3° Πανελλήνιο Συνέδριο
Ιατρικής Φυσικής

27° Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο
Ακτινολογίας

Ραδιοβιολογική αξιολόγηση και σύγκριση πρωτοκόλλων δόσης και ακτινοθεραπευτικών τεχνικών Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) και Three-Dimensional Conformal Radiation Therapy (3D-CRT) στον καρκίνο του μαστού

Λ. Σδούκου, Ε. Τζίμα, Σ. Νικολούδη, Π. Καραΐσκος, Λ. Αστρακάς, Δ. Εμφιετζόγλου

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

30, 31 ΟΚΤ + 1 ΝΟΕ
2026

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
- ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ, ΛΑΡΙΣΑ

Οργάνωση

ΕΦΙΕ
Ένωση Φυσικών Ιατρικής Ελλάδος

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΟΛΛΕΓΙΟ ΑΚΤΙΝΟΛΟΓΙΑΣ

Εισαγωγή

- **Εξωτερική ακτινοθεραπεία** μετά από χειρουργική επέμβαση → μείωση της πιθανότητας υποτροπής
- **Στόχος Ακτινοθεραπείας:** βελτιστοποίηση του θεραπευτικού λόγου
  - μέγιστη δόση στον όγκο-στόχο (PTV)
  - ελάχιστη δόση στους υγιείς παρακείμενους ιστούς (OARs)

3D-CRT *3-Dimensional Conformal Radiation Therapy*

- **Εφαπτομενικά πεδία** ομοιόμορφης έντασης
- **Γεωμετρική προσαρμογή** του πεδίου στον όγκο-στόχο

VMAT *Volumetric Modulated Arc Therapy*

- **Πολλαπλά πεδία διαμορφούμενης έντασης** σε τόξα
- Ταυτόχρονη μεταβολή εύρος και ταχύτητα περιστροφής του gantry, ρυθμού δόσης & φύλλων MLC

Σκοπός: Ραδιοβιολογική αξιολόγηση πλάνων ακτινοθεραπείας σε ασθενείς με καρκίνο του αριστερού μαστού, μέσω ραδιοβιολογικών παραμέτρων και του δείκτη ποιότητας P_+

- **Επίδραση Κλασματοποίησης:** VMAT συμβατικό (50 Gy / 25 συνεδρίες) vs υποκλασματοποιημένο (42 Gy / 16 συνεδρίες)
- **Επίδραση Τεχνικής:** VMAT vs 3D-CRT για συμβατικό πρωτόκολλο (50 Gy / 25 συνεδρίες)

Μέθοδοι & Υλικά

Κλινικό πλαίσιο

- **7 ασθενείς** με καρκίνο του αριστερού μαστού, μετεγχειρητική ακτινοθεραπεία (ογκεκτομή)
- **21 πλάνα θεραπείας (3 πλάνα / ασθενή):**
  - Υποκλασματοποιημένο VMAT (42 Gy / 16)
  - Συμβατικό VMAT (50 Gy / 25)
  - Συμβατικό 3D-CRT (50 Gy / 25)
- **Δομές:** PTV αριστερού μαστού · OARs: καρδιά, αριστερός & δεξιός πνεύμονας

Δομή	α/β (Gy)	a	α (Gy^{-1})	TCD_{50}/TD_{50} (Gy)	γ_{50}	m
PTV	3	−7.2	0.070	28	2	–
Καρδιά	2.5	2.86	0.058	48	3	0.10
Πνεύμονας	4	1	0.035	24.5	2	0.18

Ραδιοβιολογικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα

EQD2 υποκλασματοποιημένο (42 Gy / 16)
Η δόση κάθε υπο-όγκου ανάγεται σε κλάσματα 2 Gy πριν τον υπολογισμό EUD / gEUD

$$EQD2_i = D_i \cdot \frac{d_i + \alpha/\beta}{2 + \alpha/\beta}$$

Ραδιοβιολογικά μοντέλα

Ισοδύναμη Ομοιόμορφη Δόση (EUD): *(υποκλασματοποίηση: $D_i \rightarrow EQD2_i$)*

$$EUD = \left(\sum_i v_i {D_i}^a\right)^{1/a}$$

Για τα OARs: **gEUD** (γενικευμένη EUD)

Βιολογικά Δραστική Δόση (BED):

$$BED_i = D_i\left(1 + \frac{d_i}{\alpha/\beta}\right)$$

Ισοδύναμη Ομοιόμορφη Βιολογικά Δραστική Δόση (EUBED):

$$EUBED = -\frac{1}{\alpha}\ln\sum_{i=1}^{N} v_i e^{-\alpha BED_i}$$

Για τα OARs: **gEUBED** (γενικευμένη EUBED)

TCP — *Πιθανότητα ελέγχου του όγκου: μηδενική επιβίωση κλωνογόνων κυττάρων μετά τη θεραπεία*

- **Linear-Poisson:** επιζώντα κύτταρα κατά Poisson, εκθετική μείωση με τη δόση
- **Logistic:** σιγμοειδής καμπύλη, βάσει EUD / EUBED

NTCP — *Πιθανότητα εμφάνισης ανεπιθύμητης επιπλοκής σε υγιή ιστό*

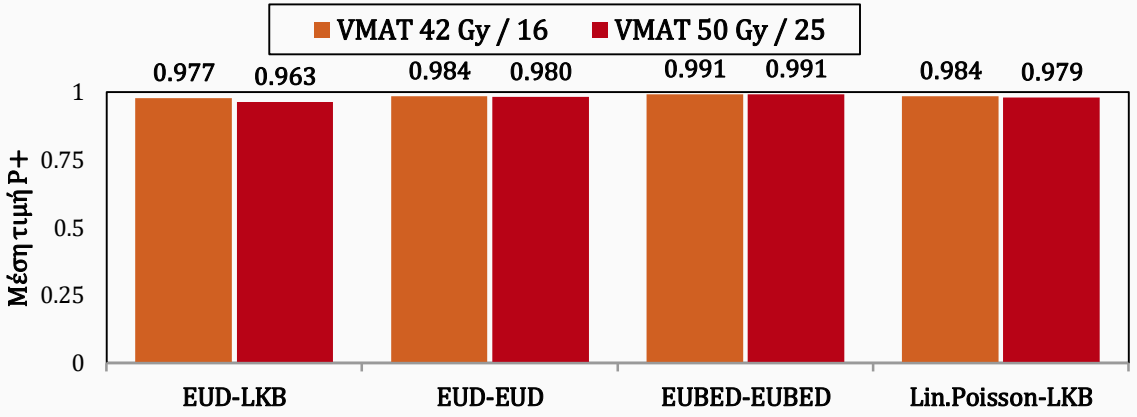
- **LKB:** βασίζεται σε κατανομές δόσης–όγκου (gEUD), με παραμέτρους TD_{50} και m
- **Logistic:** σιγμοειδής καμπύλη, βάσει gEUD / gEUBED

Συνολική αξιολόγηση πλάνων: πιθανότητα ελέγχου όγκου χωρίς επιπλοκές P_+

$$P_+ = TCP \cdot \prod_{i=1}^{3}(1 - NTCP_i)$$

Αποτελέσματα

Επίδραση κλασματοποίησης (VMAT)



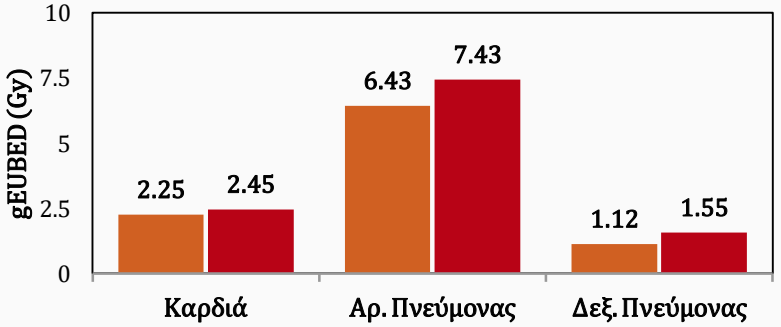
PTV EUBED (Gy)

42 Gy

84.3 ± 3.9

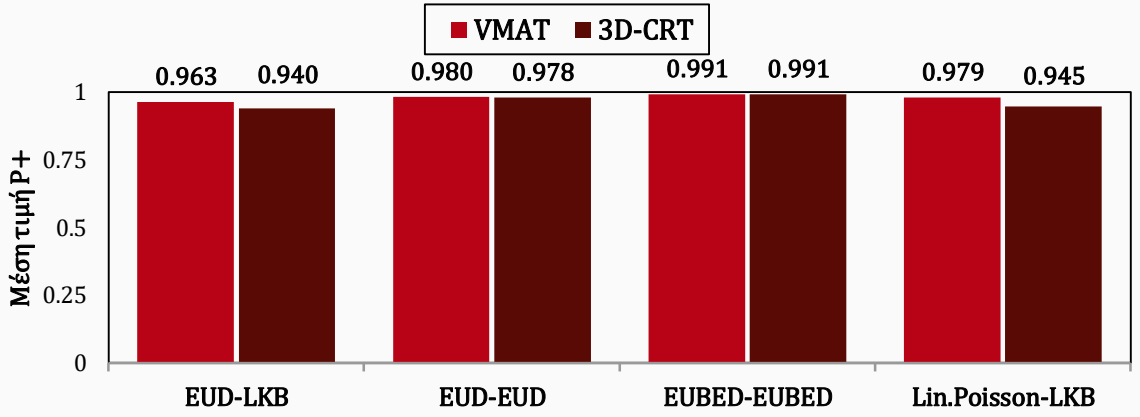
50 Gy

84.8 ± 1.6



Ισοδύναμη P_+ (≥ 0.96) και EUBED στο PTV, **χαμηλότερη gEUBED σε όλα τα OARs με 42 Gy**

Επίδραση τεχνικής (50 Gy / 25)



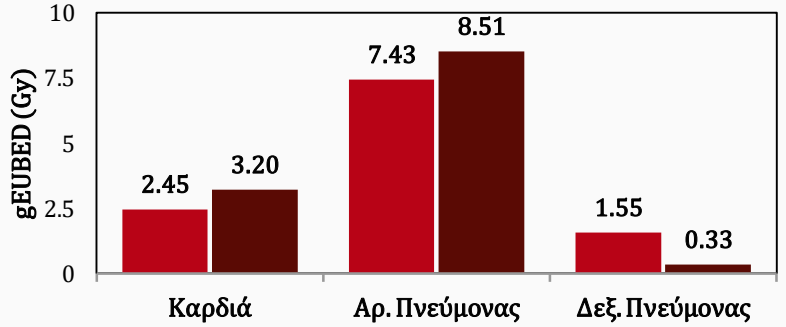
PTV EUBED (Gy)

VMAT

84.8 ± 1.6

3D-CRT

84.4 ± 0.7



Υψηλότερη P_+ με VMAT σε EUD-LKB & Lin.Poisson-LKB, ισοδύναμη EUBED στο PTV, **χαμηλότερη gEUBED καρδιάς & αρ. πνεύμονα με VMAT**

Συμπεράσματα

Κλασματοποίηση (VMAT: 42 Gy vs 50 Gy)

- **Ισοδύναμος τοπικός έλεγχος:** Κλινικά ισοδύναμη κάλυψη του PTV (TCP > 98%)
- **Ισοδύναμη EUBED στο PTV** (84.3 vs 84.8 Gy)
- **Προστασία OARs:**
  - Χαμηλότερη gEUBED σε όλα τα OARs με το υποκλασματοποιημένο σχήμα
  - Χαμηλό NTCP για όλα τα OARs
- **Ισοδύναμες τιμές P_+**

Συμπέρασμα: Το υποκλασματοποιημένο VMAT (42 Gy / 16) προσφέρει ισοδύναμη P_+ και EUBED στο PTV με το συμβατικό, με χαμηλότερη gEUBED σε όλα τα OARs

Τεχνική (50 Gy: VMAT vs 3D-CRT)

- **Ισοδύναμος τοπικός έλεγχος :** Ισοδυναμία TCP μεταξύ των δύο τεχνικών
- **Ισοδύναμη EUBED στο PTV** (84.8 vs 84.4 Gy)
- **Προστασία OARs:**
  - Χαμηλότερη gEUBED στην καρδιά και στον αριστερό πνεύμονα με τεχνική VMAT
  - Χαμηλότερη gEUBED στον δεξιό πνεύμονα με τεχνική 3D-CRT
  - Υψηλό NTCP στον αριστερό πνεύμονα με τεχνική 3D-CRT
- **Υψηλότερη τιμή της P_+** με τεχνική VMAT

Συμπέρασμα: Στα 50 Gy, το VMAT προσφέρει υψηλότερη P_+ από το 3D-CRT, ισοδύναμη EUBED στο PTV και καλύτερη προστασία καρδιάς & αριστερού πνεύμονα

Βιβλιογραφία

[1] Niemierko A. Reporting and analyzing dose distributions: A concept of equivalent uniform dose. *Med Phys*. 1997;24(1):103–110.

[2] Li XA, Alber M, Deasy JO, Jackson A, Jee KW, Marks LB, Martel MK, Mayo C, Moiseenko V, Nahum AE, Niemierko A, Semenenko VA, Yorke ED. The use and QA of biologically related models for treatment planning: Report of AAPM Task Group 166. *AAPM Report No. 166*. American Association of Physicists in Medicine; 2012. (Short report: *Med Phys*. 2012;39(3):1386–1409.)

[3] Lind BK, Mavroidis P, Hyödynmaa S, Kappas C. Optimization of the dose level for a given treatment plan to maximize the complication-free tumor cure. *Acta Oncol*. 1999;38(6):787–798.

[4] Shirani Tak Abi K, Habibian S, Salimi M, Shakeri A, Mojahed MM, Gharaati H. Tumor control probability (TCP) and normal tissue complication probability (NTCP) in mono and dual-isocentric techniques of breast cancer radiation therapy. *Arch Breast Cancer*. 2021;8(3):192–202.

[5] Kazemzadeh A, Abedi I, Amouheidari A, Shirvany A. A radiobiological comparison of hypo-fractionation versus conventional fractionation for breast cancer 3D-conformal radiation therapy. *Rep Pract Oncol Radiother*. 2021;26(1):86–92.

[6] Srivastava AK, Mishra A, Manna S, Yadav N, Mittal KK, Mishra SP. Evaluation of tumor control probability and normal tissue complication probability in IMRT and VMAT: A comparative study for assessment of efficacy of radiotherapy plans in tumors of the thorax. *J Cancer Res Ther*. 2025;21:131–136.