

קרינה מושמעת שלא בצדק: מדוע יש לנטוש את המודל הליניארי ללא סף

קרינה מייננת מוצגת לעיתים קרובות כסכנה בלתי נראית, מעוצבת על ידי אירועים היסטוריים קודרים כמו הירושימה, צ'רנוביל ופוקושימה. פחד זה מועצם על ידי **המודל הליניארי ללא סף (LNT)**, שמניח שכל מינון של קרינה – לא משנה כמה קטן – מגביר את הסיכון לסרטן באופן יחסי. מודל זה מנחה את המדיניות הרגולטורית ברחבי העולם, קובע מגבלות חשיפה מחמירות ומעורר חרדה ציבורית נרחבת.

עם זאת, עדויות מדעיות הולכות וגדלות מצביעות על כך שהמודל LNT אינו רק פשטני מדי – הוא שגוי מבחינה מדעית. למערכות הביולוגיות יש מנגנוני הגנה חזקים נגד קרינה במינון נמוך, ובמקרים רבים, חשיפה כזו עשויה אפילו להיות מועילה. מאזורים טבעיים עם קרינה גבוהה ועד לשימושים רפואיים היסטוריים ומחקרים מבוקרים במעבדה, המציאות ברורה: הקרינה הושמעה שלא בצדק, ויש לנטוש את המודל LNT לטובת מודל שמשקף מנגנוני תיקון ביולוגיים ותגובות הסתגלותיות.

פגמים במודל LNT

המודל LNT מקורו בנתונים על ניצולים מחשיפה למינונים גבוהים – בעיקר קורבנות פצצת האטום – שבהם הסיכון לסרטן עלה במינונים הרבה מעל 1,000 מיליסיוורט (mSv). המודל משליך את ההשפעות של מינונים גבוהים באופן ליניארי עד למינונים כמעט אפסיים, תוך הנחה שאין סף מתחתיו הקרינה אינה מזיקה. לפי לוגיקה זו, אפילו עמידה ליד משטח גרניט או ביצוע צילום רנטגן בודד טומנים בחובם סיכון.

אולם, הנחה זו מתמוטטת תחת בחינה מדוקדקת. **מינונים מתחת ל-100 mSv**, במיוחד כאשר הם מפוזרים לאורך זמן, מראים מעט עד לא נזק ניתן למדידה במחקרים. המודל LNT אינו לוקח בחשבון את **הטבע הלא ליניארי של מערכות ביולוגיות**, כולל מנגנוני תיקון DNA מתוחכמים שהתפתחו להתמודד עם נזקים יומיומיים הנגרמים מקרינת רקע טבעית ולחץ חמצוני.

קרינת הרקע הטבעית משתנה באופן משמעותי ברחבי העולם. באזורים עם קרינה גבוהה כמו **רמסר, איראן (300-30,000 nSv/h)**, **גוארפארי, ברזיל (800-90,000 nSv/h)** ו**וקרלה, הודו (446-3,000 nSv/h)**, אנשים חיים את כל חייהם בקצב מינונים גבוה פי כמה מהמוצע העולמי של **270 nSv/h** – ובכל זאת, **לא נצפתה עלייה עקבית בשיעורי הסרטן**. זה מערער את הרעיון שכל קרינה מסוכנת, ומצביע על כך שחשיפות למינונים נמוכים עשויות להיות ניטרליות או אפילו מועילות.

הורמזיס קרינה: פרספקטיבה טובה יותר

השערת ההורמזיס מציעה שמינונים נמוכים של קרינה מייננת (בדרך כלל מתחת ל-100 mSv בסך הכל, או בטווח של **10-100,000 nSv/h**) יכולים לעורר תגובות ביולוגיות הסתגלותיות שהופכות את התאים לעמידים יותר. אלה כוללים תיקון DNA משופר, ייצור מוגבר של נוגדי חמצון כמו **סופרוקסיד דיסמוטאז**, ושיפור במעקב חיסוני.

מחקרים במעבדה תומכים בנקודת מבט זו. תאים שנחשפו לקרינה במינון נמוך לעיתים קרובות מגבירים את ייצור חלבוני התיקון ומסירים רכיבים פגומים ביעילות רבה יותר. ניסויים בבעלי חיים הראו שחולדות שנחשפו לקרינת רקע נמוכה לפעמים חיות זמן רב יותר ומפתחות פחות גידולים מקבוצות הביקורת.

ראיות היסטוריות תואמות גם להורמזיס. במקומות כמו **גסטיינר היילשטולן באוסטריה**, אנשים מבקרים במעיינות תרמיים עשירים ברדון עם קצב מינונים של כ-**10,000-100,000 nSv/h** לטיפול במצבים דלקתיים כמו דלקת מפרקים. למרות שהמנגנון לא הובן במשך מאות שנים, טיפולים אלה לעיתים קרובות מפחיתים כאב ודלקת – התואם לאימונומודולציה המושרית על ידי קרינה.

כמובן, **אף אחד לא חי במשרה מלאה בספא רדון או על החוף בגוארפארי**. אבל זה בדיוק העניין: קצב מינונים גבוה לתקופות קצרות לעיתים קרובות לא מייצר **נזק ניתן למדידה**, ועשוי להניב **יתרונות טיפוליים** – סתירה ישירה למודל LNT.

אנלוגיית השיזוף: השוואה הגיונית

הציבור מקבל חשיפה מתונה לשמש כדבר נורמלי, אפילו בריא, למרות שקרינה אולטרה-סגולה (UV) היא מסרטן ידוע. מדוע? כי אנו מבינים שהגוף מגיב לאור השמש על ידי ייצור **מלנין**, המגן מפני נזקי UV נוספים. אנשים מקבלים את הסיכון **לסרטן העור** בתמורה ל**ויטמין D** ויתרונות אחרים של השמש – כל עוד החשיפה סבירה.

קרינה מייננת דומה באופן יסודי. בקצב מינונים נמוך, הגוף **מסתגל**, מפעיל מנגנוני תיקון כדי לנטרל נזקים. עם זאת, המודל LNT מתעקש שכל קרינה מייננת מסוכנת, ומזין את הפחד מחשיפות זניחות: **סריקת CT (~2-10 mSv)**, **טיסה טרנס-יבשתית (2,000-15,000 nSv/h)**, או מגורים ליד תחנת כוח גרעינית. פחדים אלה נמשכים למרות שחשיפות כאלה דומות – או נמוכות יותר – מרמות הרקע הטבעיות בחלקים רבים של העולם.

מדוע יש להחליף את המודל LNT

ישנן חמש סיבות מרכזיות לנטישת המודל LNT:

1. חוסר ראיות לנזק במינונים נמוכים

מחקרים באזורים עם קרינת רקע גבוהה לא מראים קשר עקבי בין קרינה טבעית מוגברת (לעיתים עשרות אלפי nSv/h) ועלייה בשיעורי הסרטן. ממצאים אלה סותרים ישירות את תחזיות ה-LNT.

2. התעלמות מהסתגלות ביולוגית

המודל LNT מתייחס לגוף כאל פסיבי. במציאות, קרינה במינון נמוך מפעילה תיקון DNA, הגנות נוגדות חמצון ותהליכי ניקוי תאים – תגובות מגנות שהמודל מתעלם מהן לחלוטין.

3. הפחד מקרינה לא מידתי

המודל מגביר את החרדה הציבורית בנוגע לחשיפות לא מזיקות או מועילות, מה שמוביל אנשים לסרב לבדיקות הדמיה רפואיות או להיכנס לפאניקה בגלל פליטות זעירות ממפעלים גרעיניים – תגובות לא רציונליות המבוססות על מידע שגוי.

4. הגזמה רגולטורית יקרה

מדיניות מבוססת LNT דורשות מיגון מוגזם, מגבלות חשיפה נמוכות ביותר ותקני ניקוי יקרים. לאחר התאונה בפוקושימה, אלפים פונו מאזורים שבהם קצב המינון היה נמוך מ-**10,000 nSv/h**, מה שהוביל למותם של אנשים כתוצאה ממתח, לא ממחלת קרינה. האיזון בין עלות לתועלת של תקנות אלה לקוי מאוד.

5. קיימות חלופות טובות יותר

מודל סף, שמניח שאין נזק מתחת למינון מסוים (למשל, 100 mSv), או **מודל הורמטי**, שמכיר

ביתרונות האפשריים של חשיפה למינון נמוך, ישקף טוב יותר את המציאות הביולוגית ואת הראיות המדעיות.

גישה רציונלית לקרינה

החלפת המודל LNT אינה אומרת זלזול בסכנות האמיתיות של קרינה במינונים גבוהים. מינונים מעל **1,000 mSv** הם ללא ספק מזיקים וחייבים להיות נתונים לבקרה מחמירה. אך אימוץ מודל מדויק יותר יאפשר:

- **שימוש רפואי חכם יותר:** חולים ורופאים יוכלו להשתמש בהדמיה או טיפולי קרינה במינון נמוך בביטחון ללא חשש בלתי מבוסס.
- **רגולציה מאוזנת:** מדיניות יכולה לתעדף חשיפות מסוכנות באמת, תוך הפחתת הנטל הכלכלי על שירותי הבריאות והתעשייה הגרעינית.
- **הבנה ציבורית:** הכרה בקרינה כחלק טבעי מהסביבה שלנו – כמו אור השמש – תפחית את הפחד הלא רציונלי ותאפשר קבלת החלטות מושכלות.

מענה למבקרים

חלק טוענים כי המודל LNT הוא הבטוח ביותר משום שהשפעות של מינונים נמוכים קשות למדידה. הם מצטטים מחקרים על עובדי תעשייה גרעינית עם סיכון מוגבר מעט לסרטן סביב **50 mSv**, אך מחקרים אלה סובלים לעיתים ממשתנים מבלבלים – כמו עישון, עבודה במשמרות או מתח – שקשה לבדד. בינתיים, נתונים בקנה מידה גדול מאזורים עם קרינה גבוהה ומחקרים מעבדתיים מבוקרים היטב מצביעים על **סיכון נמוך או ללא סיכון**, ולעיתים על **השפעות חיוביות** מחשיפה לקרינה במינון נמוך.

שמירה על המודל LNT מתוך הרגל או זהירות אינה זהירות מדעית – זו **אינרציה רגולטורית**. היא מזינה פחד, מונעת חדשנות ומסיטה משאבים מסיכונים בריאותיים דחופים יותר.

מסקנה

המודל הליניארי ללא סף מפשט יתר על המידה את הביולוגיה של הקרינה ומקדם פחד בלתי מוצדק. הראיות מאזורים עם קרינה גבוהה, ביולוגיה ניסיונית ושימוש טיפולי היסטורי מראות בבירור כי **קרינה במינון נמוך אינה מסוכנת מטבעה** – ואף עשויה להיות מועילה. כמו אור השמש, לקרינה המייננת יש סיכונים ויתרונות, והמדיניות שלנו צריכה לשקף את הניואנס הזה.

על ידי נטישת המודל LNT לטובת **מודל סף או הורמטי**, נוכל ליצור מסגרת רציונלית יותר לשימוש בקרינה ברפואה, בתעשייה ובאנרגיה. זה יוביל ל**רגולציות יעילות יותר, עלויות נמוכות יותר וציבור מושכל יותר**. הקרינה אינה האויב – זו כוח טבעי שאנו יכולים להבין, להסתגל אליו ולהשתמש בו בחוכמה.