαδικασίας βαθμονόμησης AlignRT InBore™ και προσδιορισμός των συνολικών σφαλμάτων παρακολούθησης.....	39
Ανασκόπηση κλινικών εφαρμογών και προκλήσεων με επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία.....	40
• C-RAD Catalyst	41
Χαρακτηριστικά περιορισμένης θεραπείας χρησιμοποιώντας οπτικό σύστημα απεικόνισης επιφανειών και πυλών σε έναν επιταχυντή Elekta.....	41
Σχεδιασμός θεραπείας και αξιολόγηση περιφραγμένης ακτινοθεραπείας σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή όψη χρησιμοποιώντας το σύστημα Catalyst™/Sentinel™ για βαθιά αναπνοή (DIBH)	42
Επιφανειακή απεικόνιση, τοποθέτηση λέιζερ ή ογκομετρική απεικόνιση για καρκίνο του μαστού με την συμμετοχή ελικοειδής Τομοθεραπείας.....	43
Αξιολόγηση της καθημερινής τοποθέτησης του ασθενούς για ακτινοθεραπεία με ένα εμπορικό σύστημα 3D επιφανειακής απεικόνισης (Catalyst™)	44
Διαχείριση ενδοκλασματικής κίνησης σε πραγματικό χρόνο στην ακτινοθεραπεία καρκίνου του μαστού: ανάλυση 2028 συνεδριών θεραπείας	44
Οπτική σάρωση επιφάνειας για τοποθέτηση ασθενών στην ακτινοθεραπεία: Μια πιθανή ανάλυση 1902 κλασμάτων δόσης.....	45

Αξιολόγηση της τεχνικής απόδοσης συστήματος οπτικής απεικόνισης επιφανειών με χρήση συμβατικών και καινοτόμων αλγορίθμων στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής .	46
Η δυνατότητα ενός συστήματος οπτικής επιφανειακής παρακολούθησης σε μη ομοεπίπεδες μόνο ισοκεντρικές θεραπείες πολλαπλών εγκεφαλικών μεταστάσεων	47
Ποσοτικοποίηση ψευδών διορθώσεων θέσης λόγω κίνησης του προσώπου χρησιμοποιώντας SGRT με μάσκες προσώπου ανοιχτού τύπου.....	48
Ακρίβεια τοποθέτησης του ασθενούς με χρήση επιφανειακής καθοδηγούμενης ακτινοθεραπείας με παραμορφώσιμη εγγραφή σε περιπτώσεις παραμορφώσιμης επιφάνειας.....	49
Μεθοδολογία μετρήσεων θερμικής μετατόπισης για συστήματα επιφανειακής καθοδήγησης ακτινοθεραπείας και κλινικής εκτίμησης επιπτώσεων που απεικονίζονται στο σύστημα C-Rad Catalyst HD.....	50
Σύγκριση της κατευθυνόμενης επιφανειακής απεικόνισης έναντι των στερεοσκοπικών ακτίνων X για τη θεραπεία SRS πολλαπλών μεταστάσεων με ένα μόνο ισόκεντρο χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα ανθρωπόμορφα προπλάσματα γέλης.....	51
Ακτινοθεραπεία με την μέθοδο DIBH σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή όψη: δοσιμετρική ανάλυση οργάνων για τις δόσεις κινδύνου μιας αγωγής.....	52
• Varian IDENTIFY.....	53
Θέση σε λειτουργία και κλινική αξιολόγηση του συστήματος επιφανειακής απεικόνισης IDENTIFY για στερεοτακτική ακτινοχειρουργική χωρίς πλαίσιο.....	53
Χαρακτηρισμός του συστήματος σάρωσης επιφάνειας IDENTIFY για εγκατάσταση ακτινοθεραπείας σε κλειστή οπή.....	54
8. Διαγράμματα Ροής Ανάκτησης Βιβλιογραφίας των συστημάτων	56
• Vision RT AlignRT	56
• C-RAD Catalyst	57
• Varian IDENTIFY	58
9. Συμπέρασμα	59
10. Αναφορές.....	59

1. Εισαγωγή

Η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία είναι μία από τις νεότερες εφαρμογές στην ακτινοθεραπεία τα τελευταία χρόνια. Στόχος της παρακάτω εργασίας είναι η ανάλυση των εμπορικών συστημάτων που υπάρχουν στην αγορά καθώς και η έρευνα που έχει υπάρξει για την εξέλιξη τους. Αρχικά αναλύονται γενικότερα οι τεχνικές ακτινοθεραπείας που υπάρχουν και πως η κάθε μια δίνει την δυνατότητα για σωστή τοποθέτηση, εντοπισμό του όγκου αλλά και όσο το δυνατόν χαμηλή δόση ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί η σωστή τοποθέτηση του ασθενούς που είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα που υπάρχουν στην ακτινοθεραπεία δημιουργήθηκαν τα συστήματα τοποθέτησης κάνοντας την αρχή η απεικονιστικά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (IGRT) και στην συνέχεια η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (SGRT) όπου και αναλύεται η βασικές τεχνολογίες σάρωσης και η ψηφιακή απεικόνιση. Όσον αφορά τα εμπορικά συστήματα εξηγούνται ο σχεδιασμός του συστήματος, οι διαδικασίες κλινικής λειτουργίας και η διασφάλιση της ποιότητας. Μετά από την ανάλυση των συστημάτων έγινε μια ανασκόπηση των εμπορικών συστημάτων στην έρευνα ανά χρονιά μέσω της επιστημονικής βάσης PubMed. Τέλος δημιουργήθηκαν διαγράμματα ροών με πληροφορίες που βασίστηκαν από την ανασκόπηση της έρευνας για κάθε εμπορικό σύστημα ξεχωριστά.

2. Γραμμικός επιταχυντής

Ο γραμμικός επιταχυντής είναι μια μηχανική διάταξη όπου τα σωματίδια επιταχύνονται με μεγάλη ταχύτητα μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η υψηλής ενέργειας δέσμη που δημιουργείται χρησιμοποιείται για την θεραπεία όγκων αφού τα σωματίδια επιταχύνονται πάνω σε μια ευθύγραμμη τροχιά προσπίπτοντας πάνω σε έναν συγκεκριμένο στόχο. Πιο συγκεκριμένα στην σύγχρονη ακτινοθεραπεία οι γραμμικοί επιταχυντές μπορούν να παράγουν δέσμες φωτονίων με επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε ενέργειες από 6-25 MeV.

Τα κύρια εξαρτήματα του γραμμικού επιταχυντή είναι:

- Πυροβόλο ηλεκτρονίων
- Σύστημα παραγωγής RF ισχύος
- Κυματοδηγός επιτάχυνσης
- Σύστημα μεταφοράς δέσμης ηλεκτρονίων
- Στόχος παραγωγής ακτίνων X
- Κεφαλή γραμμικού επιταχυντή
- Στήριγμα κεφαλής
- Κλίνη θεραπείας

Αρχικά όλοι οι γραμμικοί επιταχυντές είναι ισοκεντρικοί δηλαδή η κεφαλή έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται 360 γύρω από ένα νοητό σημείο με την βοήθεια ενός βραχίονα που βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από την κεφαλή. Κάτω από την κεφαλή βρίσκεται η κλίνη της θεραπείας όπου μπορεί να περιστρέφεται γύρω από το νοητό σημείο αλλά και να αυξομειώνεται το ύψος της ώστε να γίνει σωστή η τοποθέτηση του ασθενούς.

Η λειτουργία ενός γραμμικού επιταχυντή βασίζεται στα εξής: Ένα θερμαινόμενο νήμα εκπέμπει ηλεκτρόνια μέσω θερμιονικής εκπομπής που αυτά με την σειρά τους

επιταχύνονται σε ευθεία γραμμή μέσα σε έναν κυματοδηγό και αλληλεπιδρούν με έναν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο όπου και απορροφούν την ενέργειά τους. Το πεδίο όπου επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια δημιουργείται από μια διάταξη magnetron ή μια klystron. Η δέσμη ηλεκτρονίων κατευθύνεται μέσω μαγνητών πάνω σε ένα στόχο συνήθως βολφραμίου και εκεί τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πέδησης. Όμως η δέσμη έχει μεγάλη ένταση στο κέντρο της για αυτό παρεμβάλλεται από ένα ειδικό φίλτρο που την εξασθενεί στο κέντρο ώστε να ομογενοποιηθεί. Σαν τελευταίο στάδιο είναι η διαμόρφωση του σχήματός της δέσμης που επιτυγχάνεται με κατάλληλες διατάξεις του κατευθυντήρα, με αποτέλεσμα η δόση με της δέσμης να ελέγχεται με τους ανιχνευτές της ακτινοβολίας δηλαδή τους θαλάμους ιονισμού όπου πρέπει να είναι δύο για ασφάλεια. Τα τελευταία χρόνια λειτουργούν και επιταχυντές τύπου FFF (free flattening filter), δηλαδή χωρίς φίλτρο ομογενοποίησης.

3. Σύγχρονες Τεχνικές Ακτινοθεραπείας

Στην ακτινοθεραπεία ο βασικός σκοπός είναι η καταστροφή του όγκου με τη μικρότερη βλάβη στον υγιή ιστό. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να έχει προηγηθεί σωστή τοποθέτηση του ασθενούς και ο εντοπισμός του όγκου με ακρίβεια ώστε να ακτινοβοληθεί μόνο ο στόχος με την υψηλή ασφαλή δόση. Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί κάποιες τεχνικές που βοηθούν ώστε να εξασφαλιστούν τα παραπάνω, μειώνοντας ταυτόχρονα τη δόση στους υγιείς ιστούς [4].

Τρισδιάστατη Σύμμορφη Ακτινοθεραπεία (3D-CRT)

Η τρισδιάστατη σύμμορφη ακτινοθεραπεία (Three Dimensional Conformal Radiotherapy 3D-CRT) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί πολλαπλά πεδία ακτινοβολίας ομοιόμορφης έντασης για την αντιμετώπιση όγκων που έχουν διαφορετικά σχήματα και μεγέθη. Με την χρήση της Αξονικής Τομογραφίας (Computed Tomography-CT), της Μαγνητικής Τομογραφίας (Magnetic Resonance Imaging- MRI) καθώς και της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) παρέχονται πληροφορίες, που σε συνδυασμό με το ειδικό λογισμικό του συστήματος σχεδιασμού ακτινοθεραπείας προκύπτει το πλάνο της θεραπείας.

Κατά την διαδικασία της θεραπείας η κεφαλή του γραμμικού επιταχυντή περιστρέφεται με τη χρήση του ικριώματος (gantry) με κέντρο περιστροφής ένα νοητό σημείο στον χώρο που ονομάζεται ισόκεντρο που είναι και το σημείο τομής. Τοποθετώντας το ισόκεντρο στο κέντρο του όγκου και περιστρέφοντας το ικριώμα δίνεται η δυνατότητα να ακτινοβοληθεί ο όγκος με πολλαπλά πεδία από διαφορετικούς προσανατολισμούς προστατεύοντας έτσι υγιείς ιστούς.

Ακτινοθεραπεία διαμορφούμενης έντασης (IMRT/VMAT)

Η ακτινοθεραπεία διαμορφούμενης έντασης (Intensity Modulated Radiation Therapy) προκύπτει από την εξέλιξη της τρισδιάστατης σύμμορφης ακτινοθεραπείας καθώς η δέσμη της ακτινοβολίας είναι διαμορφωμένη ως προς το σχήμα για να προσαρμόζεται στον όγκο αλλά και ως προς την ένταση. Με αυτόν τον τρόπο η διαμορφωμένη ένταση έχει ως πλεονέκτημα να περιορίζει την δόση που δέχονται τα υγιή όργανα και να επιτυγχάνεται η αύξηση της δόσης στον όγκο-στόχο[18].

Με την τεχνική IMRT χρησιμοποιούνται πεδία με μη ομοιογενή ένταση ακτινοβολίας έτσι μπορούν να σχηματιστούν πολύπλοκες κατανομές δόσης ώστε να αντιμετωπιστούν όγκοι που ποικίλουν σε σχήμα χωρίς να επηρεαστούν υγιή όργανα που μπορεί να βρίσκονται κοντά [5]. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο το κάθε προσαρμοσμένο πεδίο ακτινοβολίας χωρίζεται σε επιμέρους μικρότερα υποπεδία με διαφορετικό χρόνο ή μονάδες (MU) ακτινοβολήσης. Έτσι τα ομοιόμορφης έντασης πεδία σε συνδυασμό με την υπέρθεση των υποπεδίων μετασχηματίζονται σε πεδία ακτινοβολήσης στην περιοχή των οποίων η ένταση μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο[6]. Για να δημιουργηθούν τα υποπεδία υπάρχουν διάφοροι τρόποι που αναφέρονται παρακάτω [16]:

- **Segmental (step and shoot) MLC IMRT**

Η χρήση των πολύφυλλων κατευθυντήρων (MLC) έχει βοηθήσει και την εξέλιξη της IMRT. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλά πεδία από διάφορες γωνίες και το κάθε ένα από αυτά αποτελείται από έναν αριθμό υποπεδίων το σχήμα των οποίων μεταβάλλεται από του κατευθυντήρες πολλαπλών φύλλων (MLC). Σε κάθε γωνία που έχει προεπιλεγεί εφαρμόζονται υποπεδία με αποτέλεσμα το τελικό πεδίο να είναι διαμορφωμένης έντασης.

- **Dynamic**

Στη δυναμική IMRT κατά την διάρκεια της ακτινοβολήσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του γραμμικού επιταχυντή δεν αλλάζουν παρά μόνο των φύλλων του κατευθυντήρα (MLC) και των διαφραγμάτων αν υπάρχουν. Η κίνηση τους είναι γραμμική συνάρτηση της συνολικής χορηγούμενης δόσης του τελικού διαμορφούμενου σε ένταση πεδίου. Το αποτέλεσμα είναι πως η γωνία θέσης της κεφαλής και του βραχίονα να παραμένουν σταθερά ενώ υπάρχει συνεχή κίνηση των φύλλων του κατευθυντήρα για κάθε τους θέση.

- **Dynamic Arc**

Η θέση των φύλλων του κατευθυντήρα αλλάζει όπως αναφέρθηκε παραπάνω αλλά ταυτόχρονα και κατά την διάρκεια της ακτινοβολήσης αλλάζει η γωνία του βραχίονα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Η γωνία του βραχίονα και η θέση των φύλλων αλλάζει γραμμικά σε σχέση με τον αριθμό των MUs. Με αυτή τη διαδικασία η θεραπεία γίνεται σε λιγότερο χρονικό διάστημα, ενώ η κατανομή της δόσης στον στόχο είναι ομοιόμορφη.

Η τοξοειδής ακτινοθεραπεία διαμορφωμένης έντασης (VMAT) δίνει την δυνατότητα για μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας όσον αφορά την κατανομή της δόσης έτσι ώστε να προσαρμοστεί στο σχήμα του όγκου με μείωση όμως της δόσης στους γειτονικούς ιστούς. Ο ασθενής ακτινοβολείται περιστροφικά και από πολλές κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να ακτινοβολείται πάντα ο όγκος αλλά κάθε φορά διαφορετικός υγιής ιστός ελαχιστοποιώντας έτσι την δόση που λαμβάνουν. Καθώς περιστρέφεται ο γραμμικός επιταχυντής υπάρχει ο πολύφυλλος κατευθυντήρας ο οποίος αλλάζει το σχήμα του πεδίου κατά την περιστροφή της κεφαλής του γραμμικού η ένταση της δέσμης μεταβάλλεται δίνοντας την δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής IMRT σε μικρότερο χρόνο [7].

Στερεοτακτική Ακτινοχειρουργική (SRS)

Η στερεοτακτική ακτινοχειρουργική (Stereotactic Radiosurgery -SRS) είναι μια εξελιγμένη τεχνική ακτινοθεραπείας που αναπτύχθηκε για την θεραπεία μικρών εγκεφαλικών όγκων και λειτουργικών ανωμαλιών του εγκεφάλου. Η βασική αρχή της τεχνικής είναι η υψηλή ακρίβεια χορήγησης, εξαιρετικά στοχευμένης ακτινοβολίας. Η εξέλιξη της έχει σαν αποτέλεσμα να εφαρμόζεται και σαν θεραπεία σωματικών όγκων ως στερεοτακτική ακτινοθεραπεία σώματος (SBRT)[8].

Παρά την ονομασία του το SRS είναι μια μη χειρουργική διαδικασία που παρέχει στοχευμένη ακρίβεια με πολύ υψηλές δόσεις σε μια ή λίγες θεραπείες σε αντίθεση με την παραδοσιακή ακτινοθεραπεία. Στόχος είναι η καταστροφή DNA στοχευμένων κυττάρων ώστε να χάσουν την ικανότητα της αναπαραγωγής σε συνδυασμό με την ελάχιστη επίδραση στους υγιείς ιστούς. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί λεπτές δέσμες υψηλής ενέργειας οι οποίες μπορούν να παραχθούν με διαφορετικούς τρόπους όπως με γραμμικούς επιταχυντές (LINAC) που χρησιμοποιούν ακτίνες X σαν το CyberKnife, με Gamma Knife που χρησιμοποιούν 192 ή 201 μικρές δέσμες ακτίνων γάμα.

Απεικονιστικά Καθοδηγούμενη Ακτινοθεραπεία (IGRT)

Η κατευθυνόμενη με απεικόνιση ακτινοθεραπεία είναι η από τις πιο σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται καθώς κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας γίνεται χρήση απεικόνισης για την βελτίωση της ακρίβειας της χορήγησης της δόσης [3]. Με τη χρήση δισδιάστατων ή και τρισδιάστατων τεχνικών απεικόνισης που διαθέτει το IGRT γίνεται απεικόνιση του όγκου πριν, μετά και κατά την διάρκεια της θεραπείας. Συγκρίνοντας όλες τις εικόνες μπορούν να προσαρμοστούν η θέση του ασθενή και οι δέσμες ακτινοβολίας με μεγάλη ακρίβεια. Για την καλύτερη ευθυγράμμιση και στόχευση χρησιμοποιείται συνήθως αξονική τομογραφία και μαγνητική τομογραφία. για τον προσδιορισμό του ακριβούς σχήματος καθώς και της θέσης του όγκου που είτε μπορεί να χρειαστούν οι πληροφορίες για την επόμενη θεραπεία είτε σαν σημείο αναφοράς για να συγκριθούν με τις νέες εικόνες που λαμβάνονται πριν την θεραπεία για να γίνουν προσαρμογές θέσης.

Το πλεονέκτημα που διαθέτει η τεχνική IGRT είναι ότι διορθώνει και ταυτόχρονα μειώνει το ποσοστό σφάλματος της τοποθέτησης του ασθενούς και προσφέρει την δυνατότητα μείωσης του τελικού περιθωρίου ακτινοβόλησης.

4. Ανάγκη Συστημάτων Τοποθέτησης

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην ακτινοθεραπεία είναι η σωστή τοποθέτηση του ασθενούς κατά την ακτινοβόληση. Το ανθρώπινο σώμα δεν μπορεί να παραμείνει ακίνητο είτε λόγω της αναπνοής είτε λόγω των κινήσεων των εσωτερικών οργάνων. Αυτές οι κινήσεις δυσκολεύουν να δημιουργηθεί ένα πλάνο θεραπείας το οποίο δεν θα ακτινοβολεί υγιείς ιστούς αλλά μονό τις περιοχές που είναι απαραίτητες.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος δημιουργήθηκαν τεχνικές όπως η Απεικονιστικά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (IGRT). Στην τεχνική IGRT για την διευκόλυνση του εντοπισμού του όγκου χρησιμοποιούνται λέιζερ που υπάρχουν στον χώρο και στοχεύουν τα σημάδια στο δέρμα του ασθενούς. Ταυτόχρονα ανάλογα το

σημείο που θα ακτινοβοληθεί έχουν δημιουργηθεί και συσκευές για πλήρη ακινητοποίηση όπως θερμοπλαστικές μάσκες [1],[2]. Ωστόσο η εισαγωγή της αξονικής τομογραφίας με κωνική δέσμη (CBCT) βοήθησε στην βελτίωση των αποκλίσεων και την ακρίβεια χορήγησης δόσης στον όγκο.

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνική ακτινοθεραπείας είναι η Επιφανειακή Καθοδηγούμενη Ακτινοθεραπεία (SGRT) που σε σύγκριση με την IGRT είναι δεν χρησιμοποιεί σημάδια στο δέρμα του ασθενούς αλλά διαθέτει ένα σύστημα οπτικής σάρωσης επιφάνειας για τον εντοπισμό θέσης του ασθενούς και την παρακολούθηση την ενδοκοιλιακής κίνησης. Μέσω αυτής της τεχνικής παρέχονται χιλιάδες σημεία αναφοράς στο δέρμα του ασθενούς και παρακολουθείται με ακρίβεια οι κινήσεις σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια της θεραπείας διασφαλίζοντας ότι η ακτινοβολία παρέχεται με ασφάλεια. Η ασφάλεια ενισχύεται περισσότερο από την λειτουργία αυτόματης παύσης του συστήματος η οποία διακόπτει αυτόματα την θεραπεία εάν μετακινηθεί ο ασθενής εκτός της ασφαλούς θέσης κατά την διάρκεια της.

5. Επιφανειακά Καθοδηγούμενη Ακτινοθεραπεία (SGRT)

Η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (Surface Guided Radiation Therapy-SGRT) θεωρείται μια από τις ταχέως αναπτυσσόμενες τεχνικές απεικόνισης που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ακρίβειας κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας. Στην SGRT παρακολουθείται με ακρίβεια η εξωτερική επιφάνεια του ασθενούς για να διασφαλιστεί ότι η τοποθέτηση του ασθενούς δεν έχει μεταβληθεί. Πέρα από την επαλήθευση της θέσης του ασθενούς πριν από την θεραπεία παρακολουθείτε και η κίνηση του ασθενούς κατά την διάρκεια της θεραπείας καθώς το σύστημα αναγνωρίζει τις κινήσεις αφού διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης δηλαδή πάνω-κάτω, εμπρός και πίσω, πλάι-πλάι και όλες τις περιστροφές. Η επαλήθευση του εντοπισμού θέσης με ακρίβεια κάτω του χιλιοστού σε πραγματικό χρόνο λειτουργεί σαν προστασία καθώς η δέσμη της ακτινοβολίας ενεργοποιείται μόνο όταν ο ασθενής είναι σωστά στην θέση του και η δέσμη διακόπτεται αμέσως εάν κινηθεί [9].

Η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία σαν πρώτη μορφή στηριζόταν στους κλινικούς ιατρούς να θέσουν τον ασθενή σύμφωνα με τα τατουάζ-σημάδια που είχαν στο δέρμα τους σε συνδυασμό με τα λέιζερ του δωματίου που αντιπροσωπεύουν το ισόκεντρο της θεραπείας [11]. Με τη χρήση αυτών μπορεί να μετρηθεί η απόσταση της πηγής με την επιφάνεια έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή θέση του ασθενή [12]. Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σημάδια γίνεται η στόχευση με τον γραμμικό επιταχυντή. Ο ασθενής παρακολουθείται από ένα κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης (CCTV) έξω από το δωμάτιο θεραπείας ώστε να επιβεβαιωθεί η θέση και να διατηρηθεί κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας [13].

Τα τελευταία χρόνια η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία χρησιμοποιεί οπτική σάρωση επιφάνειας για τον εντοπισμό της θέσης του ασθενούς, παρακολούθηση της ενδοπλασματικής κίνησης και τις τεχνικές αναπνοής. Ο οπτικός εντοπισμός βασίζεται σε κάποιες βασικές τεχνολογίες δηλαδή την καταγραφή μέσω βίντεο, τον εντοπισμό της κίνησης με βάση τα laser σε συνδυασμό με τα σημάδια που έχει ο ασθενής στο σώμα του ώστε να εντοπιστεί η θέση του. Μέσω των εργαλείων

που υπάρχουν φτάνουμε στο σημείο της ψηφιακής απεικόνισης των επιφανειών έχοντας σε πραγματικό χρόνο την χαρτογράφηση της επιφάνειας ενδιαφέροντος [17].

Κύριες Τεχνολογίες Σάρωσης

- Καταγραφή Βίντεο

Ο χώρος που πραγματοποιείται η θεραπεία διαθέτει ένα σύστημα CCTV καταγραφής που παρακολουθεί τον ασθενή σε περίπτωση κίνησης κατά την διάρκεια της θεραπείας όπου υπάρχει η δυνατότητα του οπτικού εντοπισμού και παρακολούθησης που μπορεί να διακοπεί ανά πάσα στιγμή σε περίπτωση που πρέπει να επαλειφθεί η επανατοποθέτηση του ασθενούς [14]. Επίσης το σύστημα CCTV κρατά αρχείο για την οποιαδήποτε κίνηση του ασθενούς και αναλύει με ακρίβεια 1mm.

- Laser

Η ανίχνευση της κίνησης μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση των ισοκεντρικών λέιζερ στο δωμάτιο θεραπείας ή με την εγκατάσταση συστημάτων εύρεσης και σάρωσης λέιζερ. Η πιο πρόσφατη εφαρμογή για την ανίχνευση της επιφάνειας του ασθενή είναι ο συνδυασμός ενός λέιζερ και μιας κάμερας με ανάλυση στα 0,1 mm και επανατοποθέτηση ακρίβειας στα 0,5 mm όταν οι αλλαγές στο σώμα είναι μικρότερες από 20 mm. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι σχεδιασμένο να βοηθά στον πλάνο θεραπείας καθώς διορθώνει τα σφάλματα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της αναπνοής με την βοήθεια των σκιαγραφικών φαρμάκων [15],[48].

Ψηφιακή Απεικόνιση Επιφανειών

- «Δομημένο» Φως

Έχοντας υπόψιν τις εφαρμογές της στερεοφωτογεωμετρίας που χρησιμοποιούσαν ένα προβαλλόμενο μοτίβο ή μια παρεμβολή φωτός για να εξάγουν τρισδιάστατες πληροφορίες από φιλμ οι νεότερες εκδόσεις ψηφιακής απεικόνισης εντόπισαν δείκτες που τοποθετούνταν στην επιφάνεια του ασθενούς. Τα μεταγενέστερα συστήματα απεικόνισης επιφανειών χρησιμοποιούν την μέθοδο προβολής ψηφιακού δομημένου ή διαμορφωμένου φωτός στην επιφάνεια του ασθενούς με στόχο την ανέπαφη, μη επεμβατική απεικόνιση και παρακολούθηση της θέσης του ασθενούς. Το προβαλλόμενο μοτίβο, που ουσιαστικά περιβάλλει τον ασθενή, επιτυγχάνεται με χρήση λέιζερ, ή φωτός. Η προβολή με λέιζερ χρησιμοποιεί δύο ακτίνες που προβάλλονται έτσι ώστε η παρεμβολή μεταξύ των δύο παράγει ένα κανονικό σχέδιο σε απόσταση έχοντας σαν σκοπό τη δυνατότητα για απεριόριστο βάθος πεδίου. Η προβολή φωτός γίνεται από τον προβολέα και ανιχνεύεται από μια κάμερα έπειτα τοποθετείται ο ασθενής μέσα στα όρια της περιοχής που καλύπτει το φως. Η επιφάνεια του ασθενή είναι η εικόνα που βασίζεται στην γεωμετρική παραμόρφωση του ανακλώμενου οπτικού σχεδίου που ανιχνεύεται από την κάμερα. Η προβολή ψευδοτυχαίου μοτίβου εκπέμπεται από τον προβολέα και ανιχνεύεται από κατάλληλη κάμερα και αφού τοποθετηθεί ο ασθενής με αυτό το στιγματισμένο μοτίβο φωτός η επιφάνεια του απεικονίζεται με βάση την αναγνώριση του μοτίβου σε ένα σημείο της επιφάνειας και τον τριγωνισμό αυτής της θέσης των σημείων από τη μονάδα κάμερας. Η προβολή φωτός με δομημένο τρόπο μπορεί να επιτευχθεί με πολλές τεχνικές που εξαρτώνται από εφαρμογή δηλαδή τη απεικόνιση κινούμενων αντικειμένων ή ακίνητων αντικειμένων.

- Βαθμονόμηση της Προβολής «Δομημένου» Φωτός

Ένας σημαντικός παράγοντας ώστε να υπάρχει ακρίβεια στη τρισδιάστατη απεικόνιση επιφανειών είναι η βαθμονόμηση τόσο της κάμερας καταγραφής αλλά και του προβολέα φωτός. Η κάμερα και ο προβολέας καθώς βαθμονομούνται πρέπει να διασφαλίζεται η σύνδεση μεταξύ των εικονοστοιχείων (pixel) του ανιχνευτή της κάμερας και μιας τρισδιάστατης γραμμής στον χώρο πάνω στην οποία υπάρχει ένα σημείο στην επιφάνεια των αντικειμένων. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με την λήψη πολλαπλών δισδιάστατων εικόνων με την βοήθεια ενός γνωστού ομοιώματος με σταθερές αποστάσεις και γωνίες από την κάμερα του ανιχνευτή. Το ομοίωμα που χρησιμοποιείται επί το πλείστον είναι σε μορφή σκακιέρας διότι έχει εύκολο εντοπισμό χαρακτηριστικών για την αντιστοίχιση των δισδιάστατων και τρισδιάστατων χώρων και τοποθετείται στο κρεβάτι θεραπείας σε απόσταση πηγής από την επιφάνεια (SSD).

Όσον αφορά την βαθμονόμηση του προβολέα φωτός υπάρχουν δυο παράγοντες που θα πρέπει να ελέγχονται, δηλαδή την ένταση του φωτός και την γεωμετρία της προβολής του φωτός. Αρχικά η βαθμονόμηση της έντασης περιλαμβάνει την προβολή είτε ένα μοτίβο από τελείες ή ένα μοτίβο από σταγόνες και την σχέση μεταξύ προβαλλόμενης έντασης και τον προσδιορισμό της ανιχνευόμενης έντασης εικονοστοιχείων. Η γεωμετρική βαθμονόμηση του προβολέα είναι παρόμοια με εκείνη της κάμερας με την διαφορά πως είναι αντίστροφα οι γνωστές τιμές στο επίπεδο της εικόνας και τις μετρούμενες τιμές σε τρισδιάστατα σημεία[49].

- Αλγόριθμος ICP (Iterative Closest Point)

Στην επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία η βασική αρχή είναι η σύγκριση της επιφάνειας του ασθενή με μια αναφερόμενη επιφάνεια και έπειτα υπολογίζονται οι μετατοπίσεις αυτές ώστε να ευθυγραμμιστούν οι δυο επιφάνειες. Για την αντιμετώπιση της σωστής ευθυγράμμισης η μέθοδος που χρησιμοποιείται κυρίως στο SGRT είναι ο αλγόριθμος ICP (Iterative Closest Point-επαναληπτικό πλησιέστερο σημείο) που δημιουργεί μια αντιστοιχία μεταξύ των κοντινότερων σημείων και των σημείων αναφοράς των αντίστοιχων επιφανειών.

6. Εμπορικά Συστήματα SGRT

Vision RT AlignRT System

Το σύστημα απεικόνισης επιφάνειας AlignRT παρακολουθεί την θέση του ασθενούς πριν και κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας για να βοηθήσει στην ρύθμιση και στην ακρίβεια τη θεραπείας. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι διατηρεί την δέσμη παρακολούθησης και ενημερώνει τον θεράποντα αν ο ασθενής κουνηθεί ή περιστρέφει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και η αξιόπιστη ανίχνευση καθώς παρακολουθεί συνεχώς την διάρκεια της θεραπείας για οποιαδήποτε κίνηση πριν κατά την διάρκεια και μετά την απεικόνιση. Το σύστημα δεν απαιτεί τατουάζ και τα παρελκόμενα του δεν έρχονται σε επαφή με τον ασθενή.

Το AlignRT χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό προβολέων φωτός και οπτικών καμερών για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου συστήματος για την παρακολούθηση της κίνησης του ασθενούς με ακρίβεια της τάξης των χιλιοστών. Οι προβολείς και οι κάμερες υψηλής ευκρίνειας είναι τοποθετημένες σε λοβούς στην οροφή της αίθουσας

θεραπείας, έχει 3 λοβούς για να επιτρέπει την οπτικοποίηση του ασθενούς σε οποιαδήποτε θέση ή γωνία (Εικόνα 1). Οι προβολείς εκπέμπουν λευκό φως και κόκκινο φως, σε ένα μοτίβο σκακιέρας για τη δημιουργία της επιφάνειας του ασθενούς. Ο τρισδιάστατος χάρτης που δημιουργείται συγκρίνεται με μια επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο. Η επιφάνεια αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιήσει το περίγραμμα σώματος που προέρχεται από τα δεδομένα CT που υπολογίζεται στο σύστημα σχεδιασμού θεραπείας ή καταγράφεται στην αίθουσα θεραπείας σε μια δεδομένη χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας το σύστημα κάμερας. Τα αποτελέσματα αντιστοίχισης επιφανειών εμφανίζονται στους χρήστες ως μια σειρά από 6 DOF(degrees of freedom) τιμές βαθμούς ελευθερίας γνωστές ως δέλτα πραγματικού χρόνου (RTDs).

Οι RTD ποσοτικοποιούν την ευθυγράμμιση μεταξύ της τρέχουσας και της πρότυπης θέσης του ασθενούς μέσω διαφορών σε τρεις μετατοπίσεις (κάθετες, πλευρικές και διαμήκεις) και σε τρεις περιστροφές (περιστροφή ή εκτροπή, βήμα και κύλιση). Ο έλεγχος γίνεται 25 φορές το δευτερόλεπτο [50].



Εικόνα 1. Ρύθμιση των βραχιόνων με τις κάμερες του συστήματος AlignRT μέσα στην αίθουσα θεραπείας [68].

Τεχνικές ανακατασκευής και καταχώρησης επιφάνειας

Η βασική ιδέα που βασίζεται το σύστημα AlignRT είναι ο συνδυασμός της κάμερας και του λογισμικού ανακατασκευής 3D σε πραγματικό χρόνο για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής πυκνότητας της εξωτερικής επιφάνειας του ασθενούς, όπου επιτυγχάνεται με τεχνικές ανακατασκευής της επιφάνειας και την διαδικασία καταχώρησης της. Η τεχνική που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση των πληροφοριών θέσης είναι αυτή του τριγωνισμού, εμπλέκοντας τις οπτικές διατάξεις εκπομπής φωτός και λήψης 2D εικόνων (κάμερες σε βραχίονα) (Εικόνα 2). Η μέθοδος τρισδιάστατης τριγωνοποίησης εφαρμόζεται για όλα τα σημεία αντιστοίχισης που προσδιορίζονται στις δύο 2D εικόνες και δημιουργείται ένας χάρτης τρισδιάστατων κορυφών με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Η επιφάνεια που προκύπτει από όλες τις κορυφές συγκρίνεται με την πρότυπη εικόνα (επιφάνεια) του ασθενή.



Εικόνα 2. Βραχίονας της κάμερας AlignRT [69].

Η διαδικασία αντιστοίχισης επιφανειών που χρησιμοποιείται από το AlignRT χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην επαναληπτική τεχνική ελαχιστοποίησης του ελάχιστου τετραγώνου.

Hardware

Τα βασικά μέρη που διαθέτει το AlignRT είναι έναν σταθμό εργασίας με υπολογιστή, τρεις μονάδες κάμερας 3D και μια πλάκα που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση της κάμερας. Ο σταθμός εργασίας περιλαμβάνει πληκτρολόγιο, οθόνη και ποντίκι και βρίσκεται έξω από την αίθουσα θεραπείας στην περιοχή της κονσόλας θεραπείας έτσι οι θεραπευτές μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με το λογισμικό AlignRT τόσο μέσα από την αίθουσα θεραπείας για τη ρύθμιση του ασθενούς όσο και κατά τη διάρκεια της θεραπείας από την περιοχή της κονσόλας θεραπείας. Οι μονάδες των καμερών έχουν αυτόνομη μονάδα τροφοδοσίας καθώς και κάθε μονάδα είναι συνδεδεμένη σε μια λαβή που βρίσκεται στη θέση εργασίας, για απεικόνιση υψηλής ταχύτητας και μετάδοση δεδομένων.

Το σύστημα διαθέτει επίσης μια προαιρετική κάρτα ελεγκτή ενσωματωμένης πύλης (Integrated Gate Controller-IGC) ή άλλες διεπαφές πύλης, που υπάρχουν εντός του σταθμού εργασίας, διασυνδέονται με τον εξοπλισμό VisionRT με CT και συστήματα επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένων των διασυνδέσεων πυλών σύνδεσης και θεραπείας πρωτονίων. Το οπτικό υλικό που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πληροφοριών για την επιφάνεια του ασθενούς στεγάζεται σε μονάδες κάμερας εντός της αίθουσας θεραπείας έχοντας τρεις βραχίονες στην οροφή. Οι βραχίονες 1 και 2 βρίσκονται σε απόσταση περίπου 30 cm από την αριστερή και τη δεξιά πλάγια θέση, αντίστοιχα και ο λοβός 3 βρίσκεται στο πόδι του καναπέ θεραπείας. Κάθε βραχίονας διαθέτει έναν προβολέα LED, δύο αισθητήρες εικόνας υψηλής ευκρίνειας και ένα λευκό LED για βαθμονόμηση και κατά τη λήψη των εικόνων ασθενών. Ο προβολέας LED προβάλλει το ψευδοτυχαίο μοτίβο κηλίδων, μέσω μιας διαφάνειας κηλίδων, στην επιφάνεια του ασθενούς, παρέχοντας έτσι τις παραλλαγές υψής που απαιτούνται για τη διαδικασία ανακατασκευής. Το φως που προβάλλεται στην επιφάνεια του ασθενούς είναι στο κόκκινο ορατό φάσμα. Η επιλογή του κόκκινου φωτός έγινε διότι παρέχει χαμηλότερη απορρόφηση από το δέρμα από άλλα μήκη κύματος, η άνεση του ασθενούς είναι υψηλότερη με το κόκκινο φως λόγω της χαμηλότερης ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού για την αντίληψη της φωτεινότητας στο κόκκινο

μήκος κύματος και το κόκκινο φως εμπίπτει στην «ομάδα εξαίρεσης» για φωτοβιολογική ασφάλεια σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 62471:2008.

Οι δύο αισθητήρες εικόνας χωρίζονται με μια γνωστή απόσταση και χρησιμοποιούνται για την απόκτηση των ακατέργαστων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή της επιφάνειας 3D. Μια πρόσθετη επιλογή υλικού είναι ο σταθμός εργασίας AlignRT εκτός σύνδεσης (AlignRT Offline), παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με το λογισμικό AlignRT για να εκτελούν ορισμένες προπαρασκευαστικές εργασίες που δεν απαιτούν τον ασθενή ή το θεραπευτικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής πληροφοριών ασθενούς και του καθορισμού περιοχών ενδιαφέροντος (ROI).

Περιοχή Ενδιαφέροντος (Region of Interest-ROI)

Ένα χαρακτηριστικό που διαθέτει το AlignRT είναι ότι τα υπολογισμένα RTD (real-time deltas) βασίζονται στην περιοχή ενδιαφέροντος που θέτει ο χρήστης. Οι 6 βαθμοί ελευθερίας σε συνδυασμό με την περιοχή ενδιαφέροντος οι πληροφορίες που παρέχονται είναι πιο σχετικές και πιο ακριβείς στην παρακολούθηση της επιφάνειας. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει πολλαπλά ROI για να βοηθήσει στη ρύθμιση της τοποθέτησης του ασθενούς με αποτέλεσμα τα δεδομένα της επιφάνειας να μπορούν να αποτυπώσουν μια σχετικά μεγάλη περιοχή της ανατομίας για να διασφαλιστεί η κατάλληλη στάση. Δηλαδή πολλαπλές ROI μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ακριβών θέσεων του χεριού, του πηγουνιού και του ισχίου, διατηρώντας παράλληλα τη σωστή θέση ισοκέντρου για θεραπείες μαστού. Κατά τη διάρκεια της θεραπείας, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείτε ένα ROI όπου οι μετατοπίσεις RTD υπολογίζονται γύρω από το ισόκεντρο θεραπείας (ένα ισοκεντρικό ROI). Τέλος μπορεί να ληφθεί ένα στιγμιότυπο ολόκληρης της επιφάνειας του ασθενούς, επιτρέποντας τον οπτικό εντοπισμό και διόρθωση των μεγάλων σφαλμάτων ρύθμισης[51].

Βαθιά Εισπνοή και κράτηση της Αναπνοής- Deep Inspiration Breath Hold (DIBH)

Κατά την διάρκεια της θεραπείας υπάρχουν κινήσεις που δεν μπορούν να περιοριστούν όπως της αναπνοής και των εσωτερικών οργάνων, οπότε με την τεχνική του κρατήματος της αναπνοής μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές μέτρησης της αναπνοής το AlignRT χρησιμοποιεί την αντιστοίχιση επιφάνειας 6DOF για να παρέχει τις πιο σχετικές και ευαίσθητες πληροφορίες κίνησης. Με την χρήση του DIBH το AlignRT δίνει την δυνατότητα με μια γραμμή εργαλείων να βοηθήσει στην καθοδήγηση της αναπνοής 6DOF στον χρήστη και προαιρετικά στον ασθενή μέσω μιας συσκευής οπτικής ανάδρασης (το Real Time Coach™). Τα αποτελέσματα ελέγχου της αναπνοής οπτικοποιούνται μέσω ορίων (γραμμών με χρωματικό κώδικα) για τα οποία ο χειριστής γνωρίζει εάν ο ασθενής κινείται εντός κάποιας ανοχής του συστήματος ή εκτός[10],[52].

Διαχείριση Αναπνευστικής Κίνησης

1. GateCT

Το GateCT είναι μια ψηφιακή πλατφόρμα που επιτρέπει την παρακολούθηση σημείων ή περιοχών της επιφάνειας του δέρματος ενός ασθενούς σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της λήψης CT. Το GateCT χρησιμοποιεί συνήθως μια κεντρικά τοποθετημένη μονάδα κάμερας 3D, ισοδύναμη με αυτές που χρησιμοποιεί

το AlignRT, η οποία είναι ευθυγραμμισμένη στο κεντρικό επίπεδο σάρωσης του σαρωτή CT και ο στόχος του είναι να παρακολουθεί την αναπνευστική κίνηση κατά τη λήψη δεδομένων αξονικής τομογραφίας (4D-CT). Αυτό απαιτεί συγχρονισμό με το λογισμικό ανακατασκευής εικόνας αξονικής τομογραφίας. Όταν δημιουργηθεί το μοντέλο της τρισδιάστατης επιφάνειας του ασθενούς ο χρήστης μπορεί να επιλέξει σημεία παρακολούθησης για την ανίχνευση της αναπνευστικής κίνησης και της κίνησης του ασθενούς.

2. GateRT

Έχοντας την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες υποδοχές κάμερας με το AlignRT, το GateRT έχει σχεδιαστεί για να υπολογίζει και να καταγράφει την αναπνευστική κίνηση και την αναπνευστική κατάσταση ενός ασθενούς στην αίθουσα θεραπείας χρησιμοποιώντας παρακολούθηση επιφανειών 3D σε πραγματικό χρόνο[53].

Συμπέρασμα

Το AlignRT είναι ένα σύστημα οπτικής απεικόνισης το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της επιφάνειας του δέρματος ενός ασθενούς σε 3D πριν και κατά τη διάρκεια της θεραπείας ακτινοθεραπείας. Κατά τη διάρκεια της θεραπείας, το AlignRT είναι σε θέση να παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο και κάθε φορά που ο ασθενής απομακρύνεται από την προβλεπόμενη θέση αναφοράς θεραπείας, το σύστημα υπολογίζει αυτήν την κίνηση και παρουσιάζει τις πληροφορίες στον χρήστη μέσω τιμών 6DOF RTD. Επίσης δίνει την δυνατότητα να προστεθούν υλικά και λογισμικά τρίτων κατασκευαστών όπως το κρεβάτι της θεραπείας μπορεί να γίνει αυτοματοποιημένη η κίνηση για την ρύθμιση του ασθενούς.

C-RAD Catalyst

Η C-RAD διαθέτει το σύστημα επιφανειακής καθοδήγησης Sentinel μαζί με τη φόρμα πλατφόρμας λογισμικού c4D. Αρχικά κυκλοφόρησε το σύστημα καθοδήγησης επιφάνειας Catalyst (μονής κάμερας), με συνέχεια με το σύστημα Catalyst HD, το οποίο προσφέρει τρεις κάμερες. Η C-RAD κυκλοφόρησε την έκδοση Catalyst Proton Therapy που σχεδιάστηκε για θεραπεία πρωτονίων/σωματιδίων. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί είτε σάρωση λέιζερ (Sentinel) είτε σάρωση επιφάνειας ψηφιακής επεξεργασίας φωτός μονής/πολλαπλής κάμερας (DLP) στο εύρος σχεδόν ορατού φωτός (Catalyst/ Catalyst HD/ Catalyst PT) με σκοπό την παροχή επιφανειακής καθοδήγησης ακτινοθεραπείας (SGRT) για ασθενείς κατά την προσομοίωση αξονικής τομογραφίας (CT), τη ρύθμιση της θεραπείας ή/και την παροχή θεραπείας.

Η μονάδα σάρωσης επιφάνειας λέιζερ Sentinel της C-RAD είναι τοποθετημένη στην οροφή είτε σε αίθουσες θεραπείας και προσομοίωσης/διαγνωστικού ελέγχου, ενώ οι μονάδες κάμερας επιφάνειας Catalyst/Catalyst HD τοποθετούνται στην οροφή σε δωμάτια θεραπείας. Τα συστήματα C-RAD είναι συμβατά με ποικίλες συσκευές όπως γραμμικούς επιταχυντές, συστήματα απεικόνισης, και εγκαταστάσεις πρωτονίων και βαρών ιόντων.

Το C-RAD βασίζεται σε έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο επαναλαμβανόμενου πλησιέστερου σημείου (ICP) για την παρακολούθηση της ρύθμισης του ασθενούς και της παροχής θεραπείας. Το πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι επιτρέπει την

παραμορφώσιμη εγγραφή εικόνας, η οποία διευκολύνει την ευθυγράμμιση εύκαμπτων περιοχών του σώματος, όπως ο μαστός ή τα άκρα. Υπάρχει επίσης ξεχωριστή ενότητα στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής (SRS) με βελτιωμένο πλέγμα ανάλυσης για ακριβέστερη θεραπεία.

Το λογισμικό cPosition αντιμετωπίζει την ακρίβεια ενδοκλασματικής ρύθμισης και παρακολουθεί τις αλλαγές στην επιφάνεια του ασθενούς, ενώ το λογισμικό cMotion παρακολουθεί την κίνηση εντός κλασμάτων και ποσοτικοποιεί τις ακούσιες κινήσεις. Το λογισμικό cRespiration χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό κουτί πύλης που συνδέεται απευθείας με τα γυαλιά linac και βίντεο που επιτρέπουν συγχρονισμένες τεχνικές αναπνοής και διαχείριση αναπνευστικής κίνησης. Το C-RAD παρέχει καθημερινή διασφάλιση ποιότητας (QA) για να λαμβάνεται υπόψη η πτώση του κρεβατιού και να διατηρείται ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων. Τα συστήματα C-RAD προορίζονται να παρέχουν μια μη επεμβατική και μη ιονίζουσα μέθοδο για τη βελτίωση της συνολικής ακρίβειας της παροχής ακτινοβολίας μέσω της παρακολούθησης της επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο κατά τη ρύθμιση του ασθενούς και την παράδοση της θεραπείας [54].

Σχεδιασμός Συστήματος

1. Hardware

Το C-RAD διαθέτει δύο βασικά εργαλεία για καθοδήγηση στην επιφάνεια με το πρώτο να είναι το Sentinel ένα σύστημα σάρωσης επιφάνειας με λέιζερ που εγκατασταστέται σε αίθουσα θεραπείας αξονικής τομογραφίας ή ακτινοθεραπείας και χρησιμοποιείται για να βοηθά στη ρύθμιση του ασθενούς, την αναπνευστική απεικόνιση και τις τεχνικές παράδοσης, όπως 4D-CT και DIBH. Τα προϊόντα Catalyst αποτελούνται από μία ή τρεις κάμερες οπτικής απεικόνισης επιφάνειας που είναι τοποθετημένες στην οροφή στην αίθουσα θεραπείας ακτινοθεραπείας και χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη ρύθμιση, τη θέση και την παρακολούθηση της κίνησης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της χορήγησης της θεραπείας (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. (Αριστερά) Ρύθμιση του συστήματος Catalyst HD τριών καμερών που είναι τοποθετημένοι στην οροφή της αίθουσας του γραμμικού επιταχυντή. (Δεξιά) Μια κοντινή εικόνα μιας κάμερας του Catalyst HD [70].

Τα συστήματα Sentinel και Catalyst/Catalyst HD χρησιμοποιούνται για ακρίβεια και σταθερότητα στην τοποθέτηση και την ανίχνευση κίνησης κατά την ακτινοθεραπεία. Το Catalyst έχει ακρίβεια τοποθέτησης και ανίχνευσης εντός 1 mm, ενώ το Catalyst

HD, με δύο επιπλέον κάμερες, επιτυγχάνει ακρίβεια έως 0,5 mm. Το Sentinel βασίζεται σε λέιζερ σάρωσης για τις μετρήσεις του. Τα συστήματα αυτά είναι σταθερά μακροπρόθεσμα (εντός 0,3 mm) και προσφέρουν αξιοπιστία μέτρησης εντός 0,2 mm. Χρησιμοποιούν επίσης συσκευές παρακολούθησης κρεβατιού και πύλης, σημαντικές για την αποτελεσματική διαχείριση της κίνησης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Μια συσκευή παρακολούθησης κρεβατιού με λέιζερ χρησιμοποιείται εντός του δωματίου CT για να αποφευχθεί η μετατόπιση του συστήματος απεικόνισης επιφάνειας και για να ελαχιστοποιηθούν τα αποτελέσματα που προκαλούνται από την πτώση του καναπέ για προσαρμογές ισοκέντρου που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό θεραπειών πυλών.

Η συσκευή παρακολούθησης κρεβατιού χρησιμοποιεί μια μονάδα λέιζερ που κινείται κάθετα και έναν λευκό ανακλαστήρα στο άκρο του κρεβατιού, με το λέιζερ να μετρά την απόσταση σε πραγματικό χρόνο. Πριν από κάθε αξονική τομογραφία, το λέιζερ σαρώνει το κρεβάτι κατακόρυφα για να καθορίσει το εικονικό του ύψος και παρακολουθεί τυχόν μεταβολές κατά τη διάρκεια της κίνησης. Για τη διαχείριση της δέσμης επεξεργασίας ή την εκτέλεση 4D-CT σάρωσης, απαιτείται ένα πλαίσιο εξωτερικής διασύνδεσης πύλης (EXGI), το οποίο συνδέει τη συσκευή παρακολούθησης με τον σαρωτή CT [55].

- **Sentinel**

Η μονάδα σάρωσης επιφάνειας Sentinel εγκαθίσταται συνήθως στην οροφή των αιθουσών προσομοίωσης ή θεραπείας, σε ύψος περίπου 3 μέτρων από το δάπεδο και σε απόσταση 2-3 μέτρων από την πηγή λέιζερ. Η θέση της επηρεάζει την ικανότητα δημιουργίας εικόνων επιφάνειας, και οι εγκαταστάσεις προσαρμόζονται για συγκεκριμένες χρήσεις. Η εγκατάσταση μπορεί να βελτιστοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη το οπτικό πεδίο του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού και τις περιοχές που υποβάλλονται σε επεξεργασία. Το Sentinel έχει αποδειχθεί ότι συμπληρώνει αποτελεσματικά το σύστημα CBCT για την ακριβή ρύθμιση της καθημερινής θεραπείας. Η μονάδα αποτελείται από ένα λέιζερ κόκκινης γραμμής και έναν περιστρεφόμενο καθρέφτη ή γαλβανόμετρο, τροφοδοτούμενο μέσω οπτικής ίνας συνδεδεμένης σε υπολογιστή. Το ανακλώμενο φως ανιχνεύεται από κάμερα CCD, και οι γωνίες του φωτός χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τρισδιάστατης εικόνας μέσω τριγωνοποίησης (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Sentinel 4DCT το σύστημα οπτικής σάρωσης επιφάνειας βασισμένο σε λέιζερ με λειτουργικότητα για ανακατασκευή 4DCT [66].

- **Catalyst/Catalyst HD**

Το σύστημα Catalyst εγκαθίσταται στην οροφή για να αποφεύγονται παρεμβολές και να εξασφαλίζεται απρόσκοπτη θέαση από την περιστρεφόμενη γέφυρα. Το αρχικό σύστημα Catalyst περιλαμβάνει μία μονάδα κάμερας, ενώ τα πιο εξελιγμένα μοντέλα Catalyst HD/PT διαθέτουν τρεις μονάδες κάμερας για καλύτερη κάλυψη του ασθενούς. Οι κάμερες του Catalyst διαθέτουν έναν προβολέα DLP, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα υψηλής ταχύτητας τσιπ DLP με μικροκάτοπτρα, και μία κάμερα CCD, βαθμονομημένη στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Ο προβολέας DLP πραγματοποιεί τρισδιάστατες μετρήσεις επιφάνειας προβάλλοντας φως σε μια σειρά από μοτίβα με διάφορα μήκη κύματος πάνω στο σώμα του ασθενούς. Η μονόχρωμη κάμερα CCD καταγράφει συνεχώς τα μοτίβα του ανακλώμενου φωτός, και ένας αλγόριθμος ανακατασκευής συγκρίνει τα προβαλλόμενα και πρότυπα μοτίβα, προσδιορίζοντας τις συντεταγμένες κάθε pixel στην εικόνα.

2. Λογισμικό & Αλγόριθμος

Το λογισμικό Catalyst χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ICP που αρχικοποιεί δομές δεδομένων και εκτελεί μια καταχώρηση εικόνας μεταξύ της επιφάνειας αναφοράς (πηγή) και της τρέχουσας επιφάνειας ασθενούς (στόχος). Ο αλγόριθμος ICP χρησιμοποιεί τοπική βελτιστοποίηση πρώτον για επιλογή σημείων στην επιφάνεια της πηγής και ζευγαρώνει αυτά τα σημεία με μια επιφάνεια στόχο, δεύτερον ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της πηγής και των σημείων στόχου με τον υπολογισμό ενός μετασχηματισμού, και τρίτον εφαρμόζεται σε αυτόν τον μετασχηματισμό στην επιφάνεια της πηγής. Ο τροποποιημένος αλγόριθμος ICP που χρησιμοποιείται από το Catalyst επιτρέπει στις περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) μακριά από το ισόκεντρο να έχουν μικρότερη επίδραση στις μετατοπίσεις του ισόκεντρου, σε σύγκριση με τις ROI κοντά στο ισόκεντρο. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε τρία στοιχεία: την επιφάνεια πηγής, το γράφημα κόμβου και την επιφάνεια στόχου. Αρχικά, δημιουργείται ένα παραμορφώσιμο γράφημα κόμβου από την επιφάνεια αναφοράς, το οποίο καθορίζει συγκεκριμένα σημεία για τον αλγόριθμο ICP. Αυτά τα σημεία ευθυγραμμίζονται ακριβώς με την εικόνα στόχου, χρησιμοποιώντας δεδομένα

απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, η τελική εγγραφή εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο αλγόριθμο ICP και η εικόνα σε πραγματικό χρόνο με μέσο όρο χρόνου (με δυνατότητα διαμόρφωσης από τον χρήστη) να εμφανίζεται στον χρήστη[56].

Κύριες Διαδικασίες Κλινικής Λειτουργίας

1. Προσομοίωση CT με Sentinel

Πριν από την έναρξη της θεραπείας, ο ασθενής τοποθετείται στο κρεβάτι CT στην ίδια θέση που θα έχει κατά τη θεραπεία. Η σάρωση CT χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του εύρους των μετατοπίσεων του ασθενή κατά τη διάρκεια περιοδικών κινήσεων όπως η αναπνοή. Τα όρια των κινήσεων μπορούν να περάσουν στο λογισμικό του συστήματος για μετέπειτα σύγκριση κατά τη φάση της θεραπείας, μέσω της εφαρμογής cRespiration.

2. Αναδρομικά ταξινομημένη προσομοίωση 4D-CT

Η 4D-CT που αποκτάται με το σύστημα Sentinel επιτρέπει την καταγραφή του αναπνευστικού σήματος του ασθενούς χωρίς επαφή, αποφεύγοντας την ανάγκη για πρόσθετες συσκευές πάνω στο σώμα του. Το Sentinel χρησιμοποιεί ενεργοποίηση με βάση το πλάτος του σήματος (SNR = 14,6 dB). Υπάρχει η δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης των μετατοπίσεων και αναδρομικής εφαρμογής του λογισμικού post gaiting techniques έτσι ώστε οι ασθενείς να αναπνέουν ελεύθερα κατά τη διάρκεια της εξέτασης CT.

3. Προσομοίωση αναπνοής CT

Από μια μελέτη συγκράτησης της αναπνοής με την χρήση Sentinel επιτρέπει την καθοδήγηση του ασθενούς μέσω της τεχνικής εκπνοής και εισπνοής με κράτημα ή βαθιάς εισπνοής (DIBH). Μια μελέτη των Schönecker et al.(2016) αξιολόγησε το σύστημα C-RAD για την καθοδήγηση της τεχνικής DIBH (Deep Inspiration Breath Hold) και βρήκε ότι, σε έξι από εννέα ασθενείς, η καρδιά απομακρύνθηκε εντελώς από το πεδίο θεραπείας. Η τεχνική DIBH μείωσε τη μέγιστη δόση ακτινοβολίας στην καρδιά και στην αριστερή κατιούσα αρτηρία κατά 59% και 75% αντίστοιχα.

4. Καθοδήγηση στο δωμάτιο με Catalyst/Catalyst HD

- Αρχική ρύθμιση ασθενούς

Σε μια ημέρα θεραπείας, ο στόχος της αρχικής ρύθμισης του ασθενούς είναι να τοποθετηθεί ο ασθενής στην ίδια θέση που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση CT. Η εφαρμογή cPosition χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της ακριβούς θέσης του ασθενούς πριν από την ακτινοβολία. Μία από τις τρεις επιφάνειες αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το cPosition για την εκτέλεση αρχικής τοποθέτησης του ασθενούς:

- i. μια εικόνα αναφοράς που λήφθηκε από το σύστημα Sentinel κατά την προσομοίωση CT
- ii. η εξωτερική δομή του σώματος που εισάγεται από το DICOM RT από τη θεραπεία στο σύστημα προγραμματισμού
- iii. μια εικόνα αναφοράς που τραβήχτηκε από το σύστημα Catalyst/Catalyst HD στην αίθουσα θεραπείας

Οι ρυθμίσεις στο λογισμικό μπορούν να βελτιστοποιήσουν το μέγεθος του όγκου σάρωσης και τις παραμέτρους της κάμερας για μεμονωμένους ασθενείς. Για την σάρωση χρειάζεται η περιοχή που θα παρακολουθεί ο αλγόριθμος κατά τη ρύθμιση του ασθενούς και την παράδοση της θεραπείας. Αν χρειαστεί, μπορούν να γίνουν χειροκίνητες τροποποιήσεις για να αφαιρεθούν ανεπιθύμητες ή περιττές περιοχές ROI από τον όγκο αναφοράς, όπως συσκευές ακινητοποίησης ή σωλήνες οξυγόνου και ενδοφλέβιες γραμμές (IV). Ωστόσο, οι ακριβείς ρυθμίσεις πρέπει να προσαρμόζονται την πρώτη ημέρα της θεραπείας ώστε ο ασθενής να απεικονίζεται σωστά σε όλες τις κάμερες. Αν δεν διασφαλιστεί η σωστή απεικόνιση, η ακρίβεια στη ρύθμιση και παρακολούθηση του ασθενούς μπορεί να επηρεαστεί. Οι ρυθμίσεις πρέπει να βελτιστοποιούνται για την περιοχή του ασθενούς που θα υποβληθεί σε θεραπεία. Οι αποκλίσεις της ζωντανής εικόνας σε σχέση με την εικόνα αναφοράς εμφανίζονται στη διεπαφή cPosition ή προβάλλονται απευθείας στο σώμα του ασθενούς, προσφέροντας καθοδήγηση σε πραγματικό χρόνο, μέσω της δημιουργίας ενός χρωματικού χάρτη.

- **Παρακολούθηση Κίνησης Ασθενούς**

Η εφαρμογή cMotion (αποκλειστικά για Catalyst/Catalyst HD) χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για την παρακολούθηση της κίνησης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Οι πράσινες γραμμές στο κάτω μέρος της εικόνας δείχνουν την συνολική μετατόπιση του ασθενούς, υπολογισμένη μέσω του αλγορίθμου cMotion. Το διάγραμμα αυτό έχει μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή που ορίζεται από τον χρήστη, η οποία αν ξεπεραστεί, σταματά η θεραπεία. Παράλληλα, η εφαρμογή cRespiration μπορεί να παρακολουθεί τη θέση των σημείων αναφοράς κατά τη διάρκεια αναπνευστικά ρυθμιζόμενων θεραπειών, διασφαλίζοντας ότι ευθυγραμμίζονται με τις επιθυμητές θέσεις αναπνοής. Η διατήρηση της δέσμης μπορεί να ρυθμιστεί είτε για μια μέγιστη μετατόπιση του ισοκεντρικού διανύσματος (cMotion) είτε για ένα παράθυρο πύλης (cRespiration) ή και για τις δύο μεθόδους που ορίζονται από τον χρήστη[57].

Διασφάλιση Ποιότητας

1. Διασφάλιση ποιότητας του συστήματος Sentinel

Συνιστάται ημερήσιος έλεγχος του συστήματος Sentinel στην αίθουσα CT πριν από τη λειτουργία του συστήματος για να αποφευχθεί οποιαδήποτε μετατόπιση στη λήψη σήματος κατά την κίνηση του κρεβατιού. Ο πρώτος έλεγχος QA επαληθεύει τη θέση του κρεβατιού χωρίς τον ασθενή έπειτα το κρεβάτι ξεκινά από τη «θέση έναρξης» όπου έχει τοποθετηθεί ο ασθενής και στη συνέχεια μετακινείται προς τα εμπρός, μακριά από το Sentinel στη θέση στάσης, αναπαράγοντας την κίνηση του καναπέ κατά τη διάρκεια μιας αξονικής τομογραφίας. Διατίθεται μια λειτουργία βαθμονόμησης που επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία. Ωστόσο, γίνεται μια πρόσθετη μέτρηση με 70 κιλά βάρους που προστίθενται στον κρεβάτι CT για να προσομοιωθεί η πρόσθετη μεταβολή του κρεβατιού από έναν ασθενή.

2. Διασφάλιση ποιότητας του συστήματος Catalyst

Η C-RAD προτείνει τακτικό έλεγχο της κάμερας Catalyst/Catalyst HD για να εντοπιστούν πιθανές μετατοπίσεις στο σύστημα ευθυγράμμισης. Ενώ η πλήρης βαθμονόμηση του συστήματος γίνεται από τον τεχνικό, η βαθμονόμηση του ισοκέντρου μπορεί να γίνει από τον κλινικό φυσικό. Όπως και στο σύστημα Sentinel, ο καθημερινός ποιοτικός έλεγχος (QA) περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση του Catalyst με τρεις σφαίρες και τα λέιζερ του δωματίου. Κατά την αρχική εγκατάσταση,

δημιουργείται ένα μαθηματικό μοντέλο της συσκευής ελέγχου, και οι καθημερινοί έλεγχοι συγκρίνονται με αυτή την αναφορά για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του συστήματος [58].

Identify

Το IDENTIFY μπορεί να οριστεί σαν μια λύση της επιφανειακά καθοδηγούμενης ακτινοθεραπείας για την επαλήθευση της ρύθμισης του ασθενούς και την χαρτογράφηση της επιφάνειάς του. Η επιφάνεια αναφοράς προέρχεται από το σύνολο δεδομένων CT και συγκρίνεται με μια οπτική επιφάνεια. Οι αποκλίσεις από την αναφορά εμφανίζονται ως 6 γραμμές σφάλματος DOF σε συνδυασμό με μια ζωντανή ροή βίντεο που επικαλύπτει την επιφάνεια του ασθενούς με χρώματα, παρέχοντας στους θεραπευτές μια σκηνή πραγματικότητας που καθοδηγεί τις προσαρμογές στη θέση και τη στάση του ασθενούς. Το IDENTIFY χρησιμοποιεί την κάμερα χρόνου πτήσης (ToF) για πρόσθετη πλοήγηση και αρχική επαλήθευση από το κεφάλι μέχρι τα δάχτυλα του ασθενούς στο κρεβάτι και κάμερες για καθοδήγηση επιφανειακής εικόνας κατά την τελική τοποθέτηση του ασθενούς στο ισόκεντρο και την παρακολούθηση της κίνησης. Το σύστημα περιλαμβάνει βιομετρική ταυτοποίηση μέσω σάρωσης παλάμης και επαλήθευση με χρήση ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης δεδομένων αποθηκεύει τα αρχεία των συνεδριών του ασθενούς, ενώ μετά από κάθε συνεδρία παράγονται αυτόματες αναφορές που αποστέλλονται στο ογκολογικό σύστημα πληροφοριών (OIS) (Εικόνα 5) [59].

Σχεδιασμός Συστήματος

1. Ρύθμιση Κάμερας ToF

Η τοποθέτηση των βοηθητικών εργαλείων και η αρχική θέση του ασθενή γίνεται με την κάμερα εγκατάστασης IDENTIFY. Περιλαμβάνει έναν αισθητήρα RGB για την λήψη βίντεο και την ανίχνευση οπτικών δεικτών που είναι τοποθετημένοι στα βοηθητικά εργαλεία. Υπάρχει και ένας δεύτερος αισθητήρας σε αυτή την μονάδα που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις ToF.

2. Κάμερες Επιφανειακής Απεικόνισης

Η τελική ρύθμιση του ασθενούς πραγματοποιείται με μετρήσεις επιφάνειας μέσω ενός συστήματος κάμερας τοποθετημένου στην οροφή και προβολέων που προβάλλουν ένα στατικό τυχαίο σχέδιο στην επιφάνειά του. Κάθε προβολέας έχει δύο στερεοσκοπικές κάμερες, βαθμονομημένες από την εταιρεία και τον κλινικό χρήστη, οι οποίες καταγράφουν τη θέση του φωτισμένου σημείου και υπολογίζουν τρισδιάστατα δεδομένα. Το λογισμικό διαχειρίζεται την ταυτόχρονη λήψη εικόνων από τις δύο κάμερες, ενώ η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται μέσω GPU. Τα αντίστοιχα σημεία βρίσκονται με τριγωνισμό, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο σχέδιο σημείων. Το μετρούμενο τρισδιάστατο σχέδιο σημείων υποβάλλεται σε επεξεργασία και δημιουργείται ένα πλέγμα επιφάνειας όπου συγκρίνονται με την επιφάνεια αναφοράς και οι αποκλίσεις οπτικοποιούνται στην εικονική πραγματικότητα επικαλύπτοντας χρώματα που αντιπροσωπεύουν μετατοπίσεις σε μια ζωντανή μετάδοση βίντεο, η οποία εμφανίζεται σε οθόνες στην αίθουσα θεραπείας και στην αίθουσα ελέγχου. Ένας αλγόριθμος καταχώρισης υπολογίζει τα σφάλματα μετατόπισης και περιστροφής των καταχωρημένων επιφανειών σημείων. Η περιοχή καταχώρισης μπορεί να περιοριστεί ορίζοντας μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος (ROI). Ο αλγόριθμος συγκρίνει δύο επιφανειακά πλέγματα στο ROI

και υπολογίζει έναν μετασχηματισμό με βάση δεδομένα από άξονα 6 βαθμών ελευθερίας (6 DOF), ώστε να μετατρέψει το ένα πλέγμα στο άλλο. Οι τιμές μετασχηματισμού που προκύπτουν από τον αλγόριθμο καταχώρισης εμφανίζονται στη διεπαφή χρήστη του συστήματος IDENTIFY.



Εικόνα 5. Το σύστημα Varian με το ενσωματωμένο IDENTIFY [67].

Το IDENTIFY χρησιμοποιεί τεχνολογία μπλε φωτός LED για τον φωτισμό του ασθενούς, με το σύστημα να έχει σχεδιαστεί ώστε να μην επηρεάζεται από τις αλλαγές στον περιβάλλοντα φωτισμό, οι οποίες είναι συχνές στην κλινική ακτινοθεραπεία. Η κάμερα επιφανειακής απεικόνισης μπορεί να λειτουργεί με ρυθμό έως 10 Hz, ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής ενδιαφέροντος (ROI) που παρακολουθείται. Κάθε κάμερα καταγράφει τρισδιάστατα δεδομένα με ρυθμό 6-10 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Η μικρότερη περιοχή ROI επιτρέπει ταχύτερους υπολογισμούς των μετατοπίσεων στους 6 βαθμούς ελευθερίας (6DOF).

3. Χειροκίνητοι ελεγκτές

Οι χειροκίνητοι ελεγκτές εγκαθίστανται στο δωμάτιο προσομοίωσης της θεραπείας καθώς και στο χώρο που θα γίνει η θεραπεία. Δίνουν την δυνατότητα ένα μεγάλο μέρος της αλληλεπίδρασης και της επικοινωνίας του συστήματος να γίνεται ασύρματα. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης της υπολογιστικής τομογραφίας (CT) μέσω του τηλεχειριστήριου αποτυπώνεται η ακτινογραφική επιφάνεια του ασθενούς και ταυτόχρονα μπορεί να γίνει και η χρήση άλλων εξαρτημάτων. Επίσης χρησιμοποιείται για την λήψη φωτογραφιών και την εκκίνηση της αναπνευστικής κίνησης.

4. Διαχείριση Δεδομένων

Το IDENTIFY έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε έναν κεντρικό διακομιστή πολλών πελατών, επιτρέποντας την αυτόματη πρόσβαση και μεταφορά πληροφοριών μεταξύ συστημάτων, όπως το δωμάτιο προσομοίωσης και το δωμάτιο θεραπείας, χωρίς να απαιτείται εκ νέου εισαγωγή δεδομένων ασθενούς. Αρκεί όλα τα μηχανήματα να μοιράζονται μια κοινή βάση δεδομένων ή διακομιστή OIS. Μέσω του πρωτοκόλλου HL7, το IDENTIFY ενημερώνει αυτόματα τα προγραμματισμένα δεδομένα. Ο κεντρικός διακομιστής διαχειρίζεται τις πληροφορίες των ασθενών και συναντήσεων από το OIS, ενώ παρέχει αποθήκευση και διαχείριση ρυθμίσεων και λειτουργεί ως διακομιστής DICOM και αναφορών [60].

Ροή εργασίας IDENTIFY

Η ροή εργασίας ξεκινά συνήθως στην αίθουσα προσομοίωσης αξονικής τομογραφίας με την αποτύπωση της «ορθοπεδικής» επιφάνειας ασθενούς από το κεφάλι μέχρι τα δάχτυλα όπου αυτή η εικόνα της επιφάνειας της ορθοπεδικής ρύθμισης έχει ένα μεγάλο οπτικό πεδίο (FOV) ικανό να απεικονίσει ολόκληρο τον ασθενή. Μέσα στην αίθουσα θεραπείας και στο κρεβάτι θεραπείας στη θέση φόρτωσης, τα αξεσουάρ επαληθεύονται και η επιφάνεια του ορθοπεδικού ασθενούς από το κεφάλι μέχρι τα νύχια απεικονίζεται στη μεγάλη οθόνη προβολής του δωματίου. Με την δυνατότητα της λειτουργίας με «ένα κλικ» αλλάζει το σύστημα από την ορθοπεδική ρύθμιση στη επιφανειακά καθοδηγούμενη για τοποθέτηση διακλασμάτων και διαχείριση ενδοκλασματικής κίνησης. Στο τέλος κάθε συνεδρίας θεραπείας, δημιουργείται μια αυτοματοποιημένη αναφορά (μορφή PDF), η οποία, προαιρετικά, μπορεί να μεταφερθεί στο OIS[61].

1. Προσομοίωση CT

- Επιλογή Ασθενούς και Διαχείριση Δεδομένων

Το IDENTIFY λειτουργεί ως δευτερεύον σύστημα διαχείρισης δεδομένων που συμπληρώνει το OIS (βάση δεδομένων) του χρήστη, διαχειριζόμενο παράλληλα βιομετρικά δεδομένα ασθενούς και δεδομένα που αφορούν αποκλειστικά το IDENTIFY. Για την αποφυγή διπλής εισαγωγής και τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων, ο ασθενής πρέπει να είναι ήδη καταχωρισμένος στο OIS. Μόλις προγραμματιστεί στο OIS, τα δεδομένα του ασθενούς μεταφέρονται αυτόματα στο IDENTIFY, μέσω του πρωτοκόλλου που έχει τεθεί. Όταν ο ασθενής είναι προγραμματισμένος για CT προσομοίωση, επιλέγεται στο IDENTIFY χρησιμοποιώντας έναν χειριστήριο που εμφανίζει όλους τους προγραμματισμένους ασθενείς. Μετά την επιλογή, οι λεπτομέρειες του ασθενούς φορτώνονται στον πελάτη προσομοίωσης του συστήματος IDENTIFY, διευκολύνοντας τη διαδικασία.

- Ρύθμιση ασθενούς

Μόλις ο ασθενής ρυθμιστεί για προσομοίωση CT, αποκτώνται εικόνες σχεδιασμού στη θέση προσομοίωσης. Η τοποθέτηση του ασθενούς «εκτός πεδίου» μπορεί να βοηθήσει στη ρύθμιση του ασθενούς ελαχιστοποιώντας τις κλίσεις και τις μετατοπίσεις και τις αλλαγές στη στάση του σώματος. Η κάμερα ToF καταγράφει την επιφάνεια του σώματος από το κεφάλι έως τα νύχια, εκπέμποντας υπέρυθρο φως και μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται το φως για να ανακλαστεί και να επιστρέψει στον αισθητήρα. Ένας αλγόριθμος υπολογίζει την απόσταση z μεταξύ της αναφοράς και της ζωντανής επιφάνειας, δημιουργώντας έναν χάρτη θερμότητας. Αυτός ο χάρτης βοηθά στη ρύθμιση του ασθενούς στο LINAC, χρωματίζοντας την επιφάνεια. Στη συνέχεια, η επιφάνεια προβάλλεται μέσω επαυξημένης πραγματικότητας στη ζωντανή εικόνα, επιτρέποντας στον χρήστη να δει αποκλίσεις. Η εικόνα αναφοράς πρέπει να ληφθεί κατά την προσομοίωση CT ή την πρώτη ημέρα της θεραπείας.

- Ανίχνευση και τοποθέτηση συσκευής ρύθμισης ασθενούς

Το IDENTIFY χρησιμοποιεί έναν οπτικό δείκτη θέσης στις συσκευές ακινητοποίησης και έναν δείκτη θέσης αναφοράς στο επάνω μέρος του CT για να καταγράψει τη θέση των συσκευών στη σωστή ρύθμιση παραμέτρων. Για τα αξεσουάρ που μπορούν να είναι κεκλιμένα (π.χ. σανίδα στήθους), τοποθετείται ένας πρόσθετος δείκτης για την ανίχνευση της κλίσης. Το IDENTIFY χρησιμοποιεί μη στερεοσκοπική

παρακολούθηση βίντεο για να ανιχνεύσει τη θέση ευρετηρίου των αξεσουάρ στον καναπέ θεραπείας. Διαχωρίζει κυκλικούς δείκτες στον καναπέ θεραπείας και στα εξαρτήματα τοποθέτησης και υπολογίζει την τρισδιάστατη θέση του καναπέ και των αξεσουάρ χρησιμοποιώντας αντιστοιχισμό σημείων 2D–3D. Στη συνέχεια, η υπολογισμένη τρισδιάστατη θέση αντιστοιχίζεται στη θέση του αντίστοιχου ευρετηρίου και μετά τη λήψη, ο θεραπευτής επιβεβαιώνει τη ρύθμιση της συσκευής στον καναπέ χρησιμοποιώντας το χειριστήριο χειρός. Μια λίστα με τις συσκευές που εντοπίστηκαν εμφανίζεται στην οθόνη του δωματίου. Η καταγεγραμμένη ρύθμιση θα είναι στη συνέχεια διαθέσιμη για την επόμενη χορήγηση θεραπείας.

- **Αναπνευστική Διαχείριση**

Όταν ο ασθενής υποβάλλεται σε θεραπεία με διαχείριση αναπνοής και κράτημα της αναπνοής, η καθοδήγηση εικόνας επιφάνειας χρησιμοποιείται για να παρακολουθεί την κίνηση του θωρακικού τοιχώματος κατά τη CT προσομοίωση DIBH. Το IDENTIFY μαθαίνει το μοτίβο αναπνοής του ασθενούς, με τις περιοχές μεγαλύτερης κίνησης να εμφανίζονται κόκκινες στο λογισμικό και τις στατικές περιοχές γκρι. Το επιθυμητό πλάτος για το DIBH και το παράθυρο κράτησης της αναπνοής ορίζονται με βάση το συνολικό πλάτος και μια ανοχή που καθορίζεται από τον χρήστη. Η αναπνευστική διαδρομή μετρείται σε συγκεκριμένη επιφάνεια του ασθενούς που επιλέγεται από τον χρήστη, ενώ μια οπτική συσκευή καθοδήγησης (VCD) βοηθά τον ασθενή να επιτύχει την ιδανική ρύθμιση. Κατά τη διάρκεια της CT, η θέση της επιφάνειας του ασθενούς ενημερώνεται για να ληφθεί υπόψη η κίνηση του καναπέ[62].

2. Σχεδιασμός θεραπείας

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδίου θεραπείας, οι προγραμματισμένες εικόνες CT, το σύνολο δομών DICOM RT και το αρχείο DICOM RT Plan εξάγονται από το σύστημα σχεδιασμού θεραπείας (TPS) στο IDENTIFY. Οι εισαγόμενες δομές επιφάνειας DICOM, το ισόκεντρο και τα πεδία θεραπείας αντιστοιχίζονται αυτόματα με τον ασθενή. Η επιθυμητή επιφάνεια DICOM από το TPS καθορίζεται ως εικόνα αναφοράς για την καθοδήγηση της εικόνας επιφάνειας. Ένα συγκεκριμένο ROI ορίζεται για την παρακολούθηση της θέσης και της κίνησης του ασθενούς κατά τη θεραπεία, και το εργαλείο προγραμματισμού του IDENTIFY εφαρμόζεται στην επιφάνεια αναφοράς.

- **Εργαλείο προγραμματισμού**

Το εργαλείο προγραμματισμού IDENTIFY, μια εφαρμογή για Microsoft Windows, χρησιμοποιείται για την προετοιμασία νέων ασθενών. Είναι προ ρυθμισμένο με τις θέσεις των καμερών απεικόνισης επιφανειών και παρέχει στον χρήστη ανατροφοδότηση σχετικά με την ποιότητα του καθορισμένου ROI. Ο αλγόριθμος εξετάζει τον αριθμό των σημείων στο ROI και το τρισδιάστατο σχήμα για να διασφαλίσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Υποστηρίζει πολυϊσοκεντρικές θεραπείες, δημιουργώντας διαφορετικές θέσεις ανάλογα με τη συγκεκριμένη ασθένεια, με κάθε πλευρά να έχει τις δικές της επιφάνειες, ROI, αξεσουάρ και σημειώσεις. Αυτές οι πληροφορίες είναι προσβάσιμες μέσω μιας συσκευής χειρός κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Ένας πίνακας ανοχής 6DOF είναι διαμορφωμένος για την αυτόματη ρύθμιση των ορίων κίνησης, ανάλογα με τις ανάγκες της θεραπείας. Οι ρυθμίσεις για τη θέση και τα όρια περιστροφικής μετατόπισης μπορούν να

τροποποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή για κάθε ασθενή, είτε μέσω του εργαλείου προγραμματισμού είτε με τη συσκευή χειρός [63].

3. Παράδοση θεραπείας

- **Επιλογή Ασθενούς και Επαλήθευση Ταυτοποίησης**

Μόλις ο ασθενής προστεθεί στο πρόγραμμα θεραπείας στο OIS, επισημαίνεται αυτόματα ως "προγραμματισμένος για παράδοση θεραπείας" στο IDENTIFY

- **Επαλήθευση αξεσουάρ και ρύθμιση ασθενούς στην τοποθέτηση του καναπέ**

Η κάμερα εγκατάστασης εντοπίζει αυτόματα τη σωστή συσκευή, τη θέση και την κλίση της. Αφού ρυθμιστούν οι συσκευές και επαληθευτεί η ταυτότητα του ασθενούς, εμφανίζεται μια ζωντανή ροή βίντεο της επιφάνειας του ασθενούς από το κεφάλι μέχρι τα πόδια, μέσω επαυξημένης πραγματικότητας. Ο ασθενής τοποθετείται στον κρεβάτι του LINAC και η αρχική του θέση συγκρίνεται με την εικόνα αναφοράς που λήφθηκε κατά την προσομοίωση. Η αρχική ευθυγράμμιση ρυθμίζεται με ακρίβεια 10–20 mm. Η τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας του IDENTIFY χρησιμοποιεί μπλε και κόκκινα χρώματα για να δείξει τις μετατοπίσεις στη θέση του ασθενούς. Το μπλε δείχνει ότι ένα σημείο είναι κάτω από την εικόνα αναφοράς, ενώ το κόκκινο δείχνει ότι είναι πάνω από αυτήν στον κάθετο άξονα z. Η ζωντανή εικόνα του ασθενούς προβάλλεται τόσο στην οθόνη του δωματίου όσο και στην οθόνη της κονσόλας, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση της θέσης του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο.

- **Ρύθμιση ασθενούς στο ισόκεντρο**

Χρησιμοποιείται τρισδιάστατη παρακολούθηση εικόνας επιφάνειας για τη ρύθμιση του ασθενούς στο ισόκεντρο. Το σύστημα απεικόνισης επιφανειών περιλαμβάνει τρεις κάμερες με φακό 16 mm και ακρίβεια υποχιλιοστών. Η ζωντανή εικόνα από κάθε κάμερα συγκρίνεται με την επιφάνεια αναφοράς μέσω ενός αλγόριθμου πλησιέστερου σημείου (ICP). Τα επικαλυπτόμενα σημεία των καμερών υπολογίζονται με βάση τη μέτρηση σφάλματος, ενώ ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης βελτιστοποιεί τη σύγκριση. Το οπτικό πεδίο (FOV) κάθε κάμερας είναι περίπου 50 cm x 50 cm x 50 cm, ενώ η ζωντανή τρισδιάστατη εικόνα του σώματος ταιριάζει με την επιφάνεια αναφοράς DICOM από το TPS ή με μια νέα εικόνα αναφοράς. Οι μετατοπίσεις (μεταφορικές και περιστροφικές) απεικονίζονται με χρωματική κωδικοποίηση. Η δέσμη φωτός LED εστιάζει γύρω από το ισόκεντρο, ενώ η ευθυγράμμιση της επιφάνειας του ασθενούς με την αναφορά CT με τις πιθανές μετατοπίσεις εμφανίζεται σε έξι βαθμούς ελευθερίας (6DOF). Όταν η ευθυγράμμιση είναι εντός 2 cm από την αναφορά, το σύστημα αλλάζει αυτόματα σε προβολή εικονικής πραγματικότητας κόκκινο-μπλε. Η κίνηση του ασθενούς εκτός ROI απεικονίζεται με κόκκινο (πάνω από την αναφορά) και μπλε (κάτω από την αναφορά), παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες. Το ROI παρακολουθείται και τροποποιείται, αν χρειαστεί, για ακριβή παρακολούθηση της κίνησης του ασθενούς.

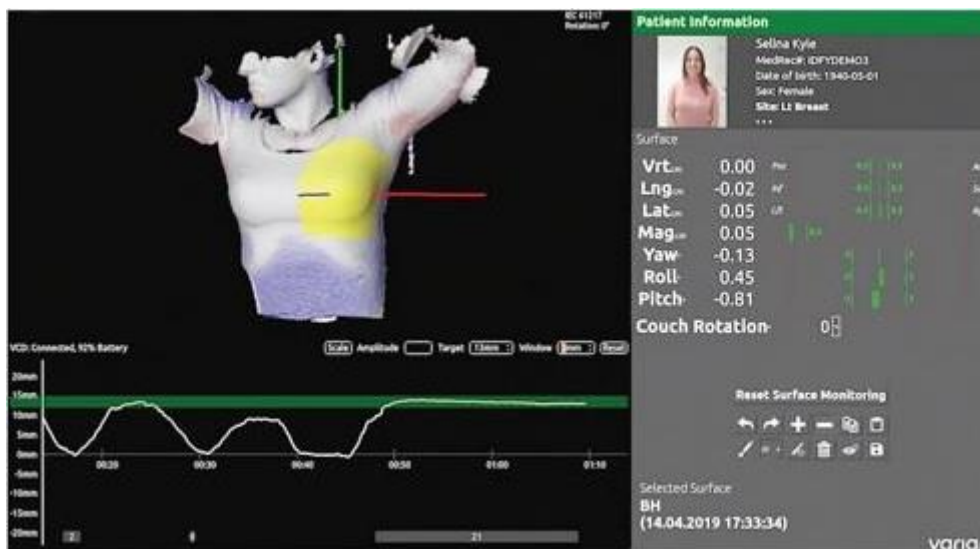
- **Παράδοση μη ομοεπίπεδης θεραπείας**

. Στη μη ομοεπίπεδη θεραπεία, το IDENTIFY χρησιμοποιεί ένα λογισμικό με επιπλέον γωνίες για το κρεβάτι που εισάγονται από το αρχείο DICOM RT Plan του ασθενούς. Μπορούν επίσης να εισαχθούν χειροκίνητα από τον τεχνικό γωνίες στο κρεβάτι θεραπείας. Στη συνέχεια, υπολογίζεται εκ νέου μια ενημερωμένη εικόνα

επιφάνειας σε σχέση με τη γωνία του κρεβατιού και εμφανίζονται οι μετατοπίσεις.. Όλες οι κάμερες IDENTIFY είναι εσωτερικά βαθμονομημένες για SRS ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια κατά τη διάρκεια μη ομοεπίπεδων θεραπειών ($\leq 0,5$ mm και $\leq 0,2^\circ$).

- Κράτημα βαθιάς έμπνευσης

Το IDENTIFY διαθέτει μια ειδική διαδικασία για θεραπείες με βαθιά έμπνευση και κράτημα της αναπνοής (DIBH). Η στόχευση για το κράτημα της αναπνοής γίνεται με βάση την επιφάνεια αναφοράς και μπορεί να διαμορφωθεί για τον κατακόρυφο άξονα ή συνδυασμό κατακόρυφου και διαμήκη άξονα. Η ανοχή του παραθύρου DIBH ορίζεται μέσω του εργαλείου σχεδιασμού ή της συσκευής χειρός. Η ακτινοβολία εφαρμόζεται όσο η επιφάνεια του ασθενούς βρίσκεται εντός των ορίων θέσης στο 6DOF. Αν ο ασθενής βγει εκτός ανοχών, η δέσμη διακόπτεται (Εικόνα 6) [64].



Εικόνα 6. Στιγμιότυπο από το μόνιτορ παρακολούθησης της αναπνοής του ασθενούς κατά την διάρκεια DIBH [71].

Διασφάλιση Ποιότητας

Μετά την εγκατάσταση του IDENTIFY στην κλινική, το προσωπικό της Varian εκτελεί δοκιμές αποδοχής μαζί με τον χρήστη του κέντρου πριν από την πλήρη παράδοση για ανάθεση σε λειτουργία.

1. Καθημερινή διασφάλιση ποιότητας

Το IDENTIFY ξεκινά αυτόματα το πρωί σε λειτουργία διασφάλισης ποιότητας, η οποία εκτελείται μόνο όταν οι κάμερες έχουν φτάσει στην κατάλληλη θερμοκρασία για ακρίβεια υποχιλιοστών. Αυτό εξασφαλίζει ότι το σύστημα είναι σωστά βαθμονομημένο και επαληθευμένο. Η διασφάλιση ποιότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο από χρήστες με τα απαραίτητα δικαιώματα διαχείρισης δεδομένων. Ανάλογα με τις ενότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως αποτελείται από δύο δοκιμές επαλήθευσης.

- Επαλήθευση της κάμερας ρύθμισης: Η επαλήθευση της κάμερας ρύθμισης γίνεται για την προσαρμογή από την κορυφή μέχρι τα νύχια του ασθενούς. Χρησιμοποιείται το εργαλείο βαθμονόμησης του κρεβατιού με το κρεβάτι σε

θέση φόρτωσης. Το εργαλείο τοποθετείται σε μια προκαθορισμένη υποδοχή και μετακινείται σε άλλη, ενώ το IDENTIFY ελέγχει αν η απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων είναι εντός 3 mm. Αν η ένδειξη είναι εντός του ορίου, η επαλήθευση θεωρείται επιτυχής. Εάν υπερβαίνει τα 3 mm, εμφανίζεται η επιλογή εκ νέου βαθμονόμησης, η οποία απαιτεί συγκεκριμένα δικαιώματα χρήστη.

- Επαλήθευση της ευθυγράμμισης ισοκέντρου της κάμερας Surface Imaging: Το σύστημα επαληθεύει τη σωστή βαθμονόμηση του ισοκέντρου και την ευθυγράμμιση των τριών καμερών SGRT παρακολουθώντας μια πλακέτα βαθμονόμησης, η οποία είναι ευθυγραμμισμένη με το ισοκέντρο του μηχανήματος μέσω λέιζερ ή πεδίου φωτός. Οι εμφανιζόμενοι αριθμοί δείχνουν τη διαφορά μεταξύ της τρέχουσας θέσης της πλακέτας και της αποθηκευμένης θέσης ισοκέντρου στο IDENTIFY, με όλες τις κάμερες να ευθυγραμμίζονται στο ίδιο κέντρο. Μια απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων των καμερών (τιμή δ) υποδηλώνει ότι η θέση κάποιας κάμερας έχει μετακινηθεί. Κάθε κάμερα ελέγχει και την εσωτερική της βαθμονόμηση (παράμετροι κάμερας και στερεοφωνικός μετασχηματισμός μεταξύ αριστερού και δεξιού φακού, τιμή Epr). Η θέση της πλακέτας υπολογίζεται για κάθε φακό ξεχωριστά και συγκρίνεται με την αποθηκευμένη βαθμονόμηση. Εάν ο μετασχηματισμός υπερβαίνει τα όρια, απαιτείται επαναβαθμονόμηση της 3D κάμερας.

Εάν το υπολογισμένο σφάλμα μεταξύ της βαθμονομημένης και της τρέχουσας θέσης είναι εντός του καθορισμένου εύρους, ο πίνακας στην οθόνη στον τοίχο εμφανίζεται πράσινος. Σε περίπτωση απόκλισης, οι στήλες με τις τιμές θέσης αντιστοιχούν στον αριθμό των καμερών SGRT που χρησιμοποιούνται. Αν το σφάλμα παραμείνει εκτός του επιτρεπόμενου εύρους, ο πίνακας γίνεται κόκκινος και απαιτείται επαναβαθμονόμηση. Η λειτουργία βαθμονόμησης είναι προσβάσιμη μόνο από χρήστες με τα κατάλληλα δικαιώματα.

2. Στερεοτακτική διασφάλιση ποιότητας

Η επαλήθευση και η βαθμονόμηση ακρίβειας SRS είναι μια βελτιωμένη διαδικασία για την επαλήθευση του ισοκέντρου της μηχανής και του ισοκέντρου του IDENTIFY. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται κατά την εγκατάσταση και συνιστάται πριν από κάθε θεραπεία SRS/SBRT. Με κάθε μονάδα ακτινοχειρουργικής για το IDENTIFY παρέχεται το πρόπλασμα Modus QA QUASAR™ Penta-Guide. Η ομάδα φυσικής πρέπει να σαρώσει το πρόπλασμα σε CT με τομές 1 mm και να δημιουργήσει ένα απλό σχέδιο θεραπείας ως αναφορά DICOM. Επειδή η ακρίβεια κάτω του χιλιοστού είναι κρίσιμη για τις θεραπείες SRS, το Penta-Guide σαρώνεται υπό γωνία περίπου 45°, ώστε να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο σύνολο δομών από το TPS. Αυτό διευκολύνει την αρχική ευθυγράμμιση του προπλάσματος με τα λέιζερ δωματίου και αποτελεί μέρος μιας ολοκληρωμένης δοκιμής για στερεοτακτική βαθμονόμηση, η οποία αποστέλλεται στο IDENTIFY από το TPS.

Η διαδικασία βαθμονόμησης SRS έχει ως εξής:

- i. Στο linac, το πρόπλασμα ευθυγραμμίζεται με το ισόκεντρο χρησιμοποιώντας λέιζερ, διατηρώντας την ίδια περιστροφή 45° όπως κατά την CT προσομοίωση.
- ii. Ανοίγεται ο φάκελος Ανοίγεται ο φάκελος διασφάλισης ποιότητας του ασθενούς, που περιέχει τα εισαγόμενα δεδομένα, και επιλέγεται η επιφάνεια αναφοράς.
- iii. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Varian, το IDENTIFY χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμιστεί το πρόπλασμα με την επιφάνεια αναφοράς DICOM πριν από την απεικόνιση, ώστε οι άξονες να είναι εντός των επιτρεπόμενων μετατοπίσεων με καθοδήγηση CBCT.
- iv. Γίνεται απεικόνιση CBCT ή MV του προπλάσματος.
- v. Χρησιμοποιείται το παράθυρο και το επίπεδο για έλεγχο ευθυγράμμισης, και εφαρμόζεται αυτόματη εγγραφή. Η Varian συνιστά πολλαπλές εγγραφές και χρήση του μέσου όρου, καθώς οι τιμές μπορεί να διαφέρουν έως $\pm 0,2$ mm.
- vi. Εάν οι τιμές μεταξύ του συστήματος απεικόνισης και του IDENTIFY είναι μεγάλες, το μενού βαθμονόμησης ισοκέντρου στο IDENTIFY μπορεί να εισάγει τις ακριβείς μετατοπίσεις.
- vii. Επιβεβαιώνεται η βαθμονόμηση με ένα κλικ, αντιστοιχίζοντας το σύστημα συντεταγμένων του IDENTIFY με αυτό της απεικόνισης.
- viii. Οι τιμές στην οθόνη 6DOF πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν.
- ix. Διενεργείται μια δεύτερη σάρωση CBCT για επαλήθευση.
- x. Οι τιμές εγγραφής και 6DOF πρέπει να είναι εντός $0,5$ mm/ $0,2^\circ$. Αν όχι, η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Το σύστημα είναι πλέον βαθμονομημένο για στερεοτακτικές θεραπείες.

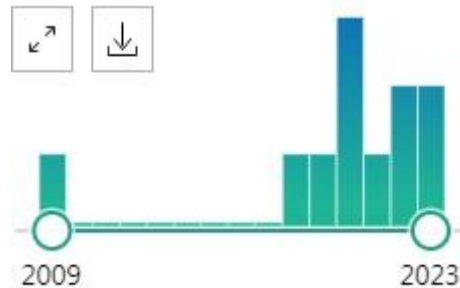
3. Βαθμονόμηση εσωτερικής και στερεοφωνικής κάμερας

Κατά την εγκατάσταση, οι κάμερες απαιτούν εσωτερική και στερεοφωνική βαθμονόμηση. Η εσωτερική βαθμονόμηση αφορά τις παραμέτρους εστιακής απόστασης, κέντρου εικόνας και παραμόρφωσης κάθε κάμερας, ενώ η στερεοφωνική βαθμονόμηση διασφαλίζει τη μεταγραφική και περιστροφική ακρίβεια μεταξύ των καμερών μιας μονάδας και των τριών μονάδων κάμερας. Η πλάκα βαθμονόμησης IDENTIFY SGRT χρησιμοποιείται για αυτές τις διαδικασίες. Κατά την εγκατάσταση, κάθε μονάδα κάμερας (δύο κάμερες και ένας προβολέας) βαθμονομείται εσωτερικά μέσω εξωτερικής εφαρμογής. Σειρά εικόνων από την πλάκα βαθμονόμησης καταγράφεται σε διαφορετικές θέσεις, και αυτά τα δεδομένα υπολογίζουν τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας, που αποθηκεύονται στη μονάδα κάμερας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται στερεοφωνική βαθμονόμηση, καταγράφοντας εικόνες της πλάκας με τις δύο κάμερες κάθε μονάδας, ώστε να διασφαλιστεί η ακριβής ευθυγράμμιση των καμερών μεταξύ τους και με το σύστημα συντεταγμένων του δωματίου [65].

7. Τα Συστήματα Τοποθέτησης Ασθενών στην Έρευνα

• Vision RT AlignRT System

Με χρήση των λέξεων κλειδιών «Vision RT AlignRT System» στην επιστημονική βάση PubMed [20] προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα με τις επιστημονικές δημοσιεύσεις κατ' έτος



Εικόνα 7. Γράφημα μελετών για το σύστημα AlignRT [20.]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα (Εικόνα 7) για το σύστημα Vision RT AlignRT οι μελέτες ξεκίνησαν από το 2009 μέχρι και το 2023 με τα περισσότερα αποτελέσματα να είναι το 2020.

Επαναληψιμότητα της ρύθμισης του ασθενούς με σύστημα καταγραφής εικόνας επιφάνειας σε σύμμορφη ακτινοθεραπεία του καρκίνου του προστάτη
 Οι Marco Krengli et al (2009) [21] μελέτησαν την επαναληψιμότητα της ρύθμισης του ασθενούς με την μέθοδο της απεικόνισης επιφανειών με το σύστημα AlignRT. Η μελέτη έγινε σε 16 ασθενείς με καρκίνο του προστάτη που υποβλήθηκαν σε ακτινοθεραπεία όπου οι εικόνες EPID (electronic portal imaging device- ηλεκτρονική συσκευή απεικόνισης πύλης) συγκρίθηκαν με τις DRR (digital reconstructed radiograph- ψηφιακή ανακατασκευασμένη ακτινογραφία) και στο τέλος λήφθηκε μια εικόνα αναφοράς τρισδιάστατης επιφάνειας από το AlignRT. Αρχικά αναλύεται το σύστημα λήψης εικόνας που είναι το AlignRT αποτελούμενο από δύο λοβούς απεικόνισης υπό γωνία 30° σε σχέση με το κρεβάτι θεραπείας. Τα δεδομένα στο τέλος σχηματίζουν μια ενιαία τρισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας του ασθενή. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η ευθυγράμμιση με την αντίστοιχη επιφάνεια αναφοράς που επιτυγχάνεται από την πρώτη συνεδρία θεραπείας. Και οι 16 ασθενείς υποβλήθηκαν στην θεραπεία με συνολική δόση 70-76 Gy σε διάστημα 7-7,5 εβδομάδων και χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες με βάση τον δείκτη μάζας του σώματος. Οι ασθενείς στην πρώτη συνεδρία θεραπείας ευθυγραμμίζεται η θέση τους με την βοήθεια των τριών τατουάζ που έχουν στο δέρμα τους και αποκτώνται δύο εικόνες με την πρόσθια-οπίσθια και πλευρική-πλάγια όψη του ασθενή. Το σύστημα λαμβάνει μια εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος που ορίζεται το σημείο του σώματος το κάτω μέρος της κοιλιάς από την περιοχή του αφαλού μέχρι το μέσο των μηρών. Μετά την λήψη των εικόνων αν ανιχνευτεί σφάλμα από το σύστημα μεγαλύτερο από 5mm λαμβάνεται μια εικόνα EPID προκειμένου να γίνει επαλήθευση με γνώμονα τους τρεις κύριους άξονες X, Y, Z. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του van Herk για να υπολογιστούν τα συστηματικά και τυχαία σφάλματα όπου και τέθηκαν δύο κατώφλια των >3mm και >5mm. Το

σύστημα AlignRT εντόπισε το σφάλμα τοποθέτησης κατά μήκος των τριών αξόνων για τα δύο κατώφλια και σύμφωνα με τα διαγράμματα 3-9 παρατηρείται μεγαλύτερο σφάλμα στον άξονα X για το κατώφλι των 5mm καθώς και για το κατώφλι των 3mm. Η παραπάνω μελέτη είχε σκοπό την εφαρμογή ενός συστήματος καταγραφής της επιφάνειας για την επαλήθευση της θέσης των ασθενών με καρκίνο του προστάτη με την διαφορά ότι επαληθεύει την θέση του ασθενούς πριν από κάθε συνεδρία και όχι την θέση του προστάτη μέσα στο σώμα που μπορεί να αλλάξει ανάλογα με την κίνηση των οργάνων. Αναλύθηκαν τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα που έδειξαν ότι το μέσο μεγαλύτερο συστηματικό σφάλμα ήταν στον άξονα Z ενώ με την μεγαλύτερη απόκλιση ο άξονας X. Το αποτέλεσμα της μελέτης έδειξε ότι το σύστημα AlignRT βοηθά στην ευθυγράμμιση του ασθενούς μη επεμβατικά ώστε να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες επιπλέον ρύθμισης κατά την ακτινοθεραπεία.

Οι μετατοπίσεις στο στήσιμο της ακτινοθεραπείας για ασθενείς με καρκίνο του μαστού: εμπειρία της τρισδιάστατης απεικόνισης επιφάνειας

Οι Ana Cravo Sá et al (2018) [22] μελέτησαν τα σφάλματα που δημιουργούνται κατά της μετατοπίσεις στην ακτινοθεραπεία για ασθενείς με καρκίνο του μαστού συγκρίνοντας την τεχνική της τοποθέτησης τατουάζ στο σώμα των ασθενών και την τεχνική της τοποθέτησης τατουάζ με την βοήθεια του συστήματος AlignRT. Η έρευνα έγινε σε 20 ασθενείς όπου χωρίστηκαν σε δύο ομάδες με την πρώτη να έχει τατουάζ και να προσαρμοστεί η θέση με την βοήθεια του AlignRT και η δεύτερη να έχει τατουάζ αλλά χωρίς την βοήθεια του AlignRT. Τα σφάλματα που προκύπτουν χωρίζονται σε τυχαία και συστηματικά. Τα συστηματικά αντιπροσωπεύουν τις μετατοπίσεις στην ίδια κατεύθυνση καθ' όλη την διάρκεια της θεραπείας ενώ τα τυχαία αντιπροσωπεύουν τις καθημερινές αλλαγές της θέσης σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Μελετήθηκαν στους ασθενείς οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές προς όλες τις κατευθύνσεις αναλύθηκαν τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα και για τις δυο ομάδες. Για να προκύψουν τα αποτελέσματα ακολουθήθηκε μια σειρά διαδικασιών όπως για αρχή για όλους τους ασθενείς μελετήθηκαν οι 15 πρώτες τομές. Έπειτα στην αξονική τομογραφία τοποθετήθηκαν σε ύπτια θέση και μετά την αξονική έγιναν έξι τατουάζ, δύο στη μέση του θώρακα, δύο στη δεξιά πλευρά του ασθενούς και δύο στην αριστερή πλευρά. Τα αποτελέσματα της CT εισήχθησαν στο AlignRT για τη δημιουργία εικόνας αναφοράς. Οι ασθενείς χωρίστηκαν σε δύο ομάδες με την πρώτη να (G1) να χρησιμοποιούν το AlignRT για την προσαρμογή της εικόνας αναφοράς και της εικόνας της επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο ενώ η δεύτερη ομάδα (G2) χρησιμοποίησε κατευθείαν το σύστημα kilovoltage (kV)-CBCT για την ανακατασκευή της εικόνας. Για την ανάλυση των δεδομένων συγκεντρώθηκαν 300 εικόνες CBCT για περιστροφικές (R) και μεταφορικές (T) μετατοπίσεις στις κατευθύνσεις από αριστερά-δεξιά (LR), κεφαλικά-ουριαία (CC) και πρόσθια-οπίσθια (AP). Τα αποτελέσματα όσον αφορά την κατεύθυνση LR για την μέση και τυπική απόκλιση των μετατοπίσεων έχουν μεγάλη διαφορά αφού οι μέσες τιμές της G2 είναι υψηλότερες έτσι φαίνεται πως με το AlignRT υπάρχουν μικρότερες πλευρικές μετατοπίσεις. Έτσι τα τυχαία και τα συστηματικά σφάλματα είχαν υψηλότερες τιμές στην ομάδα G2. Τέλος το συμπέρασμα είναι πως το σύστημα AlignRT βρέθηκε να είναι αρκετά χρήσιμο για την μείωση των σφαλμάτων σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού.

Αξιολόγηση της χρήσης διαφορετικών τεχνικών απεικόνισης και χορήγησης για κρανιακές θεραπείες στο Halcyon linac

Οι Everardo Flores-Martinez et al (2020) [23] μελέτησαν την επίδραση των ροών εργασιών και την ακρίβεια της ρύθμισης της επιφανειακά καθοδηγούμενης ακτινοθεραπείας (SGRT) με τον γραμμικό επιταχυντή Halcyon διερευνώντας 272 τομές επεξεργασίας χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές ροές εργασίας. Κατά την διάρκεια της θεραπείας με το Halcyon ο ασθενής ευθυγραμμίζεται στο ισόκεντρο, το κρεβάτι θεραπείας μετακινείται μέσα και για τη καταχώριση της CT χρησιμοποιείται μια εικόνα 2D-3D με MVCBCT ή μια εικόνα 3D-3D με kVCBCT. Στο Halcyon επιτρέπονται μόνο μεταφορικές μετατοπίσεις έτσι αν παρατηρηθούν μεγάλες περιστροφές στις αρχικές εικόνες, ο ασθενής πρέπει να ευθυγραμμιστεί ξανά με το χέρι και να ληφθούν πρόσθετες εικόνες με αποτέλεσμα να έχουν παρατηρηθεί σφάλματα. Η έρευνα βασίζεται στις ροές εργασιών που είναι τρία κύρια στάδια: εγκατάσταση, απεικόνιση και θεραπεία. Στο πρώτο στάδιο ο ασθενής μπαίνει στο δωμάτιο, τοποθετείται στον κρεβάτι και ενεργοποιούνται τα λείζερ, ακινητοποιείται χρησιμοποιώντας την πλήρη μάσκα και τελικά στέλνεται στην οπή στο ισόκεντρο θεραπείας. Στο δεύτερο στάδιο επαληθεύεται και προσαρμόζεται η θέση του ασθενούς μέσω του IGRT και αν παρατηρηθούν διαφορές ο θεραπευτής επιστρέφει στο δωμάτιο και προσαρμόζει τον ασθενή και εφαρμόζονται εκ νέου νέα πεδία του IGRT. Στο τρίτο στάδιο αφορά την παράδοση της θεραπείας πριν την εφαρμογή του SGRT. Για την εφαρμογή του SGRT χρησιμοποιείται το AlignRT που σε συνδυασμό με τον επιταχυντή αποτελείται από δυο κάμερες στην οροφή και ένα εικονικό ισόκεντρο που βρίσκεται έξω από την οπή. Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιείται μια πλάκα διότι στο Halcyon δεν μπορεί να βαθμονομηθεί το ισόκεντρο λόγω του εμποδίου στην οπή έτσι δημιουργείται ένα εικονικό ισόκεντρο και συγχρονίζεται με το ισόκεντρο θεραπείας μέσω του ελέγχου απόδοσης μηχανήματος (MPC). Η επαλήθευση ώστε να γίνει σωστά η μέτρηση των σφαλμάτων περιστροφής αξιολογήθηκε μέσω του προπλάσματος βαθμονόμησης ισοκέντρου AlignRT. Τα αποτελέσματα της εργασίας περιλάμβαναν σαν σημεία θεραπείας τις κόγχες, το κεφάλι, τον λαιμό και εγκέφαλο, με όγκους θεραπείας που κυμαίνονταν από $9,5 \text{ cm}^3$ έως 456 cm^3 και οι 272 τομές κατανεμήθηκαν σε 15 ασθενείς όπου χρησιμοποιήθηκαν πέντε μετρήσεις. Τα στοιχεία που είναι σημαντικά για τα την αξιολόγηση των ροών εργασίας είναι το ποσοστό των τομών που αποκτήθηκαν με ή χωρίς SGRT, ο χρόνος εγκατάστασης, ο χρόνος απεικόνισης, ο χρόνος θεραπείας και ο αριθμός των υπολειπόμενων σφαλμάτων περιστροφής. Για αρχή τα αποτελέσματα με βάση την επαλήθευση ακρίβειας στο πρόπλασμα έδειξαν ότι η μέγιστη διαφορά μεταξύ των επαγόμενων και των μετρούμενων περιστροφικών μετατοπίσεων ήταν μικρότερη από $0,2^\circ$. Επίσης παρατηρήθηκε πως πριν την χρήση του SGRT υπήρξε ανάγκη πρόσθετων πεδίων ενώ μετά την χρήση στην ροή εργασίας το ποσοστό μειώθηκε. Ο μέσος χρόνος θεραπείας χρησιμοποιώντας την έκδοση 1.0 του Halcyon (MVCBCT και σταθερό IMRT) ήταν $531 \pm 157 \text{ s}$ και $503 \pm 130 \text{ s}$ με και χωρίς SGRT αντίστοιχα με μια διαφορά που στατιστικά δεν ήταν σημαντική, ενώ με την έκδοση 2.0 και SGRT, η μέση τιμή ήταν $457 \pm 91 \text{ s}$ που στατιστικά η διαφορά ήταν μεγάλη. Τελικά το συμπέρασμα αυτής της μελέτης δείχνει πως η χρήση του SGRT επέτρεψε την μείωση έως και 50% του αριθμού των πεδίων που απαιτούν διόρθωση ρύθμισης και πρόσθετα πεδία απεικόνισης κάνοντας το σημαντικό για το Halcyon. Έτσι η

χρήση του SGRT για τη ρύθμιση του ασθενούς, kVCBCT για απεικόνιση και VMAT για παράδοση είναι η πιο αποτελεσματική για την ροή εργασίας.

Επαλήθευση του ισοκέντρου στο ρομποτικό κρεβάτι με τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας

Οι Omar El-Sherif et al (2020) [24] μελέτησαν με την βοήθεια του συστήματος AlignRT την ευαισθησία του για την επιβεβαίωση των περιστροφών του ρομποτικού κρεβατιού. Κατά την διάρκεια μιας θεραπείας μελετήθηκαν οι περιστροφές του ισοκέντρου με το AlignRT πάνω σε προπλάσματα, ακινητοποιημένους και μη εθελοντές και παρατηρήθηκαν αποκλίσεις θέσεις είτε λόγω ακατάλληλης περιστροφής του κρεβατιού είτε λόγω ακατάλληλης κίνησης του ασθενούς. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε στην θεραπεία το σύστημα πρωτονίων με το εύρος κίνησης να είναι στις 190° όπου για να επιτευχθούν οι επιθυμητές γωνίες δέσμης γίνονται μία ή περισσότερες περιστροφές του κρεβατιού. Σε κάθε θεραπεία τα συστήματα καθοδήγησης εικόνων ακτίνων X χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό του ασθενούς πριν από τη θεραπεία και τοποθετούνται κάθετα στον άξονα περιστροφής του κρεβατιού στη θεραπεία πρωτονίων. Έπειτα περιστρέφονται κατά 90° και για επικυρωθεί η σωστή θέση του ισοκέντρου οι ασθενείς απεικονίζονται πάλι με το σύστημα ακτίνων X. Όλη αυτή η διαδικασία αποτελεί έξτρα χρόνο αλλά και επιπλέον δόση ακτινοβολίας που δεν ευνοεί τον ασθενή, για αυτό σαν δεύτερος έλεγχος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το σύστημα AlignRT ώστε να αναγνωρίσει κατάλληλα ψευδή μηχανικά σφάλματα ενός ρομποτικού κρεβατιού. Η μέθοδος που διεξάχθηκε ήταν η ίδια για το πρόπλασμα, τους ακινητοποιημένους και μη ασθενείς όπου ήταν η εξής: τοποθετήθηκαν στο κρεβάτι θεραπείας, λήφθηκε μια εικόνα αναφοράς με γωνία 270° , το κρεβάτι περιστράφηκε $\pm 90^\circ$ και μετά ξανά στις 270° όπου μια εικόνα επιφάνειας επαλήθευσης θεραπείας αποκτήθηκε μετά από κάθε περιστροφή του κρεβατιού έτσι οι αποκλίσεις στους άξονες X, Y, Z της εικόνας της επιφάνειας, καθώς και ένα τρισδιάστατο μήκος διανύσματος, αναφέρθηκαν από το σύστημα AlignRT. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε με μια καινούργια επιφάνεια αναφοράς πίσω στις 270° μετά από κάθε σετ περιστροφών $\pm 90^\circ$. Τα στατιστικά αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων δείχνουν αρχικά για το πρόπλασμα ότι μετά από διαδοχικές περιστροφές του κρεβατιού η μέση μετατόπιση ήταν $0,01 \text{ cm} \pm 0,01$ μεταξύ της αναμενόμενης και της θέσης επιφάνειας που καταγράφηκε και η μέγιστη απόκλιση ήταν $0,03 \text{ cm}$. Έπειτα για τους ακινητοποιημένους και μη έδειξαν μέγιστη απόκλιση $0,10 \text{ cm}$ και $0,17 \text{ cm}$ αντίστοιχα. Τέλος η παρακολούθηση της επιφανειακής εικόνας μετά τον ακτινολογικό εντοπισμό βοηθά κυρίως για τον εντοπισμό μεγάλων ψευδών σφαλμάτων που θα είχαν κλινικά σχετικό αντίκτυπο στην ποιότητα της θεραπείας έτσι το σύστημα AlignRT δείχνει ότι εντοπίζει τις ακαθόριστες περιστροφές του ισοκέντρου.

Ανάθεση και δοκιμές απόδοσης του πρώτου πρωτοτύπου AlignRT InBore™ για Halcyon™ και Ethos™ -αποκλειστική πλατφόρμα ακτινοθεραπείας καθοδηγούμενης επιφάνειας

Οι Daniel Nguyen et al (2020) [25] μελέτησαν την επίδραση του AlignRT στα συστήματα του Halcyon™ και Ethos™ για την παρακολούθηση των ασθενών εντός της οπής κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας. Η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία έχει αποδείξει πως είναι ταχύτερη και ακριβέστερη για την ρύθμιση

του ασθενούς όμως για επιταχυντές με κλειστή οπή όπως το Halcyon™ και το Ethos™ δημιουργεί αδυναμία παρακολούθησης της κίνησης του ασθενούς μέσα στην οπή λόγω περιορισμών στην οπτική όρασης, έτσι ερευνάται η απόδοση του AlignRT στο να ικανή να παρακολουθεί την κίνηση του ασθενούς κατά την παράδοση της θεραπείας. Το πρωτότυπο AlignRT InBore™ χρησιμοποιεί μικροσκοπικές κάμερες σε συνδυασμό με πολλαπλούς προβολείς υπέρυθρων για την οπτική παρακολούθηση της επιφάνειας του ασθενούς σε 3D. Ο δακτύλιος InBore™ εγκαθίσταται στη μέση μεταξύ των λέιζερ και του ισοκέντρου όπου τα τρία μέρη συνδέονται με ένα κλιπ ασφάλισης. Κατά την διάρκεια της δοκιμής το InBore™ χρησιμοποιήθηκε για 30 λεπτά και μετρήθηκε το RTD. Με την βοήθεια ενός κυβικού προπλάσματος που περιέχει ραδιοαδιαφανείς σφαίρες έγιναν μετατοπίσεις του κρεβατιού και αποκτήθηκαν εικόνες MV και η θέση των σφαιρών για την ακρίβεια των καμερών. Έπειτα με την βαθμονόμηση των καμερών της οροφής και των καμερών InBore™ καθορίζεται η αντιστοιχία του εικονικού ισοκέντρου και του ισοκέντρου της θεραπείας. Χρησιμοποιούνται οι κάμερες της οροφής, ευθυγραμμίζεται ο κύβος και μετακινείται μέσα στην οπή του Halcyon™ όπου ξεκινά η παρακολούθηση του InBore™ και σημειώνονται τα RTD συγκρίνονται με τις τιμές από τις κάμερες που είναι στην οροφή. Η μηχανική σταθερότητα του δακτυλίου αξιολογήθηκε προσδιορίζοντας εάν η περιστροφή του Halcyon™ κατά τη διάρκεια της απεικόνισης θα μπορούσε να δημιουργήσει μια μετατόπιση μεταξύ του ισοκέντρου θεραπείας και του ισοκέντρου της κάμερας. Μετά την θεραπεία τα αποτελέσματα έδειξαν αρχικά πως το ευρύτερο πεδίο θεραπείας δεν δείχνει δοσιμετρική επίπτωση, ούτε παρατηρήθηκε σφάλμα στην ποιότητα της εικόνας. Επίσης η ακρίβεια του InBore™ αποδείχθηκε ότι παραμένει εντός 0,1 mm καθώς και η μετάβαση του εικονικού ισοκέντρου στο ισόκεντρο της θεραπείας ήταν εντός των ορίων. Συμπερασματικά το πρωτότυπο AlignRT InBore™ δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις ούτε στην απόδοση της δέσμης ούτε και στην ποιότητα της εικόνας όμως με τις απαραίτητες βελτιώσεις όσων αφορά την βαθμονόμηση των καμερών και το σχεδιασμό ενός λεπτότερου μοντέλου θα το καταστήσουν την καλύτερη λύση.

Σύγκριση της δοσιμετρικής ακρίβειας των σχεδίων θεραπείας μαστού πρωτονίων που παρέχονται με ρυθμίσεις SGRT και CBCT

Οι Michael J. MacFarlane et al (2021) [26] μελέτησαν την δοσιμετρική ακρίβεια της επιφανειακά καθοδηγούμενης ακτινοθεραπείας (SGRT) με το AlignRT και της αξονικής τομογραφίας με κωνική δέσμη (CBCT) κατά την διάρκεια θεραπείας του μαστού. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα 30 ασθενών όπου ο καθένας υποβλήθηκε σε αξονική τομογραφία για την διασφάλισης ποιότητας (QA-CT). Κατά την διάρκεια της θεραπείας οι εικόνες CT και QA-CT καταγράφηκαν με δυο τρόπους, πρώτον καταγράφοντας τον όγκο των CT που καλύπτονται από το οπτικό πεδίο CBCT και δεύτερον διαμορφώνοντας το περίγραμμα και καταγράφοντας την επιφάνεια που ερευνήθηκε από το σύστημα AlignRT. Αρχικά για τον σχεδιασμό της θεραπείας μέσω αξονικής τομογραφίας ελεύθερης αναπνοής οριοθετήθηκε το περίγραμμα της θεραπείας και ο ασθενής τοποθετήθηκε σε ρομποτικό κρεβάτι με 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Ρυθμίστηκε η απεικόνιση CBCT και η καθοδήγηση επιφάνειας από το AlignRT με την διαφορά πως στην συνέχεια μόνο το AlignRT χρησιμοποιήθηκε για την καθημερινή ρύθμιση του ασθενούς και οι εικόνες CBCT λήφθηκαν μία φορά την εβδομάδα για την παρακολούθηση της συμφωνίας του

AlignRT με το CBCT και για την αξιολόγηση των ανατομικών αλλαγών. Έπειτα λήφθηκε στη μέση της πορείας της θεραπείας μια δεύτερη αξονική τομογραφία (QA-CT) για την παρακολούθηση των ανατομικών αλλαγών και την αξιολόγηση της ακρίβειας της χορηγούμενης δόσης. Το επόμενο στάδιο είναι η καταχώρηση των εικόνων όπου λήφθηκαν δυο αντίγραφα QA-CT για τους δύο διαφορετικούς τύπους εγγραφών. Όσον αφορά την μέθοδο απεικόνισης CBCT εξετάστηκε η εγγραφή μεταξύ της προγραμματισμένης CT και της πιο πρόσφατης CBCT στο QA-CT περιορίζοντας την ένταση ώστε να είναι εντός των ανώτερων και κατώτερων ορίων του οπτικού πεδίου και σε συνδυασμό μεταφορικών και περιστροφικών μετατοπίσεων επιτεύχθηκε η καλύτερη δυνατή ευθυγράμμιση. Για την μέθοδο απεικόνισης με το AlignRT αρχικά ανακτήθηκε η πρώτη ημερήσια αναφορά τοποθέτησης AlignRT από την πιο πρόσφατη θεραπεία του ασθενούς στο QA-CT όπου δημιουργήθηκε ένα περίγραμμα «επιφάνειας θώρακα» στην επιφάνεια του μαστού και τροποποιήθηκε χειροκίνητα για να ταιριάζει με την τρισδιάστατη επιφάνεια που φαίνεται στην καθημερινή αναφορά τοποθέτησης AlignRT έτσι η CT και QA-CT καταχωρήθηκαν αυτόματα με τον αλγόριθμο εγγραφής. Εν τέλη οι μέσες δόσεις CTV που υπολογίζονται στο QA-CT είναι χαμηλότερες από αυτές του CT καθώς και παρατηρήθηκαν διαφορές στις τιμές των δόσεων για τις μετρήσεις CTV στον πνεύμονα. Δεν παρατηρήθηκε διαφορά στις μετρήσεις δόσεις καθώς οι ρυθμίσεις SGRT παρείχαν παρόμοια δοσιμετρική ακρίβεια με τη ρύθμιση που βασίζεται σε CBCT, έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το SGRT είναι θα ήταν πιο επωφελές αφού δεν απαιτεί επιπλέον δόση ακτινοβολίας και είναι ταχύτερο.

Επαναληψιμότητα των θεραπειών Deep-Inspiration Breath Hold στο Halcyon™ που εκτελούνται χρησιμοποιώντας την πρώτη κλινική έκδοση του AlignRT InBore™: Αποτελέσματα μελέτης CYBORE

Οι F. Lorchel et al (2022) [27] μελέτησαν σε ασθενείς με καρκίνο του αριστερού μαστού την ευκολία της επαναληψιμότητας με DIBH στον επιταχυντή Halcyon™ χρησιμοποιώντας το AlignRT InBore™. Καταγράφηκε ο χρόνος εγκατάστασης, ο χρόνος απεικόνισης και ανάλυσης με αξονική τομογραφία κωνικής δέσμης (CBCT), καθώς και ο συνολικός χρόνος θεραπείας. Ο σκοπός της μελέτης ξεκίνησε με το γεγονός ότι η εξωτερική ακτινοθεραπεία είναι από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές με το μειονέκτημα ότι οι τοξικότητες που προκαλούνται από ακτινοβολία είναι ανησυχητικές. Για την μείωση της έκθεσης ακτινοβολίας στην καρδιά χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της βαθιάς εισπνοής και κράτησης (DIBH) που χωρίζεται σε μετρούμενη mDIBH που ελέγχεται με ένα σπιρόμετρο και σε εκούσια vDIBH που βασίζεται στην ικανότητα του ασθενούς να κρατά την αναπνοή του στο μια συγκεκριμένη θέση στον αναπνευστικό κύκλο. Η δυσκολία σε αυτές τις θεραπείες είναι η διασφάλιση της επαναληψιμότητας στον κράτημα αναπνοής επιβεβαιώνοντας παράλληλα τη θέση της καρδιάς και τη μείωση της δόσης των οργάνων σε κίνδυνο. Παρατηρήθηκε περιορισμένη αντίθεση και περιορισμένο οπτικό πεδίο (FOV) που εμποδίζουν την πλήρη ανάλυση της θέσης της καρδιάς όμως με την χρήση του Halcyon επιτράπηκε η επικύρωση της θέσης και σε συνδυασμό με το AlignRT InBore™ δόθηκε η δυνατότητα για παρακολούθηση της ενδοκλασματικής κίνησης της επιφάνειας μέσα στην οπή του επιταχυντή. Η ροή εργασιών που ακολουθήθηκε αφορούσε 22 ασθενείς που κράτησαν την αναπνοή τους για 20 δευτερόλεπτα όσο δηλαδή κρατά και η απόκτηση της CBCT στο Halcyon. Έπειτα με την καθοδήγηση

του SGRT τοποθετήθηκε ο ασθενής, αποκτήθηκε η εικόνα επιφάνειας αναφοράς κρατήματος αναπνοής και πραγματοποιήθηκαν δύο αξονικές τομογραφίες, η μία με ελεύθερη αναπνοή και η άλλη με κράτημα με το SGRT. Το AlignRT ρύθμισε τον ασθενή στο εικονικό ισόκεντρο και το AlignRT InBore παρακολουθούσε την κίνηση του ασθενούς εντός του δακτυλίου. Βασικό στοιχείο είναι η περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) που περιλαμβάνει τον θεραπευόμενο μαστό, το στήρνο και εκτείνεται στον ετερόπλευρο μαστό όπου τα ROI αυτά μπαίνουν στον αλγόριθμο για να γίνει η αντιστοίχιση. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη μεταβολή τόσο για τη διάρκεια της συνεδρίας όσο και για τους χρόνους εγκατάστασης που οφείλεται αρχικά στο ότι ο χρόνος αυξάνεται επειδή συμπεριλαμβάνεται η καταχώρηση των αρχείων και επειδή οι ασθενείς δεν ακολουθούν τις οδηγίες καθοδήγησης για την τεχνική DIBH. Συμπερασματικά η χρήση του AlignRT InBore για ασθενείς με αριστερό καρκίνο του μαστού που υποβάλλονται σε θεραπεία με Halcyon™ μπορούν να επωφεληθούν από την τεχνική DIBH.

Συγκριτική αξιολόγηση της παραμορφωμένης επιφάνειας μέτρησης του AlignRT για την έγκαιρη ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του οιδήματος στην ακτινοθεραπεία του καρκίνου του μαστού

Οι Veronica Sorgato et al (2022) [28] μελέτησαν πως το AlignRT μπορεί να ανιχνεύσει και να ποσοτικοποιήσει τις αλλαγές στην επιφάνεια του ασθενούς στην ενισχυτική ακτινοθεραπεία που μπορεί να δημιουργηθεί κάποιο οίδημα με αποτέλεσμα να αλλάξει η επιφάνεια του. Η συγκεκριμένη μελέτη είχε δύο στόχους πρώτον να αξιολογήσει την παραμορφωμένη επιφάνεια του AlignRT και να προσδιορίσει την ακρίβεια στον εντοπισμό αλλαγών μορφολογίας, δεύτερον στην ανάπτυξη ενός κλινικού διαγράμματος ροής για επαναλαμβανόμενο σχεδιασμό προσομοίωσης και δοσιμετρίας χρησιμοποιώντας SGRT. Με την βοήθεια του AlignRT που χρησιμοποιεί στερεοσκοπική όραση καταχωρείται η ζωντανή επιφάνεια στην επιφάνεια αναφοράς μέσω του αλγορίθμου και προκύπτει η μετατόπιση του ασθενούς στους 6 βαθμούς ελευθερίας. Οι παράμετροι που δίνουν τα αποτελέσματα είναι η μέση μετατόπιση που ορίζεται σαν την μέση απόσταση μεταξύ του ROI της μετρούμενης επιφάνειας και της επιφάνειας αναφοράς και η επιφάνεια εντός της ανοχής εντός του ROI που ορίζεται σαν το ποσοστό των σημείων που έχουν μετατοπιστεί σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς. Για την αναγνώριση έχει τεθεί η επιφάνεια αναφοράς με μωβ χρώμα και η ζωντανή επιφάνεια με πράσινο εντός της περιοχής ενδιαφέροντος έτσι καταλήγουμε πως όταν ο χρωματικός χάρτης είναι πράσινος όταν και οι δύο επιφάνειες βρίσκονται εντός του καθορισμένου ορίου ανοχής, κόκκινο ή μπλε χρώμα όταν η ζωντανή επιφάνεια είναι αντίστοιχα πάνω ή κάτω από το όριο ανοχής. Με την βοήθεια ενός προπλάσματος λήφθηκε μια επιφάνεια αναφοράς και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν μάζες συγκεκριμένων διαστάσεων (0,5cm/1cm/1,5cm) πάνω στο πρόπλασμα για να προσομοιώσει το οίδημα. Ταυτόχρονα συμπεριλήφθηκε και ο αντίκτυπος της αναπνοής καθώς το πρόπλασμα έχει έναν εσωτερικό μηχανισμό για την μίμηση της αναπνοής. Παρατηρήθηκε πως εάν το πάχος του οιδήματος ξεπερνά τα 8mm η θεραπεία πρέπει να διακόπτεται ενώ αν είναι κάτω των 8mm θα πρέπει το ROI να προσαρμόζεται ώστε να αποκλείσει το οίδημα. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν πως το μέγεθος του ROI επηρεάζει πολύ την απόδοση του συστήματος καθώς για τις μάζες διαστάσεων 0,5cm και 1cm το ποσοστό της ανοχής ήταν υψηλό σε σχέση με την

μάζα 1,5cm. Έτσι φαίνεται πως τα μεγαλύτερα οιδήματα είναι πιθανόν να αποτρέψουν την ακριβή τοποθέτηση του ασθενούς. Συμπερασματικά δόθηκαν πολλές πληροφορίες χρησιμοποιώντας το AlignRT για ένα κλινικό διάγραμμα ροής που επιτρέπει μια εβδομαδιαία παρακολούθηση χωρίς ακτινοβολία οποιωνδήποτε αλλαγών στην επιφάνεια ώστε να βοηθήσει στην απόφαση της επανάληψης της προσομοίωσης. Όμως ένας βασικός περιορισμός είναι πως όλα τα αποτελέσματα αφορούν ένα πρόπλασμα με συγκεκριμένα δεδομένα, έτσι θα ήταν καλύτερο να γίνουν δοκιμές σε πραγματικούς ασθενείς για να συγκριθούν αυτά τα δεδομένα.

Διερεύνηση της ανθεκτικότητας της διαδικασίας βαθμονόμησης AlignRT InBore™ και προσδιορισμός των συνολικών σφαλμάτων παρακολούθησης

Οι Daniel Nguyen et al (2023) [29] μελέτησαν πως κατά την βαθμονόμηση των καμερών AlignRT που είναι τοποθετημένες στην οροφή αλλά και στον δακτύλιο του ισοκέντρου δημιουργούνται σφάλματα, τα οποία προσδιορίστηκαν με την χρήση των εικόνων MV και της τεχνικής SRS και συγκρίθηκαν με το σφάλμα που βασίζεται στην πλάκα. Μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια και την απόδοση του AlignRT σχετίζεται με την διαδικασία της βαθμονόμησης που βοηθά στον καθορισμό των εξωτερικών οπτικών ρυθμίσεων δηλαδή την ευθυγράμμιση των ισοκέντρων της κάμερας με το ισόκεντρο της θεραπείας και των εσωτερικών που προσαρμόζουν τις εστιακές ρυθμίσεις όλων των καμερών. Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα βαθμονόμησης έχουν προστεθεί δυο είδη διαδικασιών που είναι η χρήση προπλάσματος ή ενός κύβου SRS. Αρχικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η πλάκα με εικόνες MV για εξωτερική βαθμονόμηση, όπου οι κάμερες της οροφής βαθμονομούνται στο εικονικό ισόκεντρο για τη ρύθμιση και των 6 βαθμών ελευθερίας και το κρεβάτι μεταβαίνει αυτόματα στο εικονικό ισόκεντρο και οι κάμερες InBore χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση ενδοκλασματικής κίνησης κατά τη διάρκεια CBCT. Τα σφάλματα βαθμονόμησης που προκύπτουν είναι στις μετατοπίσεις μεταξύ ισοκέντρου της κάμερας και του ισοκέντρου από τις εικόνες MV και του κύβου SRS. Άλλη μέθοδος για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων που επηρεάζουν τους φακούς της κάμερας χρησιμοποιήθηκε ένα πρόπλασμα από σιλκόνη όπου δοκιμάστηκε ο αντίκτυπος του βάθους του ισοκέντρου και οι μετατοπίσεις μετά kV-CBCT συγκρίθηκαν με τις τιμές RTD και της κάμερας InBore για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Καθώς άλλαξαν και οι προσανατολισμοί για τις κάμερες και της οροφής και του δακτυλίου μεταβάλλοντας την κλίση στο σημείο του μαστού, τις συνθήκες του φωτισμού, το χρώμα του δέρματος στο πρόπλασμα και προσομοιώνοντας τους λοβούς για διάφορες μετατοπίσεις. Μέσα από την μελέτη παρατηρήθηκε πως η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων είναι στην εξωτερική βαθμονόμηση και στη ευθυγράμμιση της πλάκας με το λέιζερ. Μέσα από την συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν τα εξωτερικά σφάλματα βαθμονόμησης των καμερών SGRT που έχουν σαν βάση τις πλάκες μετατόπισης και προσδιορίστηκαν με την χρήση ενός προπλάσματος. Με την χειροκίνητη τοποθέτηση της πλάκας δεν δίνεται η δυνατότητα για την ακριβή ρύθμιση των ισοκέντρων της κάμερας και της θεραπείας έτσι το μεγαλύτερο σφάλμα είναι στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα των προπλάσματος έδειξαν συμφωνία μεταξύ των καμερών οροφής και του δακτυλίου InBore στην βαθμονόμηση του SGRT για όλες τις πιθανές τιμές RTD καθώς και για τις αλλαγές φωτισμού. Ωστόσο η μηχανική ακρίβεια του Halcyon μπορεί να επηρεαστεί διότι αποτελείται από ελατήρια που με την πάροδο του χρόνου

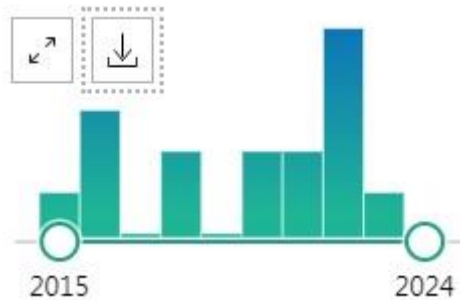
γίνονται πιο άκαμπτα, για αυτό προστέθηκε ένα τεστ QA για την διασφάλιση της ρύθμισης. Συμπερασματικά η μελέτη έδειξε ότι πρέπει να υπάρχει μια διαδικασία συν-βαθμονόμησης για να ευθυγραμμιστεί το ισόκεντρο των καμερών SGRT και το ισόκεντρο θεραπείας Halcyons αλλιώς δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί η ακρίβεια μικρότερη των mm.

Ανασκόπηση κλινικών εφαρμογών και προκλήσεων με επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία

Οι Ravishankar Bellala et al (2023) [30] μελέτησαν πως η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (SGRT) βοηθά για την ρύθμιση των ασθενών και την διαχείριση της κίνησης για διάφορες μορφές και σημεία καρκίνου. Στην έρευνα αυτή συγκεντρώθηκαν αποτελέσματα από 533 ασθενείς που μελετήθηκε η ρύθμιση του ασθενούς, η θέση αλληλεπίδρασης και η θέση κατά την διάρκεια της τεχνικής αναπνοής. Τα συστήματα SGRT διαθέτουν έναν συνδυασμό προβολέα και καμερών για την καταγραφή όπου η ληφθείσα εικόνα στην θέση θεραπείας αντιστοιχίζεται στην εικόνα αναφοράς ώστε να βρεθούν τα σφάλματα με την βοήθεια των οπτικών σαρωτών. Έχοντας σαν βασική αρχή του Foureye το σύστημα παρακολουθεί όλη την διαδικασία θεραπείας με στόχο την υψηλή ακρίβεια χωρίς να επιβαρύνει τους φυσιολογικούς ιστούς με ακτινοβολία. Με το SGRT κατά τη διάρκεια της μελέτης η ροή εργασίας βοήθησε για κάθε είδος κακοήθειας καθώς διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας που δημιουργεί μια τρισδιάστατη εικόνα του σώματος με βάση την υπολογιστική τομογραφία. Με την δημιουργία του περιγράμματος της επιφάνειας του ασθενούς εισάγεται η περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) με τα ακριβή τοπογραφικά χαρακτηριστικά του στόχου. Η χρήση του ROI βοηθά για να υπολογιστούν οι κάθε μια από τους έξι βαθμούς ελευθερίας των καμερών που θα περιλαμβάνει το ισόκεντρο. Στην περιοχή ενδιαφέροντος πρέπει να συμπεριλαμβάνεται μόνο η επιφάνεια του ασθενούς καθώς οι μεγάλες τιμές ROI βοηθούν στην διόρθωση της στάσης ενώ οι μικρές τιμές λαμβάνονται υπόψιν για την παρακολούθηση του όγκου. Μετά την ανάλυση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές όπως 3DCRT, IMRT και VMAT σε συνδυασμό με το SGRT παρατηρήθηκαν σφάλματα που διορθώθηκαν με kV και CBCT. Τα σφάλματα με την μέγιστη μεταφορική μετατόπιση παρατηρήθηκαν στα σημεία της κοιλιάς και της λεκάνης λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας. Το SGRT έδειξε ότι είναι κατάλληλο για αντικατάσταση των τατουάζ καθώς παρέχει την τρισδιάστατη απεικόνιση της στάσης σώματος του ασθενούς και των τοπογραφικών πληροφοριών για την διόρθωση της θέσης πριν από την επαλήθευση της απεικόνισης ή της θεραπείας. Η ρύθμιση του ασθενούς γίνεται με ακρίβεια σε λιγότερο χρόνο, χρησιμοποιώντας όλη την επιφάνεια του κυρίως στις περιπτώσεις του μαστού. Στα σημεία ωστόσο του κεφαλιού, του τραχήλου, της λεκάνης και της κοιλιάς η ακρίβεια είναι ίδια τόσο των λείζερ όσο και του SGRT έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ως συμπληρωματικό εργαλείο. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι η συμβολή του DIBH με το SGRT παρείχε μη επεμβατική οπτική απεικόνιση επιφάνειας για τον καλύτερο εντοπισμό και ελαχιστοποίησε τις αβεβαιότητες κατά την διάρκεια της θεραπείας σε συνδυασμό την συνεχή παρακολούθηση της επιφάνειας και σύγκρισης με την εικόνα αναφοράς έχοντας μειωμένη την δόση ακτινοβολίας. Συμπερασματικά το SGRT έδειξε ότι παρέχει μεγάλη βοήθεια κατά την διάρκεια της ακτινοθεραπείας έχοντας τα παραπάνω χαρακτηριστικά που το καθιστούν χρήσιμο εργαλείο ασφάλειας.

- C-RAD Catalyst

Με χρήση των λέξεων κλειδιών «C-RAD Catalyst» στην επιστημονική βάση PubMed [31] προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα με τις επιστημονικές δημοσιεύσεις κατ' έτος



Εικόνα 8. Γράφημα μελετών για το σύστημα C-RAD Catalyst [31].

Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα (Εικόνα 8) για το σύστημα C-RAD Catalyst οι μελέτες ξεκίνησαν από το 2015 μέχρι και το 2023 με τα περισσότερα αποτελέσματα να είναι το 2022.

Χαρακτηριστικά περιορισμένης θεραπείας χρησιμοποιώντας οπτικό σύστημα απεικόνισης επιφανειών και πυλών σε έναν επιταχυντή Elekta.

Οι Philipp Freislederer et al (2015) [32] μελέτησαν τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού ακτινοθεραπείας με πύλη για τη διασφάλιση της ακρίβειας με το σύστημα Catalyst σε συνδυασμό με τον γραμμικό επιταχυντή Elekta. Στην μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα κινούμενο πρόπλασμα προσομοίωσης της αναπνευστικής κίνησης με το επίπεδο της πύλης να ορίζεται χειροκίνητα και μετρήθηκε η χρονική καθυστέρηση της χορήγησης δόσης μεταξύ κλειστής και μη κλειστής θεραπείας. Το κύριο πρόβλημα της στην ακτινοθεραπεία είναι η ακρίβεια της χορήγησης της δόσης έτσι με την εισαγωγή περιορισμένων θεραπειών όπου η δέσμη ενεργοποιείται μόνο κατά την διάρκεια συγκεκριμένων φάσεων κίνησης μπορεί να ελεγχθεί η ο δόση. Με την βοήθεια του συστήματος απεικόνισης Catalyst σε συνδυασμό με τον γραμμικό επιταχυντή Elekta εξετάστηκε ο υπολογισμός των χρονικών καθυστερήσεων τόσο του οπτικού σαρωτή επιφάνειας για την έναρξη θεραπείας όσο και για την συνολική καθυστέρηση του συστήματος για όλα τα σημεία που θα μπορούσαν να καθυστερήσουν την έναρξη της δέσμης. Η χρήση του προπλάσματος προσομοίωσε την κυματομορφή της αναπνοής έτσι μετά τον καθορισμό του σημείου μέτρησης καταγράφεται η κατακόρυφη κίνηση στο Catalyst όπου το επίπεδο πύλης ρυθμίζεται χειροκίνητα για συγκεκριμένο εύρος χιλιοστών και κάθε φορά που ανιχνεύεται σημείο μέτρησης εντός του ορίου αποστέλλεται ένα σήμα ενεργοποίησης στον επιταχυντή για την έναρξη της θεραπείας. Αρχικά μετρήθηκαν οι πιθανές διαφορές δόσης στην περιορισμένη πύλη χρησιμοποιώντας μια 2D συστοιχία διόδων, σαν αναφορά ορίστηκε η δόση της μη περιορισμένης πύλης και συγκρίθηκε με πολλαπλές τιμές δόσεων περιορισμένης πύλης. Η συστοιχία τοποθετήθηκε στο ισόκεντρο με απόσταση πηγής και δέρματος στα 100cm και με τα επίπεδα πύλης να είναι 50%, 40%, 30%, 20% και 10% ενός διαμορφωμένου ημιτονοειδούς κύματος και η μέτρηση επαληθεύτηκε τρεις φορές για κάθε περιορισμένο επίπεδο για δύο διαφορετικά πεδία διαστάσεων. Στην συνέχεια όσον αφορά τις μετρήσεις των χρονικών καθυστερήσεων προστέθηκε μια επέκταση ραδιογραφικού φιλμ στο υπάρχον πρόπλασμα προκειμένου

να κινείται το φιλμ οριζόντια στην πύλη. Έτσι η συνολική καθυστέρηση υπολογίζεται από την μέση τιμή έξι μετρήσεων για κάθε χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης και απενεργοποίησης δέσμης. Τα αποτελέσματα που αφορούσαν τις μετρήσεις δόσεων έδειξαν διαφορές που οφείλονται στο μέγεθος της πύλης δηλαδή όσο μεγαλύτερο το πεδίο τόσο μικρότερη θα είναι και η δόση. Ωστόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων της χρονικής καθυστέρησης που έχει το σύστημα για την απενεργοποίηση της δέσμης έδειξε ότι η έναρξη της δέσμης καθυστερεί περισσότερο σε σχέση με την ενεργοποίηση της δέσμης. Το συμπέρασμα της μελέτης ήταν πως για την βελτιστοποίηση του προβλήματος αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους του επιταχυντή όπως ο χρόνος κράτησης δέσμης επιτρέπει να παραμείνει ενεργή αντί να μεταβεί σε κατάσταση αναμονής. Έτσι στις περιπτώσεις θεραπειών με περιορισμένη πύλη πρέπει να προσδιορίζονται οι παράγοντες της χρονικής καθυστέρησης και της ακρίβειας της δόσης.

Σχεδιασμός θεραπείας και αξιολόγηση περιφραγμένης ακτινοθεραπείας σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή όψη χρησιμοποιώντας το σύστημα Catalyst™/Sentinel™ για βαθιά αναπνοή (DIBH)

Οι S. Schönecker et al (2016) [33] αξιολόγησαν το σχεδιασμό θεραπείας και τη δοσιμετρική σύγκριση μεταξύ της ελεύθερης αναπνοής και της DIBH χρησιμοποιώντας το σύστημα Catalyst™/Sentinel™ για ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή πλευρά. Η ακτινοθεραπεία ολόκληρου του μαστού μετά από χειρουργική επέμβαση διατήρησης του μαστού μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο τοπικής υποτροπής και βελτιώνει την επιβίωση σε πρώιμους ασθενείς με καρκίνο του μαστού. Η έκθεση στην ακτινοβολία της καρδιάς μπορεί να προκαλέσει διάφορες καρδιακές παθήσεις, αν και οι ακριβείς μηχανισμοί είναι ασαφείς. Τεχνικές όπως το IMRT και η βαθιά αναπνοή (DIBH) έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση της καρδιακής έκθεσης κατά τη διάρκεια της RT. Η μελέτη περιελάμβανε 13 ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή πλευρά που υποβλήθηκαν σε ακτινοθεραπεία (RT) μετά από χειρουργική επέμβαση διατήρησης του μαστού. Η μελέτη είχε ως στόχο να συγκρίνει την ελεύθερη αναπνοή (FB) και την ακτινοθεραπεία με βαθιά εισπνοή (DIBH) χρησιμοποιώντας το σύστημα Catalyst™/Sentinel™. Πραγματοποιήθηκαν δύο προγραμματισμένες αξονικές τομογραφίες για κάθε ασθενή, μία στο FB και μία στο DIBH, με πάχος τομής 3 mm. Οι δοσιμετρικές παράμετροι, συμπεριλαμβανομένης της δόσης της καρδιάς και της έκθεσης των πνευμόνων, αναλύθηκαν. Το σύστημα Catalyst™, χρησιμοποιώντας οπτική σάρωση επιφάνειας, εξασφάλισε ακριβή εντοπισμό της θέσης του ασθενούς και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της θεραπείας DIBH. Η θέση του ασθενούς επαληθεύτηκε τακτικά χρησιμοποιώντας εβδομαδιαίες εικόνες πύλης και οπτικοακουστική καθοδήγηση. Διεξήχθη διπλός σχεδιασμός θεραπείας για 13 ασθενείς, με τέσσερις που έλαβαν ακτινοθεραπεία με ελεύθερη αναπνοή (FB) λόγω έκθεσης σε χαμηλή καρδιακή δόση ($V_{25} = 0\%$). Οι υπόλοιποι εννέα ασθενείς, που παρουσίασαν υψηλότερες καρδιακές δόσεις, υποβλήθηκαν σε θεραπεία με χρήση βαθιάς αναπνοής (DIBH) με το σύστημα Catalyst™/Sentinel™. Η τεχνική DIBH μείωσε σημαντικά τις δόσεις ακτινοβολίας της καρδιάς και της αριστερής πρόσθιας κατιούσας αρτηρίας (LAD). Η μέση καρδιακή δόση μειώθηκε κατά 52%, και η δόση LAD κατά 78%. Η έκθεση στη δόση του αριστερού πνεύμονα μειώθηκε κατά 1,56 Gy, ενώ η έκθεση του δεξιού πνεύμονα παρέμεινε αμετάβλητη. Οι χρόνοι θεραπείας ήταν αποτελεσματικοί και δεν

παρατηρήθηκε σημαντικός επιπλέον χρόνος θεραπείας. Η επαλήθευση με εικόνες πύλης δεν έδειξε σημαντικές αποκλίσεις. Το Deep Inspiration Breath Hold (DIBH) είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση της έκθεσης στην καρδιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας (RT) για ασθενείς με καρκίνο του μαστού. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι το DIBH μείωσε τη μέση καρδιακή δόση κατά 52% και μείωσε σημαντικά τις δόσεις ακτινοβολίας στην αριστερή πρόσθια κατιούσα αρτηρία (LAD). Το σύστημα Catalyst™/Sentinel™ υποστήριξε αποτελεσματικά την DIBH στην κλινική πράξη, παρέχοντας παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και καθοδήγηση των ασθενών. Ενώ το σύστημα ήταν πρακτικό και οδήγησε σε καλή συμμόρφωση των ασθενών, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων καρδιολογικών οφελών. Πρόσθετοι παράγοντες, όπως ο καρδιαγγειακός κίνδυνος και οι συστηματικές θεραπείες, επηρεάζουν τα συνολικά αποτελέσματα, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για συνεχή έρευνα.

Επιφανειακή απεικόνιση, τοποθέτηση λέιζερ ή ογκομετρική απεικόνιση για καρκίνο του μαστού με την συμμετοχή ελικοειδής Τομοθεραπείας.

Οι Frederik Crop et al (2016) [34] μελέτησαν σε άτομα με καρκίνο του μαστού την ακρίβεια του Catalyst (C-Rad) σε σύγκριση με την τοποθέτηση λέιζερ και την ημερήσια υπολογιστική τομογραφία MV (MVCT) με την βοήθεια της ελικοειδούς τομογραφίας. Αρχικά η ελικοειδής τομογραφία έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη κάλυψη και εξοικονόμηση οργάνων σε σύγκριση με τις κλασσικές τεχνικές, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μεγαλύτερες περιοχές χαμηλής δόσης με την χρήση του ειδικού κρεβατιού. Ο σημαντικότερος στόχος είναι η σωστή τοποθέτηση και η δυνατότητα μείωσης της απεικόνισης MVCT, και συνεπώς μείωσης της δόσης που επιτεύχθηκε με την σύγκριση τριών τρόπων: τοποθέτηση με λέιζερ, επιφανειακή τοποθέτηση και MVCT. Όσον αφορά την διαδικασία τοποθέτησης των ασθενών βασίζεται στην ευθυγράμμιση του ασθενούς στο εικονικό ισόκεντρο χρησιμοποιώντας λέιζερ ή το Catalyst. Το κρεβάτι θεραπείας μετατοπίζεται στο πραγματικό ισόκεντρο, λαμβάνεται η εικόνα MVCT και επιστρέφει στο εικονικό πάλι και γίνεται η συγχώνευση εικόνας MVCT με το kVCT. Η διαφορά μεταξύ της αρχικής θέσης και του αποτελέσματος τοποθέτησης μετά τη σύντηξη MVCT αξιολογήθηκε προκειμένου να συγκριθεί η τοποθέτηση με βάση το λέιζερ ή το Catalyst. Πιο αναλυτικά για την τοποθέτηση με λέιζερ υπάρχουν δύο είδη τα κόκκινα που είναι κινητά και χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν το σημείο αναφοράς ρύθμισης, σε σχέση με το εικονικό ισόκεντρο και τα πράσινα είναι σταθερά και αντιστοιχούν στο εικονικό ισόκεντρο. Η τοποθέτηση με βάση το Catalyst βασίζεται στην σάρωση της επιφάνειας του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο που μπορεί να συγκριθεί είτε με την εξωτερική επιφάνεια του αρχικού kVCT, είτε με μια αρχική μέτρηση του Catalyst σε kVCT, είτε με μια αρχική μέτρηση του Catalyst που λαμβάνεται από το μηχάνημα. Έπειτα καταχωρείται με βάση έναν αλγόριθμο ICP και τα αποτελέσματα του αντιστοιχούν σε έξι βαθμούς ελευθερίας με το κέντρο του όγκου στόχου σχεδιασμού (PTV) ως σημείο περιστροφής. Η ακρίβεια MVCT εξαρτάται από τη μεταβλητότητα μεταξύ του χειριστή κατά τη σύντηξη MVCT και την κίνηση του ασθενούς κατά τη διάρκεια του χρόνου που απαιτείται για την απεικόνιση και τη σύντηξη. Δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ της αυτόματης καταχώρισης MVCT και των χειροκίνητων προσαρμογών, αν και η αυτόματη καταχώριση έδειξε μεγαλύτερη συνέπεια. Τα αποτελέσματα για την μεταβλητότητα

υποδεικνύουν ότι η τοποθέτηση βάσει Catalyst, ακολουθούμενη από MVCT, με αυτόματη σύντηξη και χειροκίνητη διόρθωση, οδήγησε σε χαμηλότερη μεταβλητότητα. Συμπερασματικά η απεικόνιση επιφάνειας με βάση τον Catalyst προσφέρει βελτιωμένη ακρίβεια σε σχέση με την τοποθέτηση με λέιζερ για ασθενείς με καρκίνο του μαστού που λαμβάνουν θεραπεία με ελικοειδή Τομοθεραπεία. Λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του ασθενούς και τη μεταβλητότητα του διαχειριστή MVCT, η τοποθέτηση του Catalyst επιτυγχάνει παρόμοια ακρίβεια με το MVCT, μειώνοντας πιθανώς την ανάγκη για καθημερινή απεικόνιση και μειώνοντας τις δόσεις ακτινοβολίας.

Αξιολόγηση της καθημερινής τοποθέτησης του ασθενούς για ακτινοθεραπεία με ένα εμπορικό σύστημα 3D επιφανειακής απεικόνισης (Catalyst™)

Οι F. Walter et al (2016) [35] μελέτησαν τα αποτελέσματα ασθενών που υποβάλλονται καθημερινά σε ακτινοθεραπεία με το σύστημα Catalyst σε συνδυασμό με έναν γραμμικό επιταχυντή. Το βασικό θέμα είναι η ακριβής τοποθέτηση του ασθενούς που χρησιμοποιούνται τεχνικές με ιονίζουσα ακτινοβολία η οποία πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο με την βοήθεια της οπτικής απεικόνισης. Με την βοήθεια του Catalyst δίνεται η δυνατότητα εντοπισμού θέσης ασθενούς, παρακολούθησης και πύλης σε περιστατικά θεραπείας καρκίνου του μαστού με κράτημα αναπνοής και διερεύνηση της κίνησης και αποκτήθηκαν δεδομένα για 25 ασθενείς. Αρχικά για κάθε ασθενή λήφθηκαν ένα σύνολο CT, τοποθετήθηκαν σημάδια δέρματος χρησιμοποιώντας λέιζερ για τη σήμανση στο σημείο αναφοράς και μετά την οριοθέτηση του όγκου και τον προγραμματισμό της θεραπείας μεταφέρθηκαν στο Catalyst. Το σύστημα αποτελείται από μια μονάδα προβολέα που χρησιμοποιεί LED που εκπέμπει μήκος κύματος 450 (μπλε), 528 (πράσινο) και 624 nm (κόκκινο) και μια κάμερα CCD. Το ανακλώμενο φως από την επιφάνεια του ασθενούς συλλαμβάνεται από τη μονάδα κάμερας και προσδιορίζεται από το λογισμικό Catalyst. Τα στατιστικά αποτελέσματα με βάση το λέιζερ έδειξαν σφάλμα εγκατάστασης του ασθενούς ενώ με βάση το Catalyst αποκτήθηκε η πραγματική θέση. Στην συγκεκριμένη έρευνα αποδείχθηκε πως το σύστημα βοηθά στη ρύθμιση σφάλματος ταυτόχρονα όμως το σύστημα συγκρίθηκε και με το Sentinel. Αναφέρθηκε η βασική διαφορά απεικόνισης που στο Catalyst είναι η χρήση οπτικού φωτός ενώ στο Sentinel είναι η σάρωση με λέιζερ που έχει σαν αποτέλεσμα και μεγαλύτερη καθυστέρηση. Η σύγκριση συνεχίστηκε με το Sentinel να δείχνει ακρίβεια έως και 1 mm και στους τρεις άξονες και περιστροφή 1° δηλαδή μια καλή συμφωνία και ταυτόχρονα αξιολογήθηκε και το Catalyst βγάζοντας παρόμοια αποτελέσματα. Ενώ παρατηρήθηκαν διαφορές στην ακρίβεια τοποθέτησης, ειδικά στους πνευλικούς και θωρακικούς στόχους, το Catalyst έδειξε πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν αναδρομική ανάλυση δεδομένων και μη ισορροπημένη απεικόνιση της περιοχής στόχου, αλλά παρέχει πολύτιμα κλινικά δεδομένα για την αποτελεσματικότητά του.

Διαχείριση ενδοκλασματικής κίνησης σε πραγματικό χρόνο στην ακτινοθεραπεία καρκίνου του μαστού: ανάλυση 2028 συνεδριών θεραπείας

Οι D. Reitz et al (2018) [36] είχαν σαν στόχο να ποσοτικοποιήσει την ενδοκλασματική κίνηση του θώρακα κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας του μαστού χρησιμοποιώντας το σύστημα Catalyst™ για την αξιολόγηση των

αβεβαιοτήτων θέσης. Αρχικά οι σύγχρονες τεχνικές ακτινοθεραπείας για τον καρκίνο του μαστού, όπως το IMRT και το VMAT, απαιτούν ακριβή τοποθέτηση του ασθενούς. Η απεικόνιση ακτίνων X χρησιμοποιείται συχνά για τη μείωση της διακλασματικής μεταβλητότητας, αλλά αυξάνει την έκθεση στην ακτινοβολία. Τα συστήματα οπτικής απεικόνισης επιφανειών όπως το Catalyst™ προσφέρουν σε πραγματικό χρόνο, μη επεμβατική παρακολούθηση της κίνησης του ασθενούς χωρίς πρόσθετη ακτινοβολία. Μελέτες δείχνουν ότι το Catalyst™ βελτιώνει την ακρίβεια τοποθέτησης σε σύγκριση με τις υποβοηθούμενες με λέιζερ μεθόδους και μειώνει την ανάγκη για σαρώσεις CBCT. Μεταξύ Οκτωβρίου 2016 και Ιουνίου 2017, 104 γυναίκες με καρκίνο του μαστού που υποβλήθηκαν σε μετεγχειρητική ακτινοθεραπεία (RT) στο Πανεπιστημιακό Νοσοκομείο, LMU Μονάχου, συμμετείχαν σε μια μελέτη. Οι ασθενείς τοποθετήθηκαν χρησιμοποιώντας τον οπτικό σαρωτή επιφάνειας Catalyst HD, ο οποίος παρακολουθεί την κίνηση του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο χωρίς πρόσθετη ακτινοβολία. Η μελέτη είχε ως στόχο να ποσοτικοποιήσει την ενδοκλασματική κίνηση του θώρακα. Τα δεδομένα από το σύστημα Catalyst αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας MATLAB και στατιστικές μεθόδους, με αποκλίσεις από το ισόκεντρο που μετρήθηκαν κατά μήκος πλευρικών, διαμήκων και κατακόρυφων αξόνων. Πραγματοποιήθηκαν στατιστικές δοκιμές για την αξιολόγηση σημαντικών αποκλίσεων και συσχετισμών. Συνολικά 2028 συνεδρίες θεραπείας ακτινοθεραπείας αναλύθηκαν για την κίνηση του ασθενούς κατά τη διάρκεια του χρόνου λήψης δέσμης και ολόκληρων συνεδριών, συμπεριλαμβανομένης της κίνησης της γάμπας. Ο μέσος όρος συνεδρίας διήρκεσε 154 δευτερόλεπτα, με τον χρόνο μετάδοσης δέσμης κατά μέσο όρο 55 δευτερόλεπτα. Πάνω από το 99% των αποκλίσεων δέσμης ήταν κάτω από 4,45 mm. Η ανάλυση έδειξε σημαντική μετατόπιση ισοκέντρου κατά μήκος όλων των αξόνων, με τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά την κίνηση του σκελετού. Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ της αριστερής και της δεξιάς πλευράς ακτινοβολήσης ή μεταξύ των θεραπειών του μαστού και του θωρακικού τοιχώματος. Αυτή η μελέτη εστιάζει στη διασφάλιση ποιότητας κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας μαστού με την αξιολόγηση της ενδοκλασματικής κίνησης χρησιμοποιώντας μια οπτική, μη επεμβατική μέθοδο. Η μελέτη περιελάμβανε 104 ασθενείς και ανέλυσε περισσότερες από 2000 συνεδρίες θεραπείας. Οι μέγιστες μεμονωμένες αποκλίσεις κατά τη διάρκεια της θεραπείας ήταν αρκετά εντός του περιθωρίου ρύθμισης των 5 mm για το PTV. Η μέση μέγιστη απόκλιση κατά τη διάρκεια του χρόνου ενεργοποίησης της δέσμης ήταν 1,93 mm. Συστήματα οπτικής απεικόνισης επιφανειών χρησιμοποιήθηκαν χωρίς πρόσθετους δείκτες, παρουσιάζοντας αποτελέσματα συγκρίσιμα με άλλες μεθόδους παρακολούθησης κίνησης, όπως η απεικόνιση με ακτίνες X. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ενδοκλασματική κίνηση στην ακτινοθεραπεία μαστού ήταν ελάχιστη και εντός αποδεκτών κλινικών ορίων, υποδηλώνοντας ότι τα κοινά χρησιμοποιούμενα περιθώρια ρύθμισης μπορεί να μειωθούν.

Οπτική σάρωση επιφάνειας για τοποθέτηση ασθενών στην ακτινοθεραπεία:
Μια πιθανή ανάλυση 1902 κλασμάτων δόσης

Οι G Carl, D Reitz et al (2018) [37] αξιολόγησαν τα σφάλματα εγκατάστασης του Catalyst για διάφορες ανατομικές περιοχές με την χρήση τοποθέτησης λέιζερ με σημάδια στο δέρμα και την καταγραφή των τρισδιάστατων αποκλίσεων που

ανιχνευθήκαν. Η βασική πρόκληση στην ακτινοθεραπεία καθημερινά είναι αναπαραγωγιμότητα της ρύθμισης του ασθενούς και η διαχείριση της κίνησης των οργάνων όπου με τις νέες τεχνολογίες όπως η αξονική τομογραφία κωνικής δέσμης (CBCT) έχει βελτιώσει την ακρίβεια χορήγησης της δόσης στον όγκο. Στην συγκεκριμένη μελέτη ο σαρωτής οπτικής επιφάνειας Catalyst HD αναλύθηκε για την τοποθέτηση του ασθενούς και συγκρίθηκε με το πρότυπο της χειροκίνητης τοποθέτησης με την χρήση σημαδιών δέρματος και CBCT. Το Catalyst αποτελείται από 3 μονάδες σαρωτή οροφής που επιτρέπουν τη συνεχή ανίχνευση της επιφάνειας και το λογισμικό. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, η συσκευή εκπέμπει ορατό φως με μήκος κύματος 405 nm (μπλε) και οι προβολές καταγράφονται από τις ενσωματωμένες κάμερες της συσκευής με σύζευξη φόρτισης. Η διαδικασία της θεραπείας είχε ως εξής ξεκίνησε με την ευθυγράμμιση του ασθενή και την σάρωση του CBCT όπου επισημάνθηκε το ισόκεντρο χρησιμοποιώντας σημάδια δέρματος μέσω των λέιζερ τοποθέτησης και δημιουργήθηκε μια σάρωση επιφάνειας με το Catalyst. Σε όλες τις θεραπείες πρώτα γινόταν ευθυγράμμιση με CBCT και έπειτα έλεγχος με το λέιζερ και το Catalyst ώστε να καταγραφούν οι τιμές μετατόπισης. Τα αποτελέσματα των θεραπειών κατηγοριοποιήθηκαν σε κεφάλι, θώρακα, κοιλιά και άκρα για ανάλυση, με 689 κλάσματα κεφαλής, 460 θώρακα, 630 κοιλίας και 123 άκρων με τις αποκλίσεις να αυξάνονται και την ακρίβεια να μειώνεται και για τις δύο μεθόδους με την μόνη διαφορά στον κατακόρυφο άξονα οι αποκλίσεις του Catalyst ήταν πιο κοντά στην τιμή διόρθωσης του CBCT. Παρά τα περιορισμένα στοιχεία για την καθημερινή κλινική αξιοπιστία του συστήματος Catalyst, έχει βρεθεί αποτελεσματικό στην αρχική τοποθέτηση του ασθενούς σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Μια μελέτη από τους Stanley et al. αξιολόγησε 6000 κλάσματα και διαπίστωσε ότι το σύστημα Catalyst είχε διανυσματική απόκλιση 5-6 mm, σε σύγκριση με 9-14 mm με λέιζερ δωματίου, υποδηλώνοντας την αξιοπιστία του. Η τρέχουσα μελέτη επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του Catalyst, τονίζοντας τα πλεονεκτήματά του: παρατηρεί μεγαλύτερη επιφάνεια σώματος σε 3D, ανάδραση σε πραγματικό χρόνο χωρίς σημάδια δέρματος και αποτελεσματικότητα στη ροή κλινικών εργασιών. Αν και δεν αντικαθιστά την απεικόνιση ακτίνων X για βαθύτερους στόχους, το Catalyst επιτυγχάνει ακρίβεια συγκρίσιμη με την τοποθέτηση λέιζερ, ειδικά στην περιοχή της κεφαλής λόγω της στενής συσχέτισης όγκου προς επιφάνεια και της χρήσης μασκών ακινητοποίησης. Η ακρίβεια μειώνεται στις θωρακικές και κοιλιακές περιοχές αλλά παραμένει κλινικά αποδεκτή. Παράγοντες όπως οι αναπνευστικές κινήσεις και οι μεταβλητές θέσεις των εσωτερικών οργάνων επηρεάζουν την ακρίβεια του οπτικού συστήματος σε σύγκριση με το CBCT. Καταλήγοντας το Catalyst έδειξε πως μπορεί να είναι αξιόπιστο σύστημα εντοπισμού θέσης ασθενών χωρίς πρόσθετη έκθεση σε ακτινοβολία.

Αξιολόγηση της τεχνικής απόδοσης συστήματος οπτικής απεικόνισης επιφανειών με χρήση συμβατικών και καινοτόμων αλγορίθμων στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής

Οι Hironori Kojima et al (2020) [38] ερεύνησαν την αναπαραγωγιμότητα και την ακρίβεια της τοποθέτησης του ασθενούς και την σταθερότητα της παρακολούθησης της ενδοπλασματικής κίνησης μέσω του συστήματος Catalyst με τον συμβατικό αλγόριθμο και με τον αλγόριθμο καταγραφής επιφάνειας υψηλής ακρίβειας της στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής. Στην μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προπλάσματα

κεφαλιού, θώρακα και λεκάνης όπου η αναπαραγωγικότητα της τοποθέτησης αξιολογήθηκε με τη μέση τιμή που υπολογίστηκε επαναλαμβάνοντας την εγγραφή 10 φορές, χωρίς να μετακινηθεί κάθε πρόπλασμα. Το σύστημα οπτικής επιφανειακής απεικόνισης που επιλέχθηκε ήταν το Catalyst που διαθέτει τρεις μονάδες σαρωτή διατεταγμένες σε γωνίες περίπου 120° μεταξύ τους για τη συνεχή ανίχνευση της επιφάνειας ενός ασθενούς. Με την χρήση του συμβατικού αλγορίθμου η συλληφθείσα επιφάνεια καταχωρείται με την περικομμένη επιφάνεια αναφοράς από έναν ICP αλγόριθμο όπου εντοπίζονται σφάλματα θέσης μεταξύ της επιφάνειας που καταγράφεται και της επιφάνειας αναφοράς. Αντιθέτως ο αλγόριθμος SRS υπολογίζει τις μετατοπίσεις των ισοκέντρων και καταγράφει μια σαρωμένη εικόνα 640×480 pixel από μία μονάδα κάμερας του συστήματος Catalyst ως πλήρες οπτικό πεδίο, ενώ ο συμβατικός αλγόριθμος καταγράφει μια εικόνα με ανάλυση 320×240 pixel. Για την επίτευξη ακρίβειας εντοπισμού θέσης κάθε πρόπλασμα τοποθετήθηκε στο ισοκέντρο και η θέση διορθώθηκε χρησιμοποιώντας CBCT. Αντίστοιχα για την σταθερότητα στην λειτουργία παρακολούθησης τα προπλάσματα σαρώθηκαν από το Catalyst συνεχώς για 20 λεπτά για να προσδιοριστεί η απόκλιση της μετατόπισης ισοκεντρικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο αλγόριθμος SRS έχει καλύτερη αναπαραγωγικότητα, ακρίβεια και σταθερότητα σε σύγκριση με τον συμβατικό αλγόριθμο σε διάφορες δοκιμές. Κυρίως έδειξε καλύτερη αναπαραγωγικότητα και ακρίβεια για το κεφάλι πρόπλασμα, με ελάχιστα σφάλματα στη μετακίνηση και την περιστροφή. Ενώ ο συμβατικός αλγόριθμος εμφάνισε πιο σημαντικά σφάλματα και μεταβλητότητα, ειδικά στην περιοχή της πυέλου. Πιο αναλυτικά όσον αφορά την αναπαραγωγικότητα το σύστημα Catalyst HD επέδειξε καλύτερα αποτελέσματα σε όλα τα προπλάσματα και ξεπέρασε την απόδοση του συστήματος Sentinel. Τόσο η σταθερότητα όσο και η ακρίβεια για την περιστροφή και την μεταφορά ήταν υψηλή. Ο αλγόριθμος SRS ξεπέρασε τον συμβατικό αλγόριθμο σε αναπαραγωγικότητα και ακρίβεια, ειδικά για το πρόπλασμα κεφαλής. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη ανάλυση εικόνας και στη μειωμένη αβεβαιότητα στους υπολογισμούς εγγραφής. Ωστόσο, ο αλγόριθμος SRS μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους υπολογισμού λόγω του αυξημένου αριθμού των αντίστοιχων σημείων. Συμπερασματικά το σύστημα Catalyst έδειξε ιδιαίτερα με τον αλγόριθμο SRS παρουσιάζει υψηλή αναπαραγωγικότητα, ακρίβεια και σταθερότητα, καθιστώντας το κατάλληλο για ακριβή τοποθέτηση του ασθενούς στην ακτινοθεραπεία.

Η δυνατότητα ενός συστήματος οπτικής επιφανειακής παρακολούθησης σε μη ομοεπίπεδες μόνο ισοκεντρικές θεραπείες πολλαπλών εγκεφαλικών μεταστάσεων

Οι Ans C. C. Swinnen et al (2020) [39] μελέτησαν η χρήση της στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής (SRS) για ασθενείς με πολλαπλές εγκεφαλικές μεταστάσεις (BM), δίνοντας έμφαση στη στροφή από την ακτινοθεραπεία ολόκληρου του εγκεφάλου (WBRT) λόγω των παρενεργειών της. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στις θεραπείες με γραμμικούς επιταχυντές (linac), όπως η ογκομετρική διαμορφωμένη θεραπεία τόξου (VMAT), επιτρέπουν την αποτελεσματική, ακριβή παροχή ακτινοβολίας με ελάχιστη βλάβη στον υγιή εγκεφαλικό ιστό. Η εισαγωγή μη ομοεπίπεδων τεχνικών και η διόρθωση έξι βαθμών ελευθερίας (6DoF) βελτιώνει την ακρίβεια της θεραπείας. Δίνεται έμφαση στη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης του ασθενούς για τη μείωση των σφαλμάτων τοποθέτησης, με το Optical Surface

Tracking (OST) να προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση για μη επεμβατική παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Το σύστημα παρακολούθησης οπτικής επιφάνειας Catalyst HD™ (OST) χρησιμοποιεί LED και κάμερες για να δημιουργήσει μια τρισδιάστατη επιφάνεια του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ακριβή τοποθέτηση κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας. Παρακολουθεί την κίνηση του ασθενούς κατά τη διάρκεια της θεραπείας, ενισχύοντας την ακρίβεια σε σύγκριση με το CBCT. Το σύστημα ενσωματώνεται με μη ομοεπίπεδες θεραπείες, προσαρμόζοντας τους διαφορετικούς τόνους δέρματος και επαληθεύοντας τη ρύθμιση του ασθενούς σε όλες τις γωνίες του καναπέ. Η στερέωση ασθενούς περιλαμβάνει σάκο κενού και μάσκα για σταθερότητα, ενώ η διασφάλιση ποιότητας ρουτίνας διασφαλίζει την ευθυγράμμιση με το σύστημα CBCT. Ο σχεδιασμός της θεραπείας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το Eclipse TPS με υπολογισμό δόσης φωτονίων Acuros, χρησιμοποιώντας ένα Varian TrueBeam STx linac και ενέργεια 6 MV. Η ακρίβεια της ρύθμισης αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τις μετατοπίσεις ισοκέντρου μεταξύ του συστήματος OST και της ενσωματωμένης απεικόνισης kV, χρησιμοποιώντας ένα πρόπλασμα για επαλήθευση στον κρεβάτι θεραπείας 0° και 270°. Η ακρίβεια του Catalyst HD™ δοκιμάστηκε τόσο με ένα πρόπλασμα όσο και με επτά εθελοντές, δείχνοντας την αξιοπιστία του για την τοποθέτηση του ασθενούς κατά τη διάρκεια του SRS, παρά τα πιθανά προβλήματα με τις τρίχες του προσώπου που επηρεάζουν την αντανάκλαση του φωτός. Η στερεοτακτική ακτινοθεραπεία (SRS) απαιτεί ακρίβεια υποχλιοστών, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με σύγχρονα συστήματα και προσεκτική επαλήθευση. Το SRS με καθοδήγηση εικόνας με θερμοπλαστικές μάσκες, CBCT και ρομποτικούς καναπέδες εξασφαλίζει ακριβή ευθυγράμμιση μεταξύ των ισοκέντρων απεικόνισης και ακτινοβολίας. Η συνεχής παρακολούθηση με το Optical Surface Tracking (OST) ενισχύει την ακρίβεια της θεραπείας, ιδιαίτερα κατά τις μη ομοεπίπεδες τεχνικές. Οι δοκιμές από άκρο σε άκρο με δοσιμετρία φιλμ αποδεικνύουν καλή συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων δόσεων. Η ακρίβεια του συστήματος OST επαληθεύτηκε με μελέτες σε προπλάσματα και εθελοντών, που έδειξαν αποκλίσεις κάτω από 0,6 mm. Οι δοκιμές διασφάλισης ποιότητας όπως η δοκιμή Winston-Lutz (WL) βοηθούν να ληφθεί υπόψη η μετατόπιση της περιστροφής του καναπέ, διασφαλίζοντας την ακριβή χορήγηση δόσης σε θεραπείες SRS.

Ποσοτικοποίηση ψευδών διορθώσεων θέσης λόγω κίνησης του προσώπου χρησιμοποιώντας SGRT με μάσκες προσώπου ανοιχτού τύπου

Οι Victoria Bry et al (2021) [40] μελέτησαν την χρήση μαस्कών ανοιχτού τύπου ως τεχνική ακινητοποίησης για την θεραπεία του ενδοκρανιακού καρκίνου και του τραχήλου σε δέκα άτομα. Ο στόχος ήταν να ποσοτικοποιήσει περαιτέρω τις ψευδείς διορθώσεις μετατόπισης θέσης που δημιουργούνται από το σύστημα SGRT λόγω της κίνησης του προσώπου, αξιολογώντας πολλαπλά σημεία ενδιαφέροντος SGRT χρησιμοποιώντας δύο ρυθμίσεις χωρικής ανάλυσης. Μέσω των μαस्कών ανοιχτού τύπου επιτρέπεται η παρακολούθηση της κίνησης σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με το SGRT χωρίς επιπλέον ακτινοβολία δημιουργώντας μια τρισδιάστατη επιφάνεια του ασθενούς και ο αλγόριθμος συγκρίνει την ζωντανή εικόνα με την αναφερόμενη παρακολουθώντας τις αποκλίσεις από την αρχική θέση θεραπείας. Με την χρήση του Catalyst δέκα ασθενείς ακινητοποιήθηκαν με τις

μάσκες ανοικτού τύπου μετρώντας δύο διαφορετικές αναλύσεις την τυπική και τον SRS. Στην τυπική ανάλυση ο αλγόριθμος είναι ωφέλιμος σε για μη άκαμπτες περιοχές ενώ το SRS έχοντας υψηλότερη ανάλυση είναι πιο ισχυρός υπολογίζοντας περισσότερα σημεία. Στην μελέτη που εγκρίθηκε από το Institutional Review Board (IRB) μετρήθηκαν οι τιμές των αποκλίσεων θέσης που προκαλούνται από τις κινήσεις των ματιών και τις εκφράσεις του προσώπου χρησιμοποιώντας ένα σύστημα SGRT. Τα άτομα ακινητοποιήθηκαν με διάφορες μάσκες, βαμμένες με μαύρο σπρέι για ενίσχυση της αντίθεσης το σύστημα Catalyst HD με ανάλυση SRS χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση. Τέσσερις περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) στο πρόσωπο αναλύθηκαν για κίνηση κατά τη διάρκεια εργασιών προσομοίωσης συναισθηματικών αντιδράσεων και οι μετατοπίσεις των θέσεων καταγράφηκαν και αναλύθηκαν στατιστικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι ψευδείς διορθώσεις θέσης μπορούν να καταγραφούν από ένα σύστημα SGRT και να ενισχυθούν με βάση τη χωρική ανάλυση και το μέγεθος ROI, για ασθενείς που αλλάζουν εκφράσεις του προσώπου. Ακόμη και μικρές κινήσεις του προσώπου μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια SGRT, ειδικά με μικρότερες περιοχές ενδιαφέροντος. Μεγαλύτερα ROI μετράζουν τον θόρυβο συμπεριλαμβάνοντας περισσότερα χαρακτηριστικά προσώπου. Η μελέτη δεν έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των λειτουργιών SRS και τυπικής ανάλυσης, εκτός από τις εργασίες με ανοιχτά μάτια. Η εκπαίδευση των ασθενών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς η συμπεριφορά του ασθενούς επηρεάζει την ακρίβεια της θεραπείας. Παρατηρήθηκε απόκλιση έως και 1,1 mm για χαλαρές εκφράσεις σε πρακτικές ROI, υπογραμμίζοντας την ανάγκη παρακολούθησης και πιθανής ακτινογραφικής επαλήθευσης για τη διασφάλιση της ακριβούς χορήγησης θεραπείας.

Ακρίβεια τοποθέτησης του ασθενούς με χρήση επιφανειακής καθοδηγούμενης ακτινοθεραπείας με παραμορφώσιμη εγγραφή σε περιπτώσεις παραμορφώσιμης επιφάνειας

Οι Boriphat Kadman et al (2022) [41] αξιολόγησαν την επίδραση που έχει ένας μαστός υπό παραμόρφωση στην ακρίβεια της διόρθωσης του συστήματος Catalyst. Πιο αναλυτικά οι κλασικοί μέθοδοι χρησιμοποιούν μη επεμβατικούς δείκτες δέρματος, αλλά συχνά είναι άβολοι και κοσμητικά ανεπιθύμητοι καθώς και το τατουάζ που είναι βολικό για τους ακτινολόγους είναι επώδυνο για τους ασθενείς. Έτσι η σύγχρονη ακτινοθεραπεία με καθοδήγηση εικόνας (IGRT) χρησιμοποιεί συστήματα αξονικής τομογραφίας κώνου (CBCT) και κατευθυνόμενης ακτινοθεραπείας επιφάνειας (SGRT) όπως το Catalyst™ HD για ακριβή, μη επεμβατική ρύθμιση. Το Catalyst™ HD σαρώνει και διορθώνει τη θέση του ασθενούς αντιστοιχίζοντας ζωντανές εικόνες με δεδομένα αναφοράς από προσομοιώσεις CT. Χρησιμοποιεί έναν παραμορφώσιμο αλγόριθμο για την προσαρμογή της στάσης του ασθενούς και την ανίχνευση αποκλίσεων. Αυτό το σύστημα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο για ασθενείς με καρκίνο του μαστού, των οποίων το σχήμα του μαστού μπορεί να αλλάξει λόγω οιδήματος ή παραμόρφωσης μετά την επέμβαση, επηρεάζοντας δυνητικά την κατανομή της δόσης. Ο αλγόριθμος καταγραφής παραμορφώσιμων εικόνων του Catalyst™ HD στοχεύει στην αντιμετώπιση αυτών των αλλαγών, αν και οι προκλήσεις παραμένουν στην ακριβή διόρθωση θέσεων όταν παραμορφώνονται τα σώματα των ασθενών. Στην μελέτη χρησιμοποιήθηκε το Catalyst στα συστήματα SGRT βοηθά στον εντοπισμό και στην παρακολούθηση της θέσης του ασθενούς και βοηθά στην είσοδο του και τη βαθιά κράτηση της αναπνοής (DIBH) κατά τη διάρκεια

της θεραπείας. Χρησιμοποιώντας τρεις κάμερες και σχεδόν αόρατα βιολετί μοτίβα, δημιουργεί έναν χρωματικό χάρτη σφαλμάτων στάσης, επιτρέποντας ακριβείς διορθώσεις χωρίς την ανάγκη για σημάδια στο δέρμα ή τατουάζ. Η συσχέτιση μεταξύ του μέσου σφάλματος εγκατάστασης και της παραμόρφωσης του μαστού αναλύθηκε χρησιμοποιώντας φυσικά φαντάσματα μαστού με βάση δεδομένα από έξι ασθενείς με καρκίνο του μαστού. Μετρήθηκαν τα φαινόμενα παραμόρφωσης, με επικύρωση που περιελάμβανε 20 σύνολα δεδομένων. Η μελέτη ποσοτικοποίησε την παραμόρφωση του μαστού συγκρίνοντας αξονικές τομογραφίες αρχικών και παραμορφωμένων μαστών. Χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, δημιουργήθηκαν φυσικά φαντάσματα μαστού και σαρώθηκαν με αξονικό τομογράφο. Το σύστημα SGRT χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση θέσης και τα δεδομένα μεταφέρθηκαν σε ένα σύστημα σχεδιασμού θεραπείας. Η μονάδα απόστασης στο 3D Slicer αξιολόγησε την παραμόρφωση και η ακρίβεια τοποθέτησης αξιολογήθηκε με το κρεβάτι θεραπείας 6D και σύστημα CBCT. Η συλλογή δεδομένων περιελάμβανε 25 έρευνες και 20 σύνολα δεδομένων επικύρωσης, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τρεις φορές για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια. Τα σφάλματα εγκατάστασης καταγράφηκαν ως σφάλματα μεταφοράς και περιστροφής. Τα αποτελέσματα έδειξαν την συσχέτιση μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων σφαλμάτων μέσης μεταφοράς (MT) και περιστροφής (MR) αναλύθηκε χρησιμοποιώντας 45 σύνολα δεδομένων, δείχνοντας ισχυρή ακρίβεια εντός $\pm 5 \text{ mm}/\pm 5^\circ$ για το 91% και το 93% των περιπτώσεων, αντίστοιχα. Παρουσιάστηκαν ορισμένες αποκλίσεις λόγω αβεβαιοτήτων, όπως σφάλματα χειροκίνητης ρύθμισης και μεγάλες παραμορφώσεις του μαστού. Η παραμορφώσιμη καταχώρηση του συστήματος SGRT επηρεάστηκε από την παραμόρφωση του μαστού, ιδιαίτερα στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Συμπερασματικά διαπιστώθηκε ότι η παραμόρφωση εμφανίζεται περισσότερο στη μεταφορά παρά στην περιστροφή καθώς και το μέγεθος της παραμόρφωσης του μαστού επηρεάζει την ακρίβεια τοποθέτησης του συστήματος Catalyst.

Μεθοδολογία μετρήσεων θερμικής μετατόπισης για συστήματα επιφανειακής καθοδήγησης ακτινοθεραπείας και κλινικής εκτίμησης επιπτώσεων που απεικονίζονται στο σύστημα C-Rad Catalyst HD

Οι Joerg Lehmann et al (2022) [42] μελέτησαν πως η θερμική μετατόπιση σε οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για επιφανειακή καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία (SGRT) προσθέτει αβεβαιότητα στη ρύθμιση και την παρακολούθηση του ασθενούς. Ενώ η μετατόπιση συνήθως αξιολογείται κατά τη θέση σε λειτουργία του συστήματος, υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα για την μετατόπιση των θερμικών καμερών στο SGRT. Αυτή η μελέτη εξετάζει τη μετατόπιση στο σύστημα Catalyst HD, το οποίο χρησιμοποιεί τρεις υποδοχές κάμερας τοποθετημένες σε απόσταση 120° γύρω από το ισόκεντρο επεξεργασίας. Το σύστημα συνδυάζει σήματα από αυτές τις κάμερες για τον εντοπισμό και τη θεραπεία του ασθενούς, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους καταχώρισης. Η μελέτη δίνει έμφαση στη μεθοδολογία για τη μέτρηση της μετατόπισης και τις κλινικές επιπτώσεις της, που εφαρμόζεται σε άλλα συστήματα SGRT. Από τις μετρήσεις μετατόπισης που πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερα κλινικά περιστατικά με βάση το Catalyst όπου περιλάμβανε την αξιολόγηση της μετατόπισης των ακίνητων αντικειμένων για να συμπεράνει την μετατόπιση του συστήματος με δύο τύπους μετρήσεων. Ο πρώτος τρόπος ήταν ο καθημερινός έλεγχος κάθε κάμερας όπου η μετατόπιση κάθε κάμερας υπολογίστηκε

χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Ημερήσιου Ελέγχου, ένα πρόπλασμα τοποθετήθηκε με ακρίβεια στο ισόκεντρο του Linac με τις μετρήσεις γίνονταν κάθε 5 λεπτά για 100 λεπτά και αναλύονταν σε τρεις διαστάσεις (X, Y, Z). Η μετατόπιση μετρήθηκε υπό διάφορες συνθήκες: σύστημα σε αναμονή, σύστημα απενεργοποιημένο κατά τη διάρκεια της νύχτας, διαφορετικός φωτισμός και διακοπές στη χρήση. Ο δεύτερος τρόπος ήταν η αξιολόγηση της μετατόπισης χρησιμοποιώντας ένα δοκιμαστικό τεστ ενός ασθενή και ένα εικονικό ανθρώπινο αρσενικό πρόπλασμα πύελου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε λειτουργία cMotion για να επιτραπεί η αυτόματη εγγραφή απόκλισης με το σύστημα να αξιολογεί από την εκκίνηση χωρίς να εισέλθει στη λειτουργία cPosition για να καταγράψει την αρχική μετατόπιση προθέρμανσης. Η μετατόπιση μετρήθηκε σε λειτουργίες μη SRS και SRS και η επαναληψιμότητα επαληθεύτηκε μέσω πολλαπλών δοκιμών με τις πρόσθετες μετρήσεις να επιβεβαιώνουν τη σταθερή μετατόπιση μεταξύ των λειτουργιών cPosition και cMotion. Για αρχή τα αποτελέσματα έδειξαν στον καθημερινό έλεγχο ότι το σύστημα Catalyst+ HD θερμαίνεται μόνο κατά τη διάρκεια της ενεργής σάρωσης και ψύχεται στα διαλείμματα σε χρονικό πλαίσιο 30 λεπτών και μετατοπίζεται έως και 0,84 mm. Η απόκλιση από τις καταστάσεις «Αναμονής» και «Απενεργοποίηση» ήταν πανομοιότυπες, χωρίς να απαιτούνται ειδικά μέτρα κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος. Επίσης η μετατόπιση στην κλινική λειτουργία (cMotion) ήταν έως και 1 mm και οι περιστροφικές μετατοπίσεις ήταν ελάχιστες. Παρατηρήθηκε συνέπεια σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και σε διαφορετικά συστήματα τόσο σε μεταφορικές όσο και περιστροφικές κατευθύνσεις. Ένα συστηματικό σφάλμα που επηρεάζει την ακρίβεια της ρύθμισης και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς και τις ανοχές περιθωρίων είναι το drift. Συμπερασματικά η θερμική μετατόπιση στα συστήματα SGRT μπορεί να μετρηθεί και να ποσοτικοποιηθεί, με μέγιστη κλινική μετατόπιση που παρατηρείται στο 1 mm. Ρύθμιση και παρακολούθηση επιπτώσεων ολίσθησης, μειώνεται με την αύξηση του χρόνου προθέρμανσης.

Σύγκριση της κατευθυνόμενης επιφανειακής απεικόνισης έναντι των στερεοσκοπικών ακτίνων X για τη θεραπεία SRS πολλαπλών μεταστάσεων με ένα μόνο ισόκεντρο χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα ανθρωπόμορφα προπλάσματα γέλης

Οι Victoria Bry et al (2022) [43] αξιολόγησαν την ακρίβεια του συστήματος Catalyst για την επαλήθευση της θέσης σε σύγκριση με ένα στερεοσκοπικό σύστημα απεικόνισης ακτίνων X για πολλαπλές μεταστάσεις στερεοτακτική ακτινοχειρουργική (SRS) με την βοήθεια ενός τρισδιάστατου προπλάσματος από πολυμερές τζελ που ακινητοποιήθηκε με μάσκες ανοικτού τύπου. Οι ασθενείς με μεταστάσεις εγκεφάλου σαν θεραπεία την ακτινοθεραπεία όλου του εγκεφάλου όμως οι ασθενείς με καλή απόδοση μπορούν να λάβουν μια πιο επιθετική τεχνική αυτή της στερεοτακτικής ακτινοχειρουργικής (SRS). Το SRS απαιτεί υψηλή ακρίβεια για την αποφυγή επιπλοκών, παρουσιάζοντας προκλήσεις στη ρύθμιση του ασθενούς και στον σχεδιασμό θεραπείας. Στην μελέτη πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές διασφάλισης ποιότητας (QA) ώστε να επαληθευθεί η ακρίβεια τοποθέτησης του συστήματος SGRT σε σύγκριση με την απεικόνιση ακτίνων X. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη με το Catalyst περιλάμβανε τρεις σαρωτές που

τοποθετούνται στην οροφή πάνω από έναν γραμμικό επιταχυντή (Varian Novalis TX) και υφίσταται τακτικές βαθμονομήσεις με το σύστημα να χαρτογραφεί πολλά σημεία στην επιφάνεια του ασθενούς, παρέχοντας δεδομένα 3D τοποθέτησης με τυπικές ή ειδικές αναλύσεις SRS. Με την χρήση του γραμμικού επιταχυντή Varian Novalis TX και ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο πρόπλασμα κεφαλής πραγματοποιήθηκε θεραπεία με ένα σύνθετο σχέδιο SRS που στόχευε πέντε εγκεφαλικές μεταστάσεις χρησιμοποιώντας τόσο απεικόνιση ακτίνων X όσο και SGRT για δοκιμές διασφάλισης ποιότητας από άκρο σε άκρο. Οι διορθώσεις θέσης και οι κατανομές δόσεων αναλύθηκαν μετά την ακτινοβολία χρησιμοποιώντας μαγνητική τομογραφία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το SGRT, όταν βαθμονομηθεί και χρησιμοποιηθεί σωστά, μπορεί να επιτύχει συγκρίσιμη ακρίβεια τοποθέτησης με τη συμβατική απεικόνιση ακτίνων X, προσφέροντας μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για τη ρύθμιση του ασθενούς σε θεραπείες SRS. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν αποκλίσεις κάτω από 1 mm μετατόπισης και 0,5° περιστροφής σε διαφορετικές γωνίες, υποδεικνύοντας ακρίβεια κάτω του χιλιοστού και για τις δύο μεθόδους. Επίσης οι διαφορές δόσης για στόχους μεγαλύτερους από 10 mm έδειξαν απόκλιση έως και 15% από τις προγραμματισμένες τιμές. Η ανάλυση δείκτη γάμμα επιβεβαίωσε ότι η απόδοση του SGRT ήταν συγκρίσιμη με τις τυπικές μεθόδους, με ποσοστά επιτυχίας άνω του 98% για τους περισσότερους στόχους. Η μελέτη έδειξε τη σκοπιμότητα χρήσης SGRT για τοποθέτηση σε κρεβάτι θεραπείας για ισοκεντρικό SRS πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας ένα δοσίμετρο γέλης και απέδειξε ότι το SGRT είχε ακρίβεια κάτω του χιλιοστού σε σύγκριση με το Exactrac. Η μελέτη τόνισε τη σημασία της ελαχιστοποίησης των σφαλμάτων ρύθμισης για τη διασφάλιση της ακριβούς δοσιμετρίας και πρότεινε ότι το SGRT παρέχει συνεχή διαχείριση κίνησης χωρίς πρόσθετη δόση απεικόνισης. Τέλος η ρύθμιση με SGRT απέδειξε υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα για την παροχή θεραπείας.

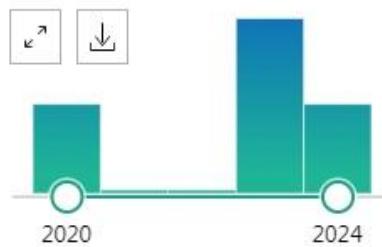
Ακτινοθεραπεία με την μέθοδο DIBH σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού με αριστερή όψη: δοσιμετρική ανάλυση οργάνων για τις δόσεις κινδύνου μιας αγωγής

Οι Jule Wolf et al (2023) [44] μελέτησαν και αξιολόγησαν τις δοσιμετρικές διαφορές στην καρδιακή ακτινοβολία με την τεχνική DIBH και με την ελεύθερη αναπνοή σε 130 ασθενείς με την χρήση των συστημάτων Catalyst και Sentinel. Σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού η τυχαία ακτινοβολία στο σημείο της καρδιάς έδειξε ένα αυξανόμενο ποσοστό ισχαιμικών καρδιακών επεισοδίων καθώς και καρδιακή ανεπάρκεια. Η έρευνα διήρκησε δύο χρόνια και εξετάστηκαν με ακτινοβολία χρησιμοποιώντας την τεχνική DIBH 203 ασθενείς με αριστερό ή αμφοτερόπλευρο καρκίνο του μαστού. Η τεχνική DIBH περιλάμβανε καθοδήγηση, αξονικές τομογραφίες και τρισδιάστατο σχεδιασμό θεραπείας καθώς η επικουρική ακτινοβολία ολόκληρου του μαστού ή του θωρακικού τοιχώματος χορηγήθηκε σύμφωνα με τα πρωτόκολλα του ιδρύματος, με έμφαση στην ελαχιστοποίηση της καρδιακής δόσης. Η μελέτη στόχευε να εξασφαλίσει τη βέλτιστη κάλυψη του όγκου στόχου με ταυτόχρονη τήρηση των καρδιακών περιορισμών. Η οριοθέτηση των όγκων έγινε τόσο με σάρωση ελεύθερης αναπνοής όσο και με DIBH και με την στατιστική

ανάλυση να δείχνει σημαντικά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα έδειξαν αρχικά στην καρδιά πως οι δοσιμετρικές παράμετροι για όλες τις καταχωρημένες καρδιακές δομές μειώθηκαν σημαντικά στη θέση DIBH. Έπειτα για τους πνεύμονες η τεχνική DIBH μείωσε το Dmean για τον αριστερό και τον δεξιό πνεύμονα κατά 7% και 12%, αντίστοιχα καθώς παρατηρήθηκαν μειώσεις για τον αριστερό πνεύμονα. Αυτή η μελέτη επιβεβαιώνει τα σημαντικά οφέλη μείωσης της δόσης του Deep Inspiration Breath Hold (DIBH) στην 3D Ακτινοθεραπεία (3DRT) για καρδιακές δομές, με πάνω από 40% μείωση του καρδιακού Dmean και ουσιαστικές μειώσεις στις δόσεις των πνευμόνων. Το DIBH ωφέλησε ιδιαίτερα τους ασθενείς μειώνοντας τους κινδύνους καρδιακών και πνευμονικών επιπλοκών, αν και μεμονωμένοι παράγοντες όπως η αναπνευστική ικανότητα και η συμμόρφωση επηρέασαν τα αποτελέσματα. Η μελέτη προτείνει προσαρμοσμένες προσεγγίσεις και η καθοδήγηση ασθενών θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της DIBH.

- **Varian IDENTIFY**

Με χρήση των λέξεων κλειδιών «varian identify system sgrt» στην επιστημονική βάση PubMed [45] προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα με τις επιστημονικές δημοσιεύσεις κατ' έτος



Εικόνα 9. Γράφημα μελετών του συστήματος Varian IDENTIFY[45].

Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα (Εικόνα 9) για το σύστημα Varian IDENTIFY οι μελέτες ξεκίνησαν από το 2020 μέχρι και το 2024 καθώς το σύστημα χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια δεν υπάρχουν πολλές μελέτες ακόμα.

Θέση σε λειτουργία και κλινική αξιολόγηση του συστήματος επιφανειακής απεικόνισης IDENTIFY για στερεοτακτική ακτινοχειρουργική χωρίς πλαίσιο.

Οι Elizabeth L. Covington et al (2023) [46] αξιολόγησαν την απόδοση του συστήματος IDENTIFY κατά την στερεοτακτική χειρουργική με την χρήση θερμοπλαστικής μάσκας που χρησιμοποιείται για την ακινητοποίηση. Πιο αναλυτικά είναι ένα σύστημα απεικόνισης επιφάνειας που αποτελείται από τρεις στερεοσκοπικές υποδοχές κάμερας που χωρίζονται κατά περίπου 90 μοίρες με κάθε υποδοχέα να προβάλλει ένα μοτίβο κηλίδων που χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή εικόνων σε μια τρισδιάστατη επιφάνεια. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τη αξιολόγηση της θερμικής μετατόπισης του οπτικού πεδίου και της διαφοράς στις μετατοπίσεις που αναφέρονται από την επιφανειακή απεικόνιση ως συνάρτηση της θέσης του ισοκέντρου. Με την βοήθεια του προπλάσματος QUASAR™ Penta-Guide παρακολούθηθηκε για θερμική μετατόπιση και το οπτικό πεδίο εκτιμήθηκε μετατοπίζοντας το πρόπλασμα κατά μήκος μεταφορικών αξόνων. Οι δοκιμές

ακρίβειας περιλάμβαναν μετακίνηση του προπλάσματος με κινήσεις κρεβατιού θεραπείας εντός εύρους ± 10 cm και $\pm 0,5$ cm. Δύο μέθοδοι εφάρμοσαν γνωστές μετατοπίσεις: μετατόπιση με μικρόμετρο και κίνηση του κρεβατιού για μετατοπίσεις και περιστροφές. Τα υπολειπόμενα σφάλματα αξιολογήθηκαν σε μη μηδενικές γωνίες καναπέ χρησιμοποιώντας ένα ακτινοσκοπικό ρουλεμάν σε ένα πρόπλασμα κεφαλής. Οι ασθενείς προσομοιώθηκαν με μια θερμοπλαστική μάσκα όπου οι περιοχές με περίγραμμα σώματος και προσώπου ορίστηκαν ως η επιφάνεια αναφοράς και η απόδοση από το σύστημα IDENTIFY. Η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε κατά τη ρύθμιση της θεραπείας, τις μετατοπίσεις καταγραφής και την προσαρμογή των θέσεων της κεφαλής. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη θέση έδειξαν πως μεγαλύτερο σφάλμα ήταν στα 0,3mm για την μετατόπιση με το κρεβάτι. Η παρακολούθηση από 386 ασθενείς σε διάστημα 457 ημερών αποκάλυψε ένα διάμεσο μέγεθος μετατόπισης που αναφέρθηκε ήταν 0,27 mm όπου κάποια από τα δεδομένα εξαιρέθηκαν λόγω έλλειψης ή ελλιπών αρχείων καταγραφής. Οι μετατοπίσεις ήταν υψηλότερες με την παρεμπόδιση της κάμερας, ειδικά για τους μαύρους ασθενείς. Συμπερασματικά τα αποτελέσματα έδειξαν θερμική μετατόπιση, ιδιαίτερα στην κατακόρυφη κατεύθυνση, αλλά παρέμεινε κάτω από 0,5 mm για μία ώρα. Η τεχνική απόδοση της μελέτης ευθυγραμμίζεται με άλλα εμπορικά συστήματα απεικόνισης, αν και κάθε σύστημα απαιτεί ατομική επικύρωση. Παρατηρήθηκε μειωμένη ακρίβεια σε μη μηδενικές γωνίες καναπέ, ειδικά στη διαμήκη διεύθυνση. Η ακρίβεια περιστροφής θα πρέπει να αξιολογείται κατά τη θέση σε λειτουργία.

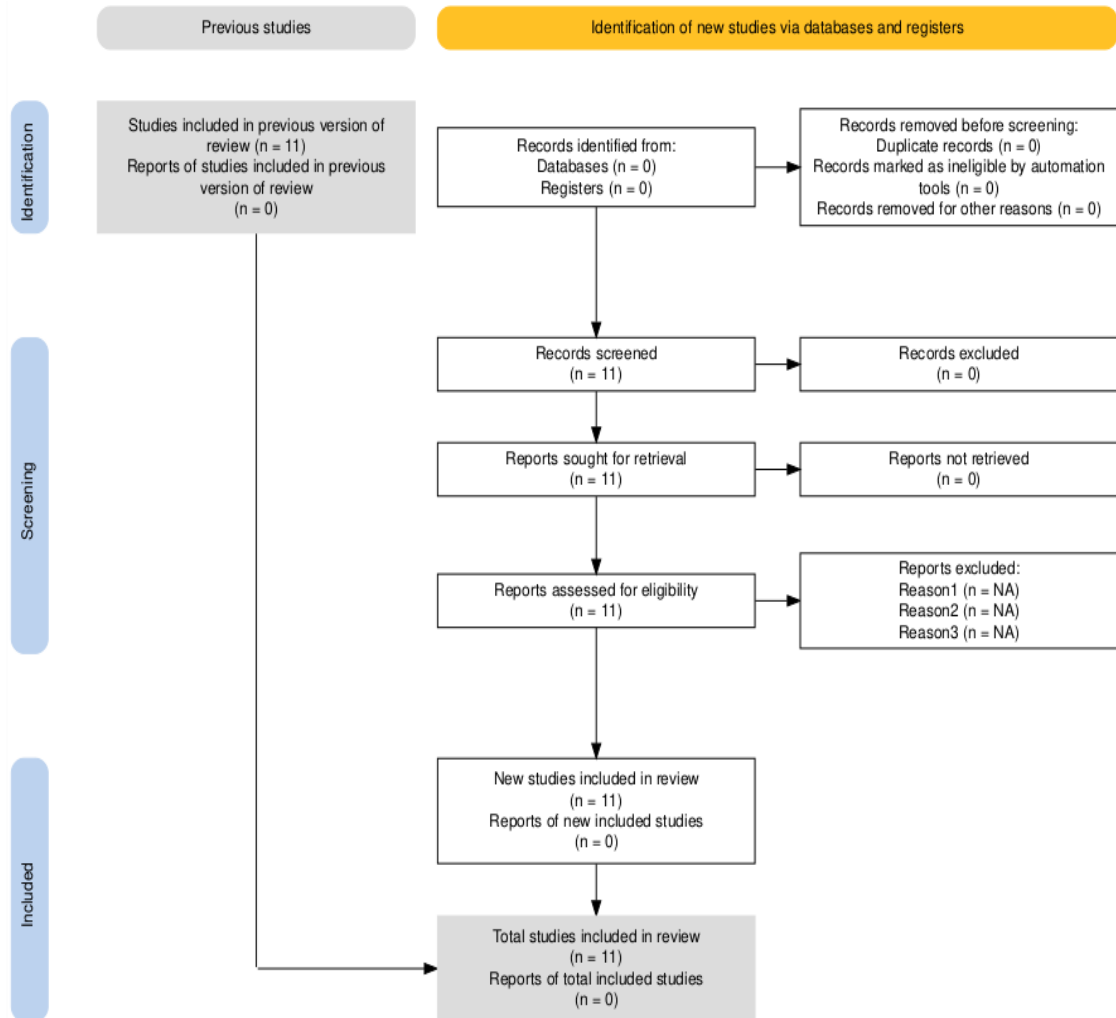
Χαρακτηρισμός του συστήματος σάρωσης επιφάνειας IDENTIFY για εγκατάσταση ακτινοθεραπείας σε κλειστή οπή

Οι Janita Dekker et al (2024) [47] μελέτησαν και αξιολόγησαν με την χρήση προπλάσματος την ακρίβεια, την αναπαραγωγικότητα και την χρονική σταθερότητα του IDENTIFY για ένα σύστημα SGRT κλειστής οπής. Το IDENTIFY δημιουργήθηκε για την τοποθέτηση ασθενούς και για τη διενέργεια μετρήσεων ενδοκλασματικής κίνησης και παρακολούθησης της αναπνοής και αποτελείται από τρεις βραχίονες καθένας από τους οποίους αποτελείται από έναν προβολέα που χρησιμοποιεί μπλε φως LED και δύο στερεοσκοπικές κάμερες, οι οποίες είναι τοποθετημένες στην οροφή. Ωστόσο η θέση των βραχιόνων προσαρμόζεται προκειμένου να αποφευχθεί το μπλοκάρισμα της κάμερας από τον επιταχυντή κλειστής οπής έτσι οι δύο βραχίονες είναι τοποθετημένοι αριστερά και δεξιά του ασθενούς και ο τρίτος είναι στο μπροστινό μέρος του κρεβατιού. Η πειραματική ρύθμιση για την αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος IDENTIFY περιελάμβανε μεταφορές και περιστροφές διαφόρων προπλάσματος χρησιμοποιώντας ένα εσωτερικό στάδιο εντοπισμού θέσης. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν τη δοκιμή της ακρίβειας του συστήματος σε έξι βαθμούς ελευθερίας χρησιμοποιώντας ένα πρόπλασμα κεφαλής, ένα Penta-Guide και ένα πρόπλασμα πνεύμονα. Πρόσθετες δοκιμές αξιολόγησαν τις επιπτώσεις των μικρών κινήσεων, των χρωμάτων της επιφάνειας, του φωτός περιβάλλοντος και της χρονικής σταθερότητας στην απόδοση του συστήματος. Τα προπλάσματα μετατοπίστηκαν σταδιακά και τα δεδομένα αναλύθηκαν με την χρήση Matlab. Η χρονική σταθερότητα δοκιμάστηκε με στατική μέτρηση 30 λεπτών και για τις δοκιμές χρώματος επιφάνειας χρησιμοποιήσαν μαύρα, καφέ και λευκά προπλάσματα κεφαλής, ενώ οι δοκιμές φωτός περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκαν στα 25, 70 και 90 lux. Τα σφάλματα

εντοπισμού από άκρο σε άκρο αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας σαρώσεις CT και CBCT με το φάντασμα Penta-Guide. Η επίδραση των διαφορετικών ορίων HU στην ακρίβεια του περιγράμματος του δέρματος διερευνήθηκε επίσης για να διασφαλιστεί η ακριβής ρύθμιση του ασθενούς. Το σύστημα IDENTIFY έδειξε υψηλή ακρίβεια παρά τα αρχικά μικρά λάθη, διατήρησε την ακρίβεια κατά τις μεταφορές και τις περιστροφές. Στη θέση φορτίου, η αναπαραγωγικότητα του συστήματος ήταν 0,02 mm, με μέγιστη μετατόπιση 0,33 mm σε 30 λεπτά. Το χρώμα της επιφάνειας επηρέασε ελαφρώς την ακρίβεια, με τις μαύρες και καφέ επιφάνειες να παρουσιάζουν οριακά χειρότερες επιδόσεις από τις λευκές με τα επίπεδα φωτισμού περιβάλλοντος είχαν ελάχιστη επίδραση στην ακρίβεια. Το σφάλμα εντοπισμού από άκρο σε άκρο ήταν εντός αποδεκτών ορίων και το βέλτιστο όριο HU για το περίγραμμα του δέρματος έδειξε μικρές αποκλίσεις. Τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν για τις μεταφορές και τις περιστροφές των προπλασμάτων ήταν τόσο στη θέση ευθυγράμμισης (ρύθμιση ασθενούς) όσο και στη θέση φορτίου (θεραπεία ασθενούς). Για το λευκό πρόπλασμα κεφαλής, η ακρίβεια ήταν 0,07 mm και 0,07° στο φορτίο και 0,06 mm και 0,01° σε ευθυγράμμιση. Παρόμοια ακρίβεια παρατηρήθηκε για το Penta-Guide, ενώ το πρόπλασμα του πνεύμονα CIRS έδειξε μικρότερη ακρίβεια (0,20 mm, 0,05°), πιθανότατα λόγω του σχήματός του. Συνολικά, το σύστημα διατήρησε την ακρίβεια εντός των απαιτούμενων ορίων: λιγότερο από 1 mm για μετατοπίσεις έως 5 cm και λιγότερο από 2 mm για μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Η ακρίβεια αξιολογήθηκε προς όλες τις κατευθύνσεις, δείχνοντας μικρά σφάλματα σε ακούσιες κατευθύνσεις. Το σύστημα επέδειξε αναπαραγωγικότητα 0,02 mm και μετατόπιση εντός 0,33 mm και 0,02 °. Το χρώμα της επιφάνειας και το φως του περιβάλλοντος είχαν ελάχιστη επίδραση. Το σφάλμα εντοπισμού από άκρο σε άκρο ήταν εντός αποδεκτών ορίων και οι διαφορές στα όρια HU για το περίγραμμα του δέρματος ήταν μικρές. Το σύστημα IDENTIFY είναι αποτελεσματικό για τη ρύθμιση του ασθενούς και την παρακολούθηση της κίνησης με ακρίβεια υποχιλιοστών.

8. Διαγράμματα Ροής Ανάκτησης Βιβλιογραφίας των συστημάτων

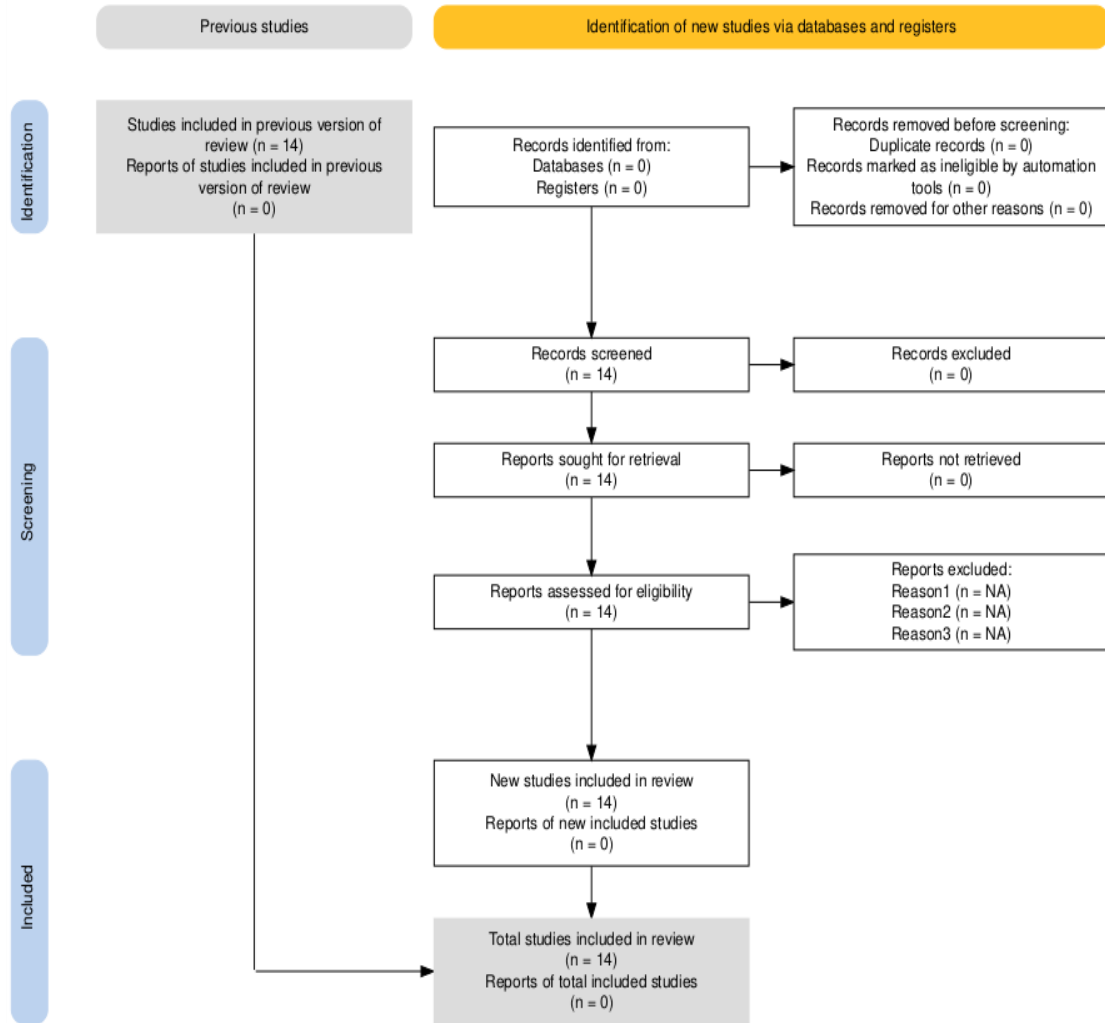
- Vision RT AlignRT



Εικόνα 10. Διάγραμμα Ροής μελέτης αρθρογραφίας για το Vision RT AlignRT [72].

Μετά από την έρευνα που έγινε για το σύστημα Vision RT AlignRT από την επιστημονική βάση PubMed χρησιμοποιώντας την λέξη κλειδί "vision rt alignrt" δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα ροής (Εικόνα 10). Τα άρθρα που βρέθηκαν ήταν έντεκα όπου αναγνώστηκαν όλα αφού ήταν όλα σχετικά με το σύστημα. Από αυτά κανένα δεν χρειάστηκε αναζήτηση αναφοράς και η επιλογή τους έγινε καθώς όλα ήταν σχετικά με την έρευνα.

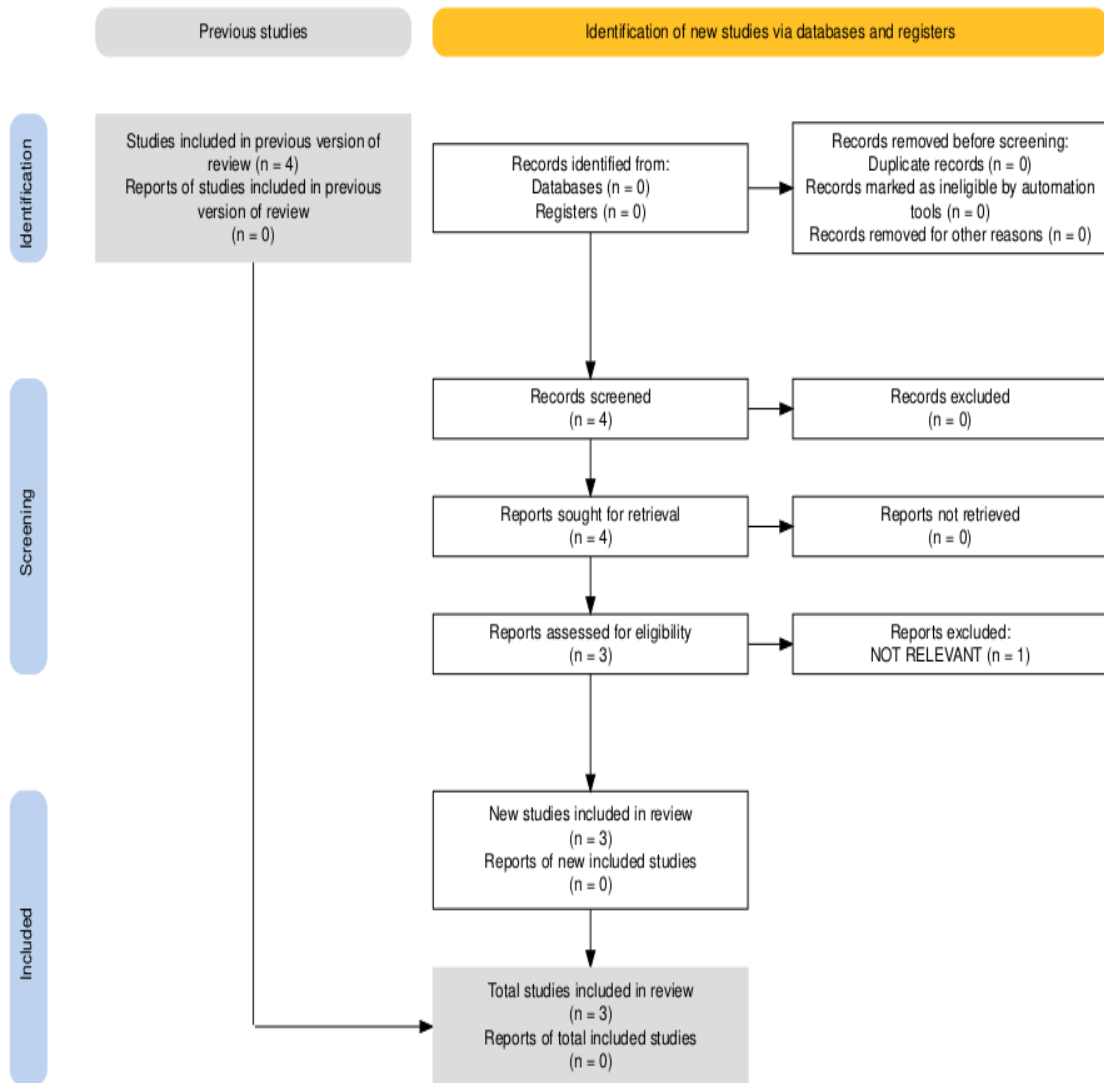
• C-RAD Catalyst



Εικόνα 11. Διάγραμμα Ροής μελέτης αρθρογραφίας για το C-RAD Catalyst [72].

Για το σύστημα C-RAD Catalyst δημιουργήθηκε το παραπάνω διάγραμμα ροής (Εικόνα 11) από την επιστημονική βάση PubMed χρησιμοποιώντας την λέξη κλειδί “varian identify system sgrt”. Από την βάση βρέθηκαν δεκατέσσερα άρθρα όπου αναγνώστηκαν όλα και επιλέχθηκαν όλα καθώς ήταν σχετικά με το σύστημα.

• **Varian IDENTIFY**



Εικόνα 12. Διάγραμμα Ροής μελέτης αρθρογραφίας για το Varian IDENTIFY [72].

Για το σύστημα Varian IDENTIFY δημιουργήθηκε το παραπάνω διάγραμμα ροής (Εικόνα 12) από την επιστημονική βάση PubMed χρησιμοποιώντας την λέξη κλειδί “varian identify system sgrt”. Από την βάση βρέθηκαν συνολικά τέσσερα άρθρα αναγνώστηκαν όλα και από αυτά τα πιο σχετικά με βάση το σύστημα ήταν τρία. Έτσι τα άρθρα που αναφέρθηκαν στην εργασία ήταν τρία από τα τέσσερα.

9. Συμπέρασμα

Συμπερασματικά η τοποθέτηση μέσω επιφανειακής καθοδήγησης επιτρέπει στον θεραπευτή να παρακολουθεί και να διορθώνει όλες τις κινήσεις του ασθενούς στους 6 βαθμούς ελευθερίας (6DOF). Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης μιας καθορισμένης περιοχής ενδιαφέροντος (ROI) για την παρακολούθηση της επιφάνειας του ασθενούς. Με την τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας και χρωματική κωδικοποίηση, εμφανίζονται σε ζωντανή ροή οι μετατοπίσεις στη θέση και την περιστροφή του ασθενούς σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς. Αυτή η πληροφορία βοηθά την ομάδα θεραπείας να διορθώσει την ευθυγράμμιση του ασθενούς πριν από την έναρξη της θεραπείας. Κατά τη διάρκεια της θεραπείας, η κίνηση του ασθενούς παρακολουθείται για να διασφαλιστεί ότι παραμένει εντός των ορίων. Μετά την επαλήθευση της θέσης με απεικόνιση, τυχόν μετατοπίσεις του κρεβατιού καταγράφονται και μπορεί να δημιουργηθεί μια νέα επιφάνεια αναφοράς. Αν ο ασθενής βγει εκτός των καθορισμένων ανοχών, ο ελεγκτής στην κονσόλα θεραπείας θα ενεργοποιήσει έναν ηχητικό συναγερμό και ο θεραπευτής μπορεί να σταματήσει τη δέσμη.

Η επιφανειακά καθοδηγούμενη ακτινοθεραπεία έχει αρχίσει και εφαρμόζεται όλο και περισσότερο καθώς παρέχει ταχύτερη και ακριβέστερη τοποθέτηση του ασθενούς σε σύγκριση με τη συμβατική ρύθμιση εντοπισμού 3 σημείων.

10. Αναφορές

- [1] Radiotherapy patient positioning archives (no date) PAPAPOSTOULOU. Available at: <https://www.papapostolou.gr/en/product-category/radiotherapy-patient-positioning/> (Accessed: 07 September 2024).
- [2] Zhao, B. et al. (2017) ‘Minimal mask immobilization with optical surface guidance for head and neck radiotherapy’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 19(1), pp. 17–24. doi:10.1002/acm2.12211.
- [3] Radiological Society of North America (RSNA) and American College of Radiology (ACR) (no date) Image-guided radiation therapy (IGRT), *Radiologyinfo.org*. Available at: <https://www.radiologyinfo.org/en/info/igrt> (Accessed: 09 September 2024).
- [4] van der Veen, J., Laenen, A. and Nuyts, S. (2017) ‘Modern radiotherapy techniques versus three-dimensional conformal radiotherapy for head and neck cancer’, *Cochrane Database of Systematic Reviews* [Preprint]. doi:10.1002/14651858.cd012904.
- [5] Miyabe, Y. et al. (2011) ‘Positioning accuracy of a new image-guided radiotherapy system’, *Medical Physics*, 38(5), pp. 2535–2541. doi:10.1118/1.3578607.
- [6] Bortfeld, T. (2006) *Image guided IMRT with 44 tables* Thomas Bortfeld ... (Ed.). Berlin: Springer.
- [7] Sadagopan, R. et al. (2009) ‘Characterization and clinical evaluation of a novel IMRT Quality Assurance System’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 10(2), pp. 104–119. doi:10.1120/jacmp.v10i2.2928.

- [8] Stereotactic Radiosurgery (2019) Mayo Clinic. Available at: <https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/stereotactic-radiosurgery/about/pac-20384526> (Accessed: 09 September 2024).
- [9] Surface guided radiation therapy (no date) MUSC Health | Charleston SC. Available at: <https://muschealth.org/locations/florence-medical-center/services/cancer-services/radiation-oncology/treatment-and-services/surface-guided-radiation-therapy> (Accessed: 09 September 2024).
- [10] Laaksomaa, M. et al. (2022) ‘AlignRT®, Catalyst™ and RPMTM in locoregional radiotherapy of breast cancer with DIBH. is IGRT still needed?’, *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, 27(5), pp. 797–808. doi:10.5603/rpor.a2022.0097.
- [11] Freeman, T. (2018) Surface guidance: A new tool for radiotherapy, *Physics World*. Available at: <https://physicsworld.com/a/surface-guidance-a-new-tool-for-radiotherapy/> (Accessed: 09 September 2024).
- [12] AlignRT: Our market-leading SGRT solution (2024) Vision RT. Available at: <https://visionrt.com/our-solutions/alignrt/> (Accessed: 09 September 2024).
- [13] Naidoo, W. and Leech, M. (2022) ‘Feasibility of surface guided radiotherapy for patient positioning in breast radiotherapy versus conventional tattoo-based setups- A systematic review’, *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology*, 22, pp. 39–49. doi:10.1016/j.tipsro.2022.03.001.
- [14] Freisleder, P. et al. (2020) ‘Recent advances in surface guided radiation therapy’, *Radiation Oncology*, 15(1). doi:10.1186/s13014-020-01629-w.
- [15] Brahme, A., Nyman, P. and Skatt, B. (2008) ‘4D laser camera for accurate patient positioning, collision avoidance, image fusion and adaptive approaches during diagnostic and therapeutic procedures’, *Medical Physics*, 35(5), pp. 1670–1681. doi:10.1118/1.2889720.
- [16] How and why surface guided radiation therapy developed (no date) Brainlab. Available at: <https://www.brainlab.com/journal/how-and-why-surface-guided-radiation-therapy-developed-sgrt/> (Accessed: 09 September 2024).
- [17] Penninkhof, J. et al. (2022) ‘Evaluation of image-guided and surface-guided radiotherapy for breast cancer patients treated in deep inspiration breath-hold: A single institution experience’, *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology*, 21, pp. 51–57. doi:10.1016/j.tipsro.2022.02.001.
- [18] Hoisak, J.D.P. and Pawlicki, T. (2018) ‘The role of optical surface imaging systems in radiation therapy’, *Seminars in Radiation Oncology*, 28(3), pp. 185–193. doi:10.1016/j.semradonc.2018.02.003.
- [19] Hoisak, J. et al. (2021) *Surface guided radiation therapy*. Boca Raton: CRC Press.
- [20] Vision+RT+alignrt+ - search results - pubmed (no date) National Center for Biotechnology Information. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=vision%2Br%2Balgnrt%2B&filter=simsearch2.ffrft> (Accessed: 13 February 2024).
- [21] Krenkli, M., Gaiano, S., Mones, E. et al. Reproducibility of patient setup by surface image registration system in conformal radiotherapy of prostate cancer. *Radiat Oncol* 4, 9 (2009).

- [22] Cravo Sá, A. et al. (2018) ‘Radiotherapy setup displacements in breast cancer patients: 3D surface imaging experience’, *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 23(1), pp. 61–67. doi:10.1016/j.rpor.2017.12.007.
- [23] Flores-Martinez, E. et al. (2019) ‘Assessment of the use of different imaging and delivery techniques for cranial treatments on the halcyon linac’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 21(1), pp. 53–61. doi:10.1002/acm2.12772.
- [24] El-Sherif, O., Remmes, N.B. and Kruse, J.J. (2020) ‘Validating robotic couch isocentricity with 3D Surface Imaging’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 21(8), pp. 168–172. doi:10.1002/acm2.12939.
- [25] Nguyen, D. et al. (2020) ‘Commissioning and performance testing of the first prototype of alignrt inboreTM a HalcyonTM and EthosTM-dedicated surface guided radiation therapy platform’, *Physica Medica*, 80, pp. 159–166. doi:10.1016/j.ejmp.2020.10.024.
- [26] MacFarlane, MJ, Jiang, K, Mundis, M, Nichols, E, Gopal, A, Chen, S & Biswal, NC 2021, ‘Comparison of the dosimetric accuracy of Proton breast treatment plans delivered with SGRT and CBCT setups’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 22, no. 9, pp. 153–158.
- [27] Lorchel, F. et al. (2022) ‘Reproducibility of deep-inspiration breath hold treatments on HalcyonTM performed using the first clinical version of alignrt inboreTM: Results of cybore study’, *Clinical and Translational Radiation Oncology*, 35, pp. 90–96. doi:10.1016/j.ctro.2022.05.002.
- [28] Sorgato, V. et al. (2022) ‘Benchmarking the ALIGNRT surface deformation module for the early detection and quantification of oedema in breast cancer radiotherapy’, *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology*, 21, pp. 16–22. doi:10.1016/j.tipsro.2021.12.002.
- [29] Nguyen, D. et al. (2023) ‘Investigating the robustness of the ALIGNRT inboreTM co-calibration process and determining the overall tracking errors’, *Physica Medica*, 108, p. 102567. doi:10.1016/j.ejmp.2023.102567.
- [30] Bellala, Ravishankar et al. (2023) ‘Review of clinical applications and challenges with surface-guided radiation therapy’, *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 19(5), pp. 1160–1169. doi:10.4103/jert.jert_1147_21.
- [31] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=crad+catalyst&filter=simsearch2.ffrft>
- [32] Freislederer, P. et al. (2015) ‘Characteristics of gated treatment using an optical surface imaging and gating system on an ELEKTA LINAC’, *Radiation Oncology*, 10(1). doi:10.1186/s13014-015-0376-x.
- [33] Schönecker, S. et al. (2016) ‘Treatment planning and evaluation of gated radiotherapy in left-sided breast cancer patients using the CATALYSTTM/SENTINELTM system for deep inspiration breath-hold (DIBH)’, *Radiation Oncology*, 11(1). doi:10.1186/s13014-016-0716-5.
- [34] Crop, F. et al. (2016) ‘Surface Imaging, laser positioning or volumetric imaging for breast cancer with nodal involvement treated by Helical Tomotherapy’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 17(5), pp. 200–211. doi:10.1120/jacmp.v17i5.6041.

- [35] Walter, F. et al. (2016) ‘Evaluation of daily patient positioning for radiotherapy with a commercial 3D surface-imaging system (catalyst™)’, *Radiation Oncology*, 11(1). doi:10.1186/s13014-016-0728-1.
- [36] Reitz, D. et al. (2018) ‘Real-time intra-fraction motion management in breast cancer radiotherapy: Analysis of 2028 treatment sessions’, *Radiation Oncology*, 13(1). doi:10.1186/s13014-018-1072-4.
- [37] Carl, G. et al. (2018) ‘Optical surface scanning for patient positioning in radiation therapy: A prospective analysis of 1902 fractions’, *Technology in Cancer Research & Treatment*, 17, p. 153303381880600. doi:10.1177/1533033818806002.
- [38] Kojima, H. et al. (2020) ‘Evaluation of technical performance of optical surface imaging system using conventional and novel stereotactic radiosurgery algorithms’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 22(2), pp. 58–68. doi:10.1002/acm2.13152.
- [39] Swinnen, A.C. et al. (2020) ‘The potential of an optical surface tracking system in non-coplanar single isocenter treatments of multiple brain metastases’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 21(6), pp. 63–72. doi:10.1002/acm2.12866.
- [40] Bry, V. et al. (2021) ‘Quantifying false positional corrections due to facial motion using SGRT with open-face masks’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 22(4), pp. 172–183. doi:10.1002/acm2.13170.
- [41] Kadman, B. et al. (2022a) ‘Accuracy of patient setup positioning using surface-guided radiotherapy with deformable registration in cases of surface deformation’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(3). doi:10.1002/acm2.13493.
- [42] Lehmann, J. et al. (2022) ‘Methodology of thermal drift measurements for surface guided radiation therapy systems and Clinical Impact Assessment Illustrated on the C-rad catalyst+ HD system’, *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology*, 21, pp. 58–63. doi:10.1016/j.tipsro.2022.02.005.
- [43] Bry, V. et al. (2022) ‘End to end comparison of surface-guided imaging versus stereoscopic x-rays for the SRS treatment of multiple metastases with a single isocenter using 3D anthropomorphic gel phantoms’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(5). doi:10.1002/acm2.13576.
- [44] Wolf, J. et al. (2022) ‘Deep inspiration breath-hold radiation therapy in left-sided breast cancer patients: A single-institution retrospective dosimetric analysis of organs at risk doses’, *Strahlentherapie und Onkologie*, 199(4), pp. 379–388. doi:10.1007/s00066-022-01998-z.
- [45] Varian+identify+System+sgrt - search results - pubmed (no date) National Center for Biotechnology Information. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=varian%2Bidentify%2Bsystem%2Bsgrt&filter=simsearch2.ffrft> (Accessed: 26 July 2024).
- [46] Covington, E.L. et al. (2023) ‘Commissioning and clinical evaluation of the identify™ surface imaging system for frameless stereotactic radiosurgery’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 24(10). doi:10.1002/acm2.14058.
- [47] Dekker, J. et al. (2024) ‘Characterization of the identify™ surface scanning system for radiation therapy setup on a closed-bore Linac’, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 25(4). doi:10.1002/acm2.14326.

- [48] Hoisak, J. (2020) ‘chapter 1’, in A history of surface guidance methods in radiation therapy. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. xxviii–xxix.
- [49] Hoisak, J. (2020) ‘chapter 1’, in A history of surface guidance methods in radiation therapy. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. xxxii–xxxiv.
- [50] Waghorn, B. (2020) ‘Chapter 5’, in Technical Overview and Features of the Vision RT AlignRT System. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 96–99.
- [51] Waghorn, B. (2020) ‘Chapter 5’, in Technical Overview and Features of the Vision RT AlignRT System. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 99–103.
- [52] Waghorn, B. (2020) ‘Chapter 5’, in Technical Overview and Features of the Vision RT AlignRT System. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 103–104.
- [53] Waghorn, B. (2020) ‘Chapter 5’, in Technical Overview and Features of the Vision RT AlignRT System. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 107–108.
- [54] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 52–53.
- [55] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 53–57.
- [56] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 57–61.
- [57] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 62–67.
- [58] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 68-70.
- [59] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 74–74.
- [60] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 74–78.
- [61] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 78-78.
- [62] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 78–81.
- [63] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 82-83.

- [64] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 83-88.
- [65] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 88–92.
- [66] Sentinel 4dct - C-rad (2023) C. Available at: <https://c-rad.com/products/sentinel-4d-ct/> (Accessed: 17 September 2024).
- [67] Identify (no date) Home. Available at: <https://www.varian.com/products/radiotherapy/real-time-tracking-motion-management/identify> (Accessed: 17 September 2024).
- [68] Waghorn, B. (2020) ‘Chapter 5’, in Technical Overview and Features of the Vision RT AlignRT System. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 98.
- [69] Browne, M. (2024) UK nice releases Medtech Innovation Briefing for alignrt, Vision RT. Available at: <https://visionrt.com/news/uk-nice-releases-medtech-innovation-briefing-for-alignrt/> (Accessed: 09 October 2024).
- [70] [55] Rasmussen, K., Papanikolaou, N. and Bry, Vi. (2020) ‘Chapter 3’, in Technical Overview and Features of the C-RAD Catalyst and Sentinel Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 53–54.
- [71] Schulz, R. et al. (2020) ‘Chapter 4’, in Technical Overview and Features of the IDENTIFY Systems. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 88
- [72] (No date) Prisma Flow Diagram. Available at: https://estech.shinyapps.io/prisma_flowdiagram/ (Accessed: 09 October 2024).