3° Πανελλήνιο Συνέδριο
Ιατρικής Φυσικής

27° Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο
Ακτινολογίας

ΒΙΟΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΒΑΣΕΙ ΔΙΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑΤΩΝ: Δημιουργία και επαλήθευση καμπύλης αναφοράς για ακτίνες-Χ από LINAC 6MV

Α. Τσελίκα[1,2], Σ.Τριαντοπούλου[2], Α.Γκικούδη[1,2], Μ.Ι. Μαργαρίτη[2], Δ. Παντελιά[2], Π. Διαμαντοπούλου[2], Β. Ξυνού[2], Ι.Μ. Κοκκάρης[1,2], Ι. Τζακάκος[1,2], Α. Γ. Γεωργακίλας[1], Γ. Ι. Τερζούδη[2]

[1]Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΣΕΜΦΕ, Εργαστήριο Βλαβών DNA, Τομέας Φυσικής, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα, Ελλάδα

[2]Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος», Ινστιτούτο Πυρηνικών & Ραδιολογικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ενέργειας & Ασφάλειας, Εργαστήριο Υγειοφυσικής, Ραδιοβιολογίας & Κυτταρογενετικής, Αγία Παρασκευή, Αθήνα, Ελλάδα

30, 31 ΟΚΤ + 1 ΝΟΕ
2026

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
- ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ, ΛΑΡΙΣΑ

Οργάνωση

ΕΦΙΕ
Ένωση Φυσικών Ιατρικής Ελλάδος

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΟΛΛΕΓΙΟ ΑΚΤΙΝΟΛΟΓΙΑΣ

Εισαγωγή

- Τα ραδιολογικά και πυρηνικά ατυχήματα απαιτούν την **έγκαιρη και ακριβή εκτίμηση απορροφημένης δόσης** ιοντίζουσας ακτινοβολίας με σκοπό την **αξιόπιστη κατηγοριοποίηση** για την **άμεση ιατρική διαχείριση** των εκτιθέμενων όπου είναι απαραίτητη.

- Η **ανάλυση δικεντρικών χρωμοσωμάτων** και η χρήση πρότυπων καμπυλών αναφοράς δόσης-απόκρισης αποτελεί **"gold standard"** της βιολογικής δοσιμετρίας.

- **Προϋπόθεση** για τη **διασφάλιση ετοιμότητας και αξιοπιστίας** των αποτελεσμάτων βιοδοσιμετρίας μεταξύ των διαφορετικών εργαστηρίων αποτελεί η **διεξαγωγή συστηματικών διεργαστηριακών συγκρίσεων**.

- **Αφορμή** της παρούσας εργασίας αποτελεί η **συμμετοχή** του Εργαστηρίου Υγειοφυσικής, Ραδιοβιολογίας & Κυτταρογενετικής (ΕΥΡΚ) του **Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος** σε μια **ευρωπαϊκή διεργαστηριακή σύγκριση** υπό το συντονισμό του δικτύου **RENEB** (Running the European Network of Biological and Retrospective Physical Dosimetry)

- **Σκοπός** της είναι η **δημιουργία** και η **επαλήθευση** μιας **νέας πρότυπης καμπύλης αναφοράς** για **6MV LINAC ακτίνων-Χ** για χρήση σε περιπτώσεις υπερεκθέσεων κατά την **ακτινοθεραπεία**.

Μέθοδοι & Υλικά

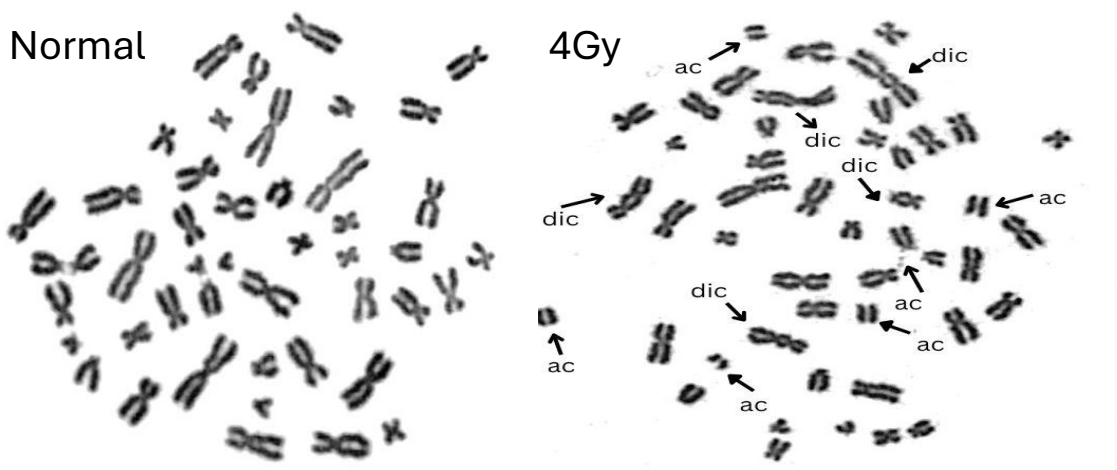
Ακτινοβόληση δειγμάτων περιφερικού αίματος υγιούς δότη με **ακτίνες-Χ από LINAC 6MV** ρυθμού δόσης **0.5 Gy/min** στο ASNR της Γαλλίας. Οι δόσεις κυμαίνονταν από **0-4Gy**.

- Καλλιέργεια **λεμφοκυττάρων περιφερικού αίματος.**
- Ανάλυση **~2000 μεταφάσεων για δόσεις**<1Gy και **~500 μεταφάσεων για δόσεις** >1Gy.
- Καταγραφή **δικεντρικών χρωμοσωμάτων**.

Προσομοίωση Monte Carlo για τη **συσχέτιση επαγόμενων βλαβών DSBs** και των **χρωμοσωματικών αλλοιώσεων** μέσω του λογισμικού MCDS. (Monte Carlo Damage Simulation)



Εικόνα 1. Διάταξη ακτινοβόλησης δειγμάτων.



Εικόνα 2. Φυσιολογική μετάφαση (αριστερά) και μετάφαση 4Gy με 5 δικεντρικά χρωμοσώματα συνοδευόμενα από ακεντρικά θραύσματα (δεξιά).

```
!!SAMPLE MCDS INPUT FILE (6 keV electron

SIMCON: nocs=10000 seed=987654321
CELL: DNA=1  ndia=5 cdia=10
EVO2: pO2=20.0
RADX: par=e ke=0.006
```

Εικόνα 3. Ενδεικτικό input file στο MCDS. https://faculty.washington.edu/trawets/mcds/ver201/index.html

Αποτελέσματα

- **Κατασκευή καμπύλης** μέσω προσαρμογής της δόσης-απόκρισης στο **γραμμικό–τετραγωνικό μοντέλο** με χρήση του λογισμικού **BioDose Tools**

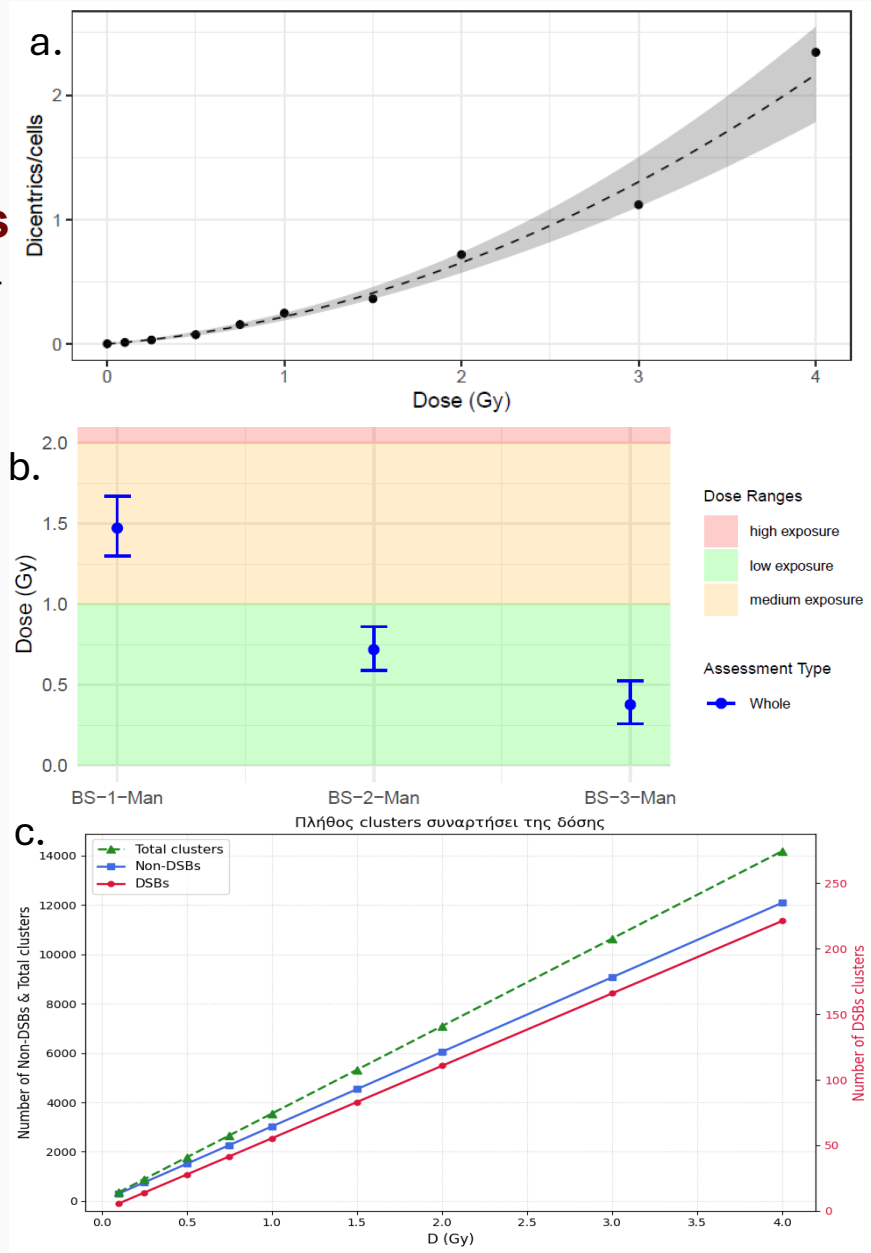
$$Y = \left(3.391 \cdot 10^{-3} \pm 2.538\ 10^{-3}\right) + \left(1.112 \cdot 10^{-1} \pm 1.700 \cdot 10^{-2}\ Gy^{-1}\right)D + \left(1.074 \cdot 10^{-1} \pm 1.133 \cdot 10^{-2} Gy^{-2}\right)D^2.$$

Οι τιμές των p-values είναι $p = 2.232 \cdot 10^{-1}, p = 3.221 \cdot 10^{-4}$, $p = 3.032 \cdot 10^{-5}$, αντίστοιχα.

- **Επαλήθευση καμπύλης** μέσω εκτίμησης δόσης των τριών δειγμάτων άγνωστης δόσης με,

$D_1 = 1.47Gy\ (1.30 - 1.67)$,
$D_2 = 0.72Gy(0.59 - 0.86)\ και$
$D_3 = 0.38Gy(0.26 - 0.52)$ (83% CI).

- Παρατήρηση **γραμμικής αύξησης πλήθους DSB, non-DSB και total cluster** με την **αύξηση της δόσης.**



Εικόνα 4.
a. Η καμπύλη δικεντρικών ανά κύτταρο συναρτήσει της δόσης.
b. Οι εκτιμώμενες δόσεις των δειγμάτων άγνωστης δόσης σε κλίμακα κρισιμότητας.
c.Το πλήθος των DSB, non-DSB και total clusters συναρτήσει της δόσης.

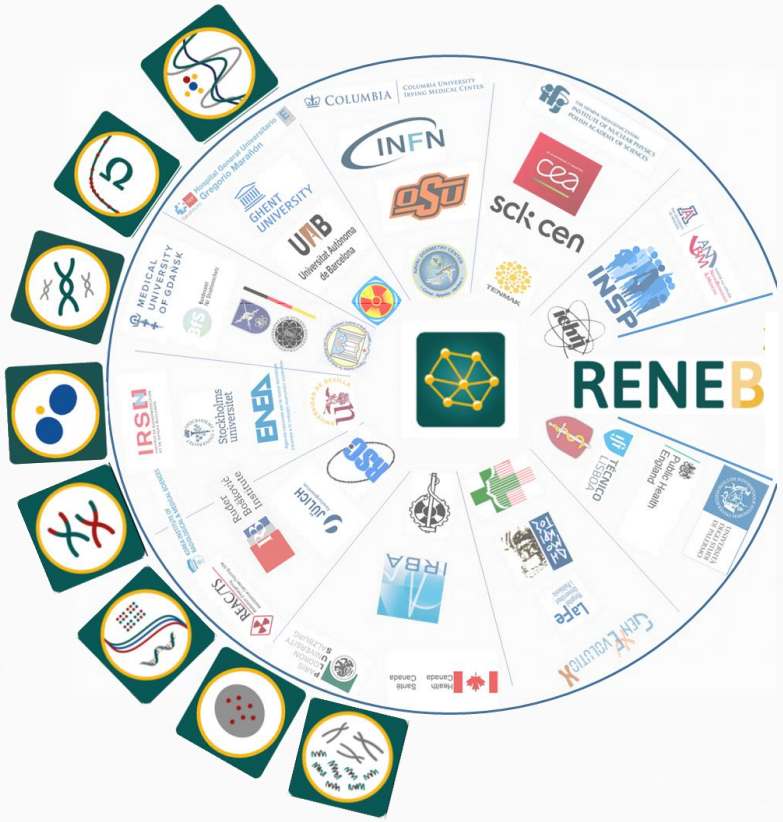
Συμπεράσματα

- **Κατασκευή** καμπύλης αναφοράς δόσης-απόκρισης από το Εργαστήριο Υγειοφυσικής, Ραδιοβιολογίας & Κυτταρογενετικής (ΕΥΡΚ) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος για τη συμμετοχή του σε **ευρωπαϊκή διεργαστηριακή σύγκριση** υπό το συντονισμό του δικτύου **RENEB**.

- **Επαλήθευση** της καμπύλης αναφοράς μέσω εκτίμησης δόσης **τριών δειγμάτων άγνωστης δόσης**. Προέκυψε **σύμπτωση** της **αναφερόμενης δόσης** από το ASNR με την **εκτιμώμενη δόση**.

- **Επομένως**, το εργαστήριο **ΕΥΡΚ του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος»** κρίθηκε **αξιόπιστο** για την εκτίμηση της απορροφημένης δόσης ακτινοβολίας σε **περιπτώσεις υπερεκθέσεων στην ακτινοθεραπεία** με χρήση **6MV LINAC ακτίνων-Χ.**

- **Συσχέτιση αύξησης πλήθους cluster** με την **αύξηση της συχνότητας εμφάνισης χρωμοσωματικών αλλοιώσεων** μέσω προσομοίωσης Monte Carlo.



Εικόνα 5. Τα εργαστήρια που συγκροτούν το δίκτυο RENEB και οι μέθοδοι δοσιμετρίας που πραγματοποιούνται σε αυτά.

Βιβλιογραφία

- Sarah Baatout, *Radiobiology Textbook*, Springer, 2023.
- Günter Obe and Vijayalaxmi, *Chromosomal Alterations:Methods, Results and Importance in Human Health*, Springer, 2007.
- Wilkins Ruth et al, *Activities of ISO Working Group 18: Biological and Physical Retrospective Dosimetry,* Disaster Medicine and Public Health Preparedness, vol. 19, pp. 1-11, 2025.
- International Atomic Energy Agency, *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*, Tech. rep. Vienna: IAEA, 2011.
- Kulka U. et al., *REALISING THE EUROPEAN NETWORK OF BIODOSIMETRY (RENEB),* Radiation Protection Dosimetry, vol. 151,pp.621-625, 2012.
- Gregoire E. et al., *RENEB Inter-Laboratory comparison 2017: limits and pitfalls of ILCs,* International Journal of Radiation Biology, vol. 97, pp. 888-905, 2021.