

ד"ר יהושע סוקול

איום גרעיני בהיבט מעשי



פורום אקדמאים
למודעות גרעינית

ירושלים תשפ"ו (2026)

ד"ר יהושע סוקול

איום גרעיני בהיבט מעשי
מהדורה שישית, מתוקנת
תשפ"ו 2026

בעטיפה : הירושימה בשנת 2006

תצלום : מייק קולס www.MikeColes.net

פורום אקדמאים למודעות גרעינית www.AFNA-forum.org

המרכז האקדמי לב www.jct.ac.il

רח' הוועד הלאומי 21, ירושלים

טלפון 02-675-1257

© יהושע סוקול

ניתן להשתמש לכל מטרה הוגנת

במרשתת : www.AFNA-forum.org/nucl_h.pdf

ב"ה

חוברת זו מוקדשת לזכרם של שני יהודים

יעקב סוקול (תרכס"ט–תש"ן), סבי שלמדתי ממנו הרבה, הקדיש את חייו הארוכים לקדמה אשר אמורה לעשות את האנושות מאושרת יותר. בשנות מלחמת העולם השנייה בהיותו מנהל מפעל למתכות בצ'לביִנְסְק, ברה"מ, הוא נטל חלק פעיל במלחמה נגד הרע אשר סיכן אז את האנושות.

עידו זולדן (תשל"ח–תשס"ח), שכני שלא זכיתי להכירו, הקדיש את חייו הקצרים לארץ ישראל. בימי סיום העבודה על המהדורה הראשונה של החוברת הזאת הוא נהרג על ידי מחבלים בשומרון. הוא נפל בקרב נגד הרע אשר מסכן את האנושות עתה.

בְּקִרְבֵי אֶקְדָּשׁ



אלה שמות הגיבורים ממחלקה בגדוד המילואים 8208 אשר עלו בסערה
השמימה ביום י"ב בשבט תשפ"ד

דניאל קאסאו זגייה	ניר בנימין
יואב לוי	אחמד אבו-לטיף
ישראל סוקול	שי ביטון חיון
אלקנה יהודה ספז	ניקולס ברגר
שגיא עידן	סרגיי גונטמכר
מארק קונונוביץ'	סְדְרִיק גְרִין
הדר קפלוק	אלקנה ויזל



ואלה שמות הגיבורים בני קרני שומרון שבנחלת מנשה אשר עלו בסערה
השמימה במהלך מלחמת המקדש

י"ט במרחשון תשפ"ד	ידידיה אליהו
כ' בטבת תשפ"ד	עמיחי ישראל יהושע אוסטר
י"ב בשבט תשפ"ד	ישראל סוקול
י"ב בשבט תשפ"ד	אדם ביסמוט
ז' באייר תשפ"ד	גילעד אריה בויס
ד' בסיון תשפ"ד	יאיר לוי
ט' בסיון תשפ"ד	יאיר רויטמן
כ"ו בסיון תשפ"ד	נדב נולר
כ"ד בתשרי תשפ"ה	שאול מויאל
ו' בטבת תשפ"ה	אלעד וינקלשטיין

ב-1938 כולנו חשבנו על תקיפות אוויריות כמו שעכשיו חושבים על מלחמה גרעינית.

הרולד מקמילן, ראש ממשלת בריטניה בשנים 1957-1963

אין בחיים שום דבר שצריך לפחד ממנו. כל דבר בחיים צריך להבין. עלינו להבין יותר כדי לפחד פחות.
מרי קירי, כלת שני פרסי נובל (לפיזיקה ולכימיה)

הגנה אזרחית לא תמנע את סכנת המלחמה הגרעינית. אך היא תקטין משמעותית את ההסתברות שהמלחמה תפרוץ.
אדוארד טלר, אבי פצצת המימן

כאשר היטלר הפציץ את לונדון לראשונה, הפניקה גרמה הרבה יותר אבידות מאשר הפצצות עצמן. כאשר השתחררו תושבי לונדון מהפחדים המוגזמים, החיים חזרו למסלולם במידה רבה. וזה מה שיהיה במקרה של התקפת טרור גרעינית.
קרסון קירני, יועץ ממשלת ארה"ב

תוכן העניינים

7	הקדמות
12	תקציר
14	60 שניות של הדרכה
14	להתמודדות עם התקפה גרעינית
15	1. עקרונות מדעיים
15	1.1 מושגי יסוד בפיזיקה גרעינית
17	1.2 נשק גרעיני ומאפייני הפיצוץ הגרעיני
19	1.3 קרינה גרעינית חזקה (מינון גבוה)
20	1.4 קרינה גרעינית במינון נמוך : מיתוסים ועובדות
23	1.5 הנשק הרדיולוגי (פצצה מלוכלכת)
25	2. נתונים בסיסיים על הנשק הגרעיני ותולדותיו
31	3. התפשטות הנשק הגרעיני והיבטים אסטרטגיים
34	4. השלכות הנשק הגרעיני
40	5. צפי נפגעים
43	6. יעילות ההגנה האזרחית
44	7. מודעות ומוכנות
46	8. על מלחמה גרעינית
49	אחרית דבר
50	קריאה מומלצת
52	נספח א'. זיהום רדיואקטיבי – נתונים טכניים
55	נספח ב'. רשימת מונחים בתחום הלוחמה הגרעינית

הקדמה מאת פרופ' בני מילגרום למהדורה השישית

”וַיִּתְרוֹן דַּעַת הַחֲכָמָה תְּחִיָּה בְעֵלְיָהּ” (קהלת ז', י"ב)

האיום הגרעיני מלווה את האנושות מאז אמצע המאה העשרים, והוא מציב בפני המדע, החברה והקהילה הבינלאומית את אחד האתגרים המורכבים ביותר בהיסטוריה המודרנית. אף על פי שהנשק הגרעיני נתפס לעיתים קרובות כנושא השייך בעיקר לתחומי המדיניות והאסטרטגיה הצבאית, הרי שהבנתו האמיתית נשענת בראש ובראשונה על יסודות מדעיים וטכנולוגיים: פיזיקה גרעינית, הנדסה, מערכות אנרגיה וניתוח תופעות מורכבות של קרינה והשפעותיה.

החוברת שלפניכם, פרי עבודתו של ד"ר יהושע סוקול, מציעה לקורא שילוב ייחודי של ידע מדעי מדויק עם הסתכלות מפוכחת ומעשית על סוגיית האיום הגרעיני. החיבור עוסק במגוון רחב של היבטים: החל במושגי יסוד בפיזיקה גרעינית, דרך מאפייני פיצוץ גרעיני והשפעותיו על הסביבה והאדם, ועד לניתוח סוגיות של מודעות ציבורית והתגוננות אזרחית.

ייחודה של עבודה זו הוא בגישתה המאוזנת. מצד אחד, היא איננה מקלה ראש בסכנות הטמונות בנשק גרעיני ובהשלכות האפשריות של שימוש בו. מצד שני, היא מבקשת להתמודד עם הנושא מתוך הבנה מדעית ולא מתוך פחד או מיתוסים. החיבור מציג נתונים, עובדות וניסיון מצטבר שנאסף במשך עשרות שנים של מחקר וניסיון בינלאומי, ובכך מאפשר לקורא לפתח הבנה מושכלת של התופעה ושל דרכי ההתמודדות עמה.

בעידן שבו מידע רב מופץ במהירות ולעיתים ללא ביסוס מדעי, חשיבותם של פרסומים מסוג זה גדולה במיוחד. החיבור פונה לא רק לאנשי מקצוע אלא גם לסטודנטים, למקבלי החלטות ולכל אדם המבקש להבין טוב יותר את האתגרים הטכנולוגיים והחברתיים של העידן הגרעיני.

ד"ר סוקול מביא עמו ניסיון רב הן במחקר והן בהסברה בתחום זה. תרומתו מתבטאת ביכולת לחבר בין הידע התיאורטי לבין יישומיו המעשיים – יכולת חיונית במיוחד כאשר עוסקים בנושאים בעלי השלכות רחבות על ביטחון החברה והמדינה.

במרכז האקדמי לב בכלל, ובחוג להנדסת חשמל ואלקטרוניקה בפרט, אנו עמלים יום יום לגדל מהנדסים בעלי גישה יישומית לאתגרים עכשוויים, מתוך הבנה תיאורטית עמוקה. בנו האמונה כי תפקידנו להרבות דעת וחכמה – על מנת להרבות חיים – **”טוב טעם ודעת למדני כי במצותיך האמנותי”** (תהילים קי"ט, ס"ו).

הנדסה ומדע אינם רק אמצעים לפיתוח טכנולוגיות חדשות; הם גם כלים להבנה עמוקה יותר של העולם ולניהול אחראי של הסיכונים הנובעים מהתקדמותו. רוח זו ניכרת היטב בחיבור שלפניכם.

אני מבקש לברך את ד"ר סוקול על פרסום מהדורה זו של החוברת ועל תרומתו להרחבת הידע והמודעות בתחום חשוב זה. אני מקווה כי הקוראים ימצאו בעבודה זו מקור ידע משמעותי, וכי היא תעודד המשך לימוד, דיון וחשיבה ביקורתית על אחד הנושאים החשובים והרגישים של זמננו.

פרופ' בני מילגרום
ראש החוג להנדסת חשמל ואלקטרוניקה
המרכז האקדמי לב, ירושלים

מבוא

מלחמה גרעינית איננה נושא נוח לדיון. יש רתיעה טבעית מלחשוב על שכונות שלמות חרבות, רבבות הרוגים ופצועים, תמונות ההרס החרוטות בתודעתנו. אך עם כל זאת יש להכיר בעובדה שמלחמה גרעינית תיתכן. אי לכך, עלינו לדעת כי עם כל הסבל הצפוי – מלחמה גרעינית איננה סוף העולם. אף על פי שלנשק גרעיני כוח הרס רגעי מחריד, הוא בכל זאת מוגבל. חששות הציבור בעניין ההשלכות של התקפה גרעינית או מלחמה גרעינית הינם מוגזמים במידה רבה. למשל, לא כולם יודעים כי:

- היו בהירושימה אנשים ששהו בתוך מבנה בטון במרחק 200 מ' ממוקד הפיצוץ. 50% מהם שרדו. לעומתם, אלה שהיו בחוץ במרחק גדול יותר פי 10 (2000 מ') – רובם נספו
- מסילת הרכבת בהירושימה שבה לתפקד יומיים אחרי ההפצצה
- כיום הן הירושימה והן נגסאקי – ערים פורחות ומשגשגות
- עד היום גרמה הקרינה לסרטן קטלני אצל פחות מ-1000 אנשים מניצולי שתי הפצצות האטום. להשוואה: כ-20,000 ניצולים מתו באופן טבעי מסרטן שפיתחו במהלך חייהם ללא קשר להקרנתם
- עד היום לא נתגלו שום תופעות גנטיות אצל צאצאי הניצולים

איומים גרעיניים ורדיולוגיים, למרות שמוזכרים בדרך כלל יחד, שונים לגמרי (בכל היבט מלבד נוכחות של קרינה מייננת). כוח ההרס של נשק גרעיני אכן מחריד אך הוא מוגבל כאמור לעיל. בניגוד לגרעיני, נשק רדיולוגי (או פצצה מלוכלכת בלשון עממית) ניתן להכנה בקלות יחסית, אך הינו בפועל נשק הפחדה שכוח ההרס האמיתי שלו מוגבל בדרך כלל על ידי החלק הנפיץ: פשוט לא ניתן להשיג רמה מסוכנת של קרינה על ידי חומרים רדיואקטיביים זמינים באופן סביר.

כמו כן, כדאי להקדיש כמה מילים למה שמכונה "חורף גרעיני" – מודל לפיו מלחמה גרעינית תגרום להעלאת כמות אדירה של פיח לאוויר וכתוצאה מזה – להתקררות קטלנית של כדור הארץ. נביא ראייה אחת בלבד נגד המודל הנ"ל. בשנת 1883 התרחשה התפרצות של הר הגעש קראקטאו (Krakatoa) באינדונזיה. עפ"י הערכות, כ-20 ק"מ מעוקבים (20 km^3) של אפר עלו לאוויר. אכן בשנה העוקבת טמפרטורות ברחבי העולם היו נמוכות מהרגיל בכמעלה אחת, ובשנה הבאה חזרו לערכים הרגילים. במקרה של מלחמה גרעינית הערכות הכי מרחיקות לכת מדברות על 0.1 ק"מ מעוקב (0.1 km^3) של פיח. עם כל ההבדלים בין אפר לפיח לעני"ד אין טעם להמשיך.

הבנה ברורה של מאפייני הנשק הגרעיני חיונית לניהול נכון של משאבי החירום ואף להישרדות האומה: ניתן להתגונן ולהפחית נזקים פי 10 ויותר – כאשר יודעים איך. יתר על כן, יכולת עמידתנו היא העירבון הטוב ביותר לכך שנשק גרעיני לא יופעל נגדנו כלל, כפי שהוכיחה ארה"ב שעמידתה האיתנה מול ברה"מ במשך עשרות שנים הביאה בסופו של דבר להתפרקות האיום. ונצח ישראל לא ישקר.

חוברת זו ראתה אור בגרסתה הראשונה בתחילת שנת תשס"ח (סוף 2007). מאז, נושא האיום הגרעיני הוצג בפני אנשים רבים מהקהל הרחב ומבעלי תפקידים, וכן דווח במספר כנסים מקצועיים. כל הזמן הזה נמשכה העבודה על הנושא. בין השאר, בשנת 2014 יצא לאור כרטיס הדרכה המתמצת את החוברת הזאת. במהדורת 2017 נעשתה בחינה מחדש של מושגי היסוד ונוספה רשימתם. במהדורה זו נוסף חומר על נשק רדיולוגי (פצצה מלוכלכת) ודוקטרינת לחימה.

שלמי תודה

ברצוני להודות לאנשים רבים, ולבקש סליחה מרבים עוד יותר על כך שלא אזכיר את כולם. כאן המקום להודות למרכז האקדמי לב – מקום עבודתי משנת 2017. תודה מיוחדת לפרופ' בני מילגרום על עידוד פרסום מהדורה זו ועל כתיבת ההקדמה. כמובן כל האחריות על כל התוכן רובצת עלי במלואה.

בין אלה שתרמו תרומה משמעותית בשלבים שונים של העבודה על חוברת זו: הרב דן בארי (אורות עציון), ד"ר סא"ל בנימין ברוש (פיקוד העורף), פרופ' שלמה גַּנְדְּלֶמָן (הטכניון), מר יובל גת (ארד תקשורת), מר אורן הַרְסֶל (רפא"ל), פרופ' אלי וקסמן (מכון ויצמן), ד"ר גבריאל חודיק (קופ"ח מכבי), ד"ר אלימ אפרים לְאֹר (מרכז אפר"ן, המכון הטכנולוגי חולון), ד"ר אל"מ אורי נסים לוי (פיקוד העורף), ד"ר איתי לֶוֹנְטֶן (לויטן מהנדסים), פרופ' יצחק סגל ז"ל (הטכניון), פרופ' ולדימיר סְנֵדוּמִירְסְקִי ז"ל (אוניברסיטת בר-אילן), פרופ' נָאדִים רוֹטנְבֵּרְג ז"ל (אוניברסיטת תל-אביב), מר גדי שכטר (התעשייה האווירית), פרופ' טוביה שלזינגר (ממ"ג שורק) ופרופ' מיכאל שפירא ז"ל (הטכניון).

ותודה מיוחדת לחברי פורום אקדמאים למודעות גרעינית, אשר היו אתי לאורך כל הדרך, עודדו, העירו, יעצו וביקרו: ד"ר מיכאל ברונשטיין, ד"ר מוטי בריל (קמ"ג), ד"ר משה נְאֶנְבֶּסְקִי, מר משה לֶפֶל (מרכז בס"א), פרופ' גרגורי פֶּלְקוֹבִיץ' (מכון ויצמן) – תודה מקרב לב.

קרני שומרון, יום ניקנור תשפ"ו (2026)

תקציר

מה עושה פיצוץ גרעיני?

1) **גל הַדֶּף** – כמו של פיצוץ רגיל רק חזק יותר – יהיה כנראה גורם הפגיעה העיקרי. בניינים קורסים. בני אדם בשטח פתוח נפגעים מחפצים ומשברים המועפים ע"י ההדף. ההדף יכול גם להעיף אדם שעומד או יושב – לכן עדיף לשכב.

2) **קרינה תרמית** (כמו קרני השמש), החזקה בהרבה ביחס לפיצוץ רגיל בעל אותה עוצמה, גורמת לכוויות קשות – ביום בהיר אף במרחק של 3 ק"מ. אך די בבגד דק או בעיתון כדי להגן על העור מפני הכווייה. צפויות גם שריפות מרובות, ולכן יש חשיבות רבה לנקיטת אמצעי בטיחות אש.

3) **קרינה גרעינית מיידיה** מתפשטת, בדומה לאור, בקו ישר. היא גורמת להקאות, דימומים, זיהומים ועוד. מחלת הקרינה עלולה להיות קטלנית אף אצל חלק מהאנשים ששרדו את ההדף, לפעמים אף בממ"ד (מרחב מוגן דירתי) שלא נפגע. לעומת זאת, מקלטים תת-קרקעיים שלא נהרסו מספקים הגנה מספקת גם מהקרינה. אנשים אשר ספגו מנת קרינה מסוכנת, אינם מתים מיד אלא יכולים לתפקד עוד מספר ימים עד שבועות, וטיפול רפואי ע"י נוגדי הקאה ואנטיביוטיקה משפר משמעותית את סיכויי ההחלמה.

מי שחלה במחלת הקרינה והבריא – ניתן לצפות לסיכון מוגבר לסרטן במהלך חייו, אולי עד פי 2. החששות מפני סרטן ומוטציות מוגזמים בהרבה בהשוואה לניסיון הקיים.

4) **זיהום רדיואקטיבי** (ע"י נשורת גרעינית) נוצר אם הפיצוץ אירע בסמוך לקרקע (בהירושימה ונגסאקי לא נוצרה נשורת כי הפיצוצים היו בגובה של כ-500 מ'). הנשורת נראית כמו חול או אפר דק. היא יורדת ומצטברת על הקרקע ועל משטחים אופקיים או משופעים. קרינת הנשורת נחלשת עם הזמן מהר יחסית: פי 10 אחרי 7 שעות, פי 100 אחרי יומיים. אם אין נשורת – אין קרינה. אזור הזיהום המסוכן יכול להשתרע עד כ-20 ק"מ ממקום הפיצוץ בכיוון הרוח. אך אנשים במרחבים מוגנים וגם בבתי קומות (אבל לא בקומת קרקע ולא בקומת גג) אינם צפויים להיפגע – משום שקרינת הנשורת חודרנית פחות מהקרינה הגרעינית המיידיה.

5) **דופק אלקטרוֹמגְנֵטי** (דוא"מ) אינו משפיע ישירות על בני אדם, אך יכול להוציא מכלל פעולה או לשבש ציוד חשמל ואלקטרוניקה המחובר לאנטנות ארוכות למיניהן, כולל חוטי חשמל וצינורות מים. ציוד שלא מחובר לאנטנות ארוכות, כגון מכוניות ומחשבים שלא מחוברים לחשמל, צפוי לעמוד בדוא"מ. לא צפויה פגיעה ארוכת-טווח בתשתיות.

אף אחד לא רוצה להימצא בסביבת פיצוץ גרעיני, ואנחנו מאחלים לכולנו שלא לעבור את החוויה הזאת. אבל בהחלט צריך לדעת שאפשר לעבור אותה. מי שיימצא קרוב מדי לפיצוץ – ייהרג. אין מזה מנוס. זה נכון גם לגבי כל טיל, פצמ"ר או מטען חבלה, וזאת הסיבה שממ"ד תקני לא מיועד להגן בפני פגיעה ישירה של טיל. אולם במרחקים גדולים יותר (במעגלים רחבים בהרבה) – יש חשיבות רבה להתנהגות נכונה. מי ששומר על קור-רוח, מי שיודע מה עליו לעשות ופועל בהתאם – מציל את עצמו וגם רבים אחרים: גם הם מושפעים מביטחונם, פועלים כמוהו וניצלים.

טווח פגיעה של פצצת אטום

- כ-0.5 ק"מ – הרס ממ"דים
- כ-1 ק"מ – קריסה או נזק בלתי ניתן לתיקון של מבנים בעלי שלד בטון מזוין (הבנייה המודרנית). קרינה גרעינית מסוכנת גם במבנים ששרדו
- כ-1.5 ק"מ – קריסה או נזק בלתי ניתן לתיקון של בנייני בטון בעלי קומה מפולשת, וגם של בנייני אבן
- כ-3 ק"מ – כוויות קשות בעור חשוף (יום בהיר), הצתה של חומרים דליקים
- כ-4 ק"מ – ניפוץ שמשות לא מחוזקות

אנחנו מדברים על פצצה בסדר גודל של אלו שהוטלו על יפן. מדוע אין אנו מתייחסים לפצצות חזקות יותר, שהרי "העולם מתקדם"? כדי לענות על שאלה זו, ניקח לדוגמה מכונית משנת 1945 ונשווה אותה למכונית של היום. נכון: המכונית של אז דורשת הרבה יותר תחזוקה, פחות אמינה, פחות בטיחותית, פחות חסכונית, קצת פחות נוחה, אין מזגן, הגה כוח, מראות חשמליות ואביזרים רבים אחרים שנפוצים כעת – אך בכל זאת מאוד דומה. אותו הגה, דוושות, ידית הילוכים, וגם אותם 5 נוסעים ואותה מהירות על הכביש. דוגמה אחרת, קרובה יותר – התחמושת של היום מדויקת יותר, אך לא חזקה יותר (ככלל) מהתחמושת של מלחמת העולם השנייה. גם פצצת אטום: אף על פי שניתן לבנות פצצות חזקות בהרבה – אין זה יעיל. למסקנה זו הגיעו מזומן (בעידן המלחמה הקרה).

60 שניות של הדרכה להתמודדות עם התקפה גרעינית

(א) פול ארצה והתכסה כאשר אתה רואה הבזק. גם התכסות בעיתון יכולה למנוע כוויות ופגיעה בעיניים. הישאר שכוב במשך דקה שלמה. עצום את העיניים כל עוד האור בהיר כדי למנוע עיוורון.

(ב) כלל 7-10 : קרינת הנשורת נחלשת פי 10 כעבור 7 שעות, וכן כל פעם שהזמן שעבר גדל פי 7. דהיינו, 1/10 מהעוצמה ההתחלתית אחרי 7 שעות, 1/100 אחרי 49 שעות (יומיים) ו- 1/1000 אחרי שבועיים.

(ג) הנשורת נראית כמו חול או אפר דק. היא יורדת ומצטברת על הקרקע ועל משטחים אופקיים או משופעים. אם אין נשורת – אין קרינה! כדי לוודא, הנח על הארץ דף נייר או צלחת, ובדוק כל 15 דקות אם יש חלקיקי נשורת. אם יש – היכנס למחסה. עדיף מקלט תת-קרקעי או קומת מרתף. עדיפות שנייה – בית קומות, אך לא קומת קרקע ולא קומת גג.

(ד) הישאר במחסה יומיים. במקרה הצורך ניתן לצאת מהמחסה לזמן קצר, עד כמה דקות (אך עדיף רק כעבור 7 שעות). הקפד על כללי היגיינה: אל תכניס למחסה לכלוך מבחוץ, נקה את הידיים, אל תאכל מזון מזוהם.

(ה) דאג מראש שבמחסה יהיו לפחות מים (2 ליטר לאדם ליממה) ודלי נסגר או סיר לילה (בתור שירותים מאולתרים). אין צורך באיטום המחסה – האוויר לא הופך למזוהם.

לסיכום : עם כל ההרג וההרס הצפויים, מלחמה גרעינית איננה סוף העולם. רוב אלה שראו פטרייה גרעינית במו עיניהם – המשיכו לחיות, ורבים מהם לא נפגעו כלל. ניתן בהחלט להינצל, במיוחד כאשר יודעים כיצד להתגונן. לכן חשוב שתקראו, תחשבו, תדברו, תפנימו, תתרגלו. ידע הוא תמיד כוח. לפעמים הוא גם חיים.

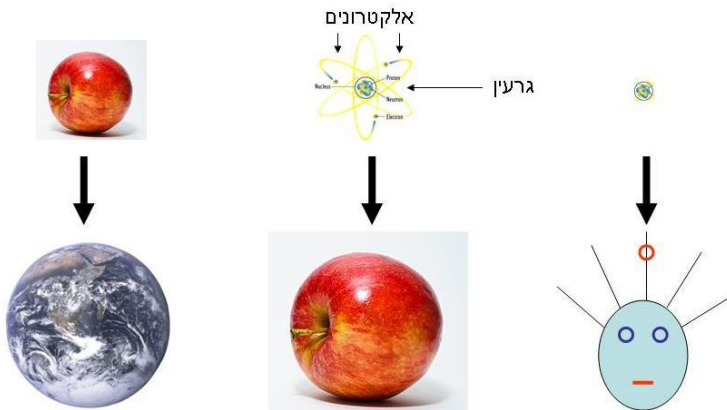
ההוראות שלעיל מגלמות בתוכן ידע וניסיון של עשרות שנים. הן נוסחו ע"י "פורום אקדמאים למודעות גרעינית" אשר פועל משנת 2007 בתחום המחקר וההסברה. ההוראות מתבססות על כרטיס הדרכה שהוכן ע"י הארגון "רופאים למען התגוננות אזרחית", ארה"ב PhysiciansForCivilDefense.org

*ההוראות הנ"ל יכולות להציל חיים
הן מיועדות לכל אחד ואחת אעפ"י שנוסחו בלשון זכר לשם פשטות*

1. עקרונות מדעיים

1.1 מושגי יסוד בפיזיקה גרעינית

לפי מה שאנו יודעים כיום על הטבע, כל הגופים מורכבים מחלקיקים זעירים הנקראים אטומים. האטומים נמצאים בתנועה מתמדת. הם מושכים אחד את השני במרחקים קצרים, אך נדחים ככדורי גומי אם דוחסים אותם. אפשר להמחיש את ממדיהם הזעירים של האטומים על ידי משל: אם יגדילו אטום עד לממדיו של תפוח – תפוח, אם יגדילו אותו באותו קנה מידה, יגיע לגודלו של כדור הארץ.



איור 1. גודל יחסי של אטום וגרעין. אם יגדילו אטום עד לממדיו של תפוח – תפוח, אם יגדילו אותו באותו קנה מידה, יגיע לגודלו של כדור הארץ. באותה הגדלה קוטרו של הגרעין יהיה כ- 1% מעובי חוט השערה.

חומר המורכב מסוג אחד של אטומים נקרא *יסוד*. בין היסודות נמנים חמצן, חנקן, מימן, ברזל, זהב, כסף, נחושת, בדיל ועופרת. רוב רובם של החומרים בטבע מורכבים מכמה יסודות. למשל, מים – ממימן וחמצן, פלדה – ברזל ופחמן וכו'. למרבה הפלא, כל אין-ספור החומרים שבטבע מורכבים מכ-90 יסודות בלבד. בין היסודות נמנים גם אורניום (סמל כימי: U) וגם פלוטוניום (סמל כימי: Pu) – מתכות כבדות המתקרבות במשקלן הסגולי לזהב.

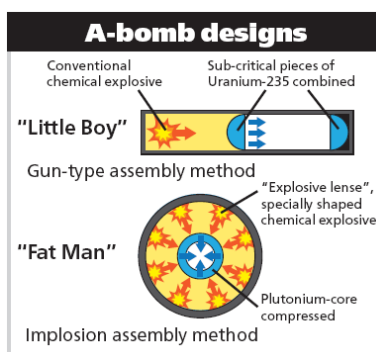
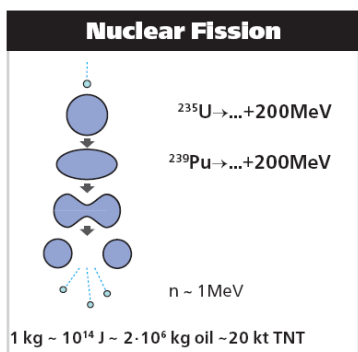
כל אטום מורכב מ**גרעין ואלקטרונים**. אף על פי שמשקלו של הגרעין מהווה מעל 99.9% ממשקל האטום כולו, ממדיו זעירים מאוד ביחס לגודל האטום: באותה הגדלה של האטום לממדי תפוח, קוטרו של הגרעין יהיה כ-1% מעובי חוט שערה. הגרעין מורכב אף הוא משני סוגי חלקיקים בעלי משקל דומה: **פרוטונים** (סמל כימי: p, באנגלית: proton) ו**נייטרונים** (סמל כימי: n, באנגלית: neutron). התכונות הכימיות של היסוד נקבעות על ידי מספר הפרוטונים בגרעין (*המספר האטומי*), והוא קובע את המספר (הזהה) של האלקטרונים באטום. מספר הנייטרונים יכול להיות שונה, כמעט ללא השפעה על התכונות הכימיות של האטום. כיוון שכך, אם מספר הפרוטונים בגרעינים שווה אך מספר הנייטרונים שונה, מדובר על *איזוטופים* שונים של אותו יסוד. לרוב היסודות בטבע יש כמה איזוטופים טבעיים. מקובל לסמן איזוטופים על ידי *משקלם האטומי* שהוא המספר הכולל של הפרוטונים והנייטרונים שבגרעין. למשל אורניום-235 (סמל כימי: ^{235}U) ואורניום-238 (סמל כימי: ^{238}U) הם שני איזוטופים של האורניום. בגרעיניהם יש 92 פרוטונים (המספר האטומי של אורניום) אך כמות שונה של נייטרונים. באורניום-235 יש 143 נייטרונים ($235=143+92$) ואילו באורניום-238 יש 146 ($238=146+92$).

כמו שיש חומרים שהם יציבים כימית ויש המתפרקים מעצמם תוך פרק זמן ארוך או קצר, כך גם יש גרעינים יציבים ובלתי-יציבים. בדרך כלל, ליסוד יש גם איזוטופים יציבים וגם איזוטופים בלתי-יציבים. תהליך התפרקות הגרעינים במהלך הזמן נקרא *דעיכה רדיואקטיבית* (radioactive decay). כל איזוטופ רדיואקטיבי (דהיינו, בלתי-יציב) מתפרק בקצב שלו. מקובל להשתמש במושג *זמן מחצית חיים* – תוך זמן זה חצי מהחומר מתפרק (אחרי 2 זמני מחצית החיים נשאר 1/4, אחרי שלושה – 1/8, וכך הלאה). בפיצוץ גרעיני נוצרים מעל 300 איזוטופים שונים, כל אחד בעל זמן מחצית חיים משלו. כמו שאטומים מגיבים כימית, כך גם גרעינים יכולים להגיב ביניהם בתגובות גרעיניות. רק שבתגובה גרעינית משתחררת בדרך כלל פי 10,000,000 (עשרה מיליון!) יותר אנרגיה מאשר בתגובה כימית טיפוסית – מכאן נובעת העוצמה האדירה של הנשק הגרעיני.

בדעיכה רדיואקטיבית ובתגובה גרעינית נפלטת קרינה מְיֻנָּת (ionizing radiation) המייצרת יונים (ions) על ידי תלישת אלקטרונים מאטומים. קרינה מְיֻנָּת – אַלְפָּא (α), בְּטָא (β), גְּמָא (γ) וניטרונים (n) – דומה בתכונותיה לקרני רנטגן ו-UV (קרינה אולטרה-סגולה). קרינות אלפא ובְּטָא נבלמות מהר על ידי האוויר, ומסוכנות אך ורק אם מקורן נמצא בתוך הגוף (אם החומר המקרין נשאף או נבלע) או במגע ישיר עם הגוף (על העור או על הבגדים). לעומתן, ניטרונים וקרינת גמא חודרניים הרבה יותר מקרני רנטגן. קרינות אלה מתפשטות למאות מטרים באוויר ואף חודרות דרך עובי מסוים של בטון ופלדה (ברוב הנסיבות 30 ס"מ של בטון או 10 ס"מ של פלדה מהווים הגנה מספקת – ראה להלן בפרק 4.4). כמו האור, קרינה גרעינית מתפשטת בקו ישר, אבל – גם כן כמו האור – היא יכולה במידת מה לעקוף מכשולים על ידי החזרה ופיזור. השפעותיה על האדם נידונות בפרקים 1.3 ו-1.4.

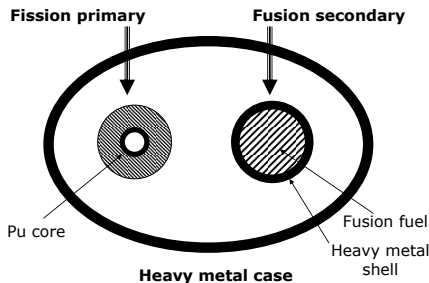
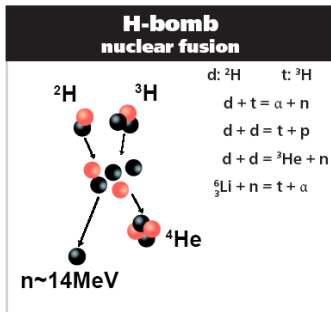
1.2 נשק גרעיני ומאפייני הפיצוץ הגרעיני

מבחינים בדרך כלל בין שתי קבוצות של נשק גרעיני: נשק אטומי (פצצות אטום) ונשק תְּרֵמוֹ-גרעיני (פצצות מימן, thermonuclear). בפצצת אטום, האנרגיה משתחררת כתוצאה מתהליך בְּקוּע גרעיני של פלוטוניום-239 או אורניום-235. קילוגרם אחד של חומר שהתבקע משחרר אנרגיה השווה ל-20 אלף טונות (בערך) של חומר נפץ קונבנציונלי ט.נ.ט. (TNT). תגובת שרשרת גרעינית איננה מתרחשת כאשר כמות חומר הביקוע קטנה מסף מסוים הנקרא "מְסָה קריטית" (5 – 50 ק"ג בתצורות שונות).



איור 2. מבנה פצצת אטום ותגובת ביקוע גרעיני

בפצצת מימן משתחררת כמות משמעותית של אנרגיה (כ-50%) כתוצאה מתגובת מיזוג גרעיני.¹ תגובת המיזוג איננה תגובת שרשרת ואיננה דורשת מסה קריטית, אבל מתחילה אך ורק בתנאי טמפרטורה ולחץ גבוהים מאוד, המושגים על ידי פצצת אטום.



איור 3. מבנה פצצת מימן ותגובת מיזוג גרעיני

בפיצוץ גרעיני ההתחממות האדירה של נפח מצומצם כתוצאה מהתגובה הגרעינית, היא שמביאה להתפשטות התוודך וליצירת גל ההֶדֶף (blast). האזור הסמוך לנקודת הפיצוץ הופך ל כדור להט (fireball) זוהר אשר קוטרו מגיע לכמה מאות מטרים. חלק מאנרגיית הפיצוץ (כשליש) משתחרר כ קרינה תרמית (קרינת אור וחום, thermal radiation), וחלק קטן אך משמעותי – כ קרינה מִינֵנֶת מִיִּדִית (initial nuclear radiation).

כדור הלהט צף כלפי מעלה בדומה לכדור פורח במהירות של כ-100 מטר לשנייה עד שהוא מגיע לגובה של 5 ק"מ ויותר, כך שעלייתו נמשכת דקה-שתיים. כשהוא מפסיק לעלות, התפשטותו לצדדים יוצרת את הצורה הידועה של פטרייה גרעינית. תוצרים רדיואקטיביים של התגובה הגרעינית (תוצרי ביקוע) מתאדים מיד ועולים עם כדור הלהט למעלה. אם הפיצוץ אירע באוויר כך שכדור הלהט לא פגע בקרקע, תוצרי הביקוע בפטרייה מתעבים לחלקיקים זעירים אשר ממשיכים לרחף בגובה (שממנו הקרינה לא מגיעה ארצה) במשך שבועות וחודשים, תוך כדי ירידה מהירה בעוצמת הקרינה. עקב כך בפיצוץ אווירי אין זיהום רדיואקטיבי משמעותי באזור הפיצוץ. כך בהירושימה ובנגסאקי לא היה

¹ נפוץ גם המונח "תגובת התודך גרעיני".

זיהום רדיואקטיבי, כי שם פצצות האטום פוצצו באוויר – ראה להלן. אך אם כדור הלהט פוגע בקרקע, כמות משמעותית של חלקיקים גדולים יחסית נשאבת לתוך "הפטרייה" כך שתוצרי הביקוע נדבקים אליהם. חלקיקים אלה – כמו חול דק – נופלים (נושרים) ארצה (מכאן כינויים: *נְשׁוּרָת*) וגורמים לזיהום רדיואקטיבי של השטח, כיוון שהם פולטים קרינה גרעינית משתיירת (residual nuclear radiation). מטבע הדברים, הנשורת מצטברת על הקרקע ועל משטחים אופקיים (או משופעים). האוויר אינו הופך למזוהם, כי מקורות הקרינה – כמו גרגירי חול – נופלים ארצה. הדיון על חמשת גורמי הפגיעה – הדף, אור וחום, קרינה מייננת מיינדית, קרינה מייננת משתיירת (נשורת) ו *דִּפְק אֶלְקֶטְרוֹמַגְנֵטִי* (EMP) – מובא בפרק 4.

1.3 קרינה גרעינית חזקה (מינון גבוה)

כפי שנאמר לעיל, בפיצוץ גרעיני נפלטת קרינה מייננת – אלפא, בטא, גמא וניטרונים – הדומה בתכונותיה לקרני רנטגן ו-UV. קרינה מייננת (קרינה גרעינית) אכן מזיקה ואף קטלנית במנות גבוהות כמו כל גורם אחר. להלן כמה מספרים. אצל רוב בני אדם מנה עד 25 *רֶנְטְגֵן*² אינה גורמת אף לשינוי ספירת דם, דהיינו אין תופעות פיזיולוגיות כלל. מנה עד 100 רנטגן גורמת לשינוי בספירת הדם, אך עדיין אינה מורגשת בדרך כלל. מעל 100 רנטגן מופיעות חולשה, בחילה, הקאות ועוד – סימנים ראשונים של מחלת הקרינה (radiation sickness). מנה של 200 רנטגן גורמת לתוצאות חמורות (ראה בסעיף הבא) ואף יכולה להיות קטלנית במקרים בודדים. מנה של כ-400 רנטגן נחשבת "קטלנית למחצה" (דהיינו, מחצית המוקרנים מתים בהיעדר טיפול רפואי, סמל מדעי – LD₅₀). טיפול רפואי יעיל עד כ-600 רנטגן, מנות גבוהות יותר הינן קטלניות יותר. מנה של 1000 רנטגן נחשבת לקטלנית בוודאות. יצוין כי גוף חי שסופג מנה קטלנית של קרינה מייננת – מתחמם באלפית מעלה (1/1000 °C) בלבד. קרינה מייננת במינון גבוה פוגעת במִחַ העצם – רקמה שבה נוצרים תאי הדם – ועקב כך גורמת לדימומים וזיהומים. כיוון שתאי הדם הקיימים לא נפגעים (אלא נפגע תהליך החלפתם הטבעית), אפילו קרינה חזקה ביותר לא

² אנחנו נשתמש ביחידות *רֶנְטְגֵן* (R, ר') למדידת מנת קרינה – יש יחידות אחרות (ראה נספח א') אך היחידה רנטגן היא לדעתנו הנוחה ביותר.

הורגת מיד. רוב נפגעי הקרינה ביפן, למשל, מתו כעבור 2 עד 8 שבועות. טיפול רפואי, בעיקר ע"י נוגדי הקאה ואנטיביוטיקה, משפר משמעותית את סיכויי ההחלמה. התופעות אשר מסוגלות להרוג בן אדם תוך ימים עד שבועות נקראות בהקשר הקרינה השלכות *דִּיֶּרְמַטִּיקָטִיּוֹת* (ודאיות).

השלכות ארוכות-טווח של הקרינה המייננת – סרטן ומוטציות – נקראות *קְטוֹבְקָטִיּוֹת* (אקראיות). בעניין השלכות הסטוכסטיות יש לזכור כי בין ניצולי ההפצות הגרעיניות של יפן, התמותה מסרטן המיוחס לקרינה הסתכמה עד לשנת 2003 (ועד בכלל) בכ-600 איש בלבד. להשוואה, כ-10,000 ניצולים מתו מסרטן שפיתחו באופן טבעי במהלך חייהם ללא קשר להקרנתם. ניתן תוצאות המעקב הרב-שנתי מראה: מנות קרינה מעל 200 רנטגן אשר עלולות לגרום למוות תוך מספר שבועות – אם לא הרגו, גרמו לעליית התמותה מסרטן ב-60% עד 80% לאורך כל החיים. עלייה כזאת בתחלואת הסרטן גורמת לקיצור תוחלת החיים בכשנתיים (נגיד, מ-81 ל-79 שנים). ניתן לומר כי ההשלכות הישירות של התקפה גרעינית – כגון הרס התשתיות, פגיעה במערך הבריאות וכו' – יגרמו לתמותה גבוהה בהרבה מאשר הסרטן.

יודגש כי במשך 70 שנה לא נתגלתה כל תופעה רפואית (גנטית או אחרת) בקרב הצאצאים של ניצולי הפצות האטום. מוטציות, מומים מולדים וכו' נצפו אך ורק בבעלי חיים המוקרנים במעבדה (רוב המחקרים נעשו על זבובים). גם באזור צ'רנוביל עם ארבעת המיליונים של תושביו לא חלה שום עלייה בשכיחות המוטציות מזה 30 שנה. מדובר בעובדות מדעיות מוצקות.

1.4 קרינה גרעינית במינון נמוך: מיתוסים ועובדות

הדעה הרווחת כי כל מנה של קרינה מייננת גורמת לסרטן, אינה נתמכת ע"י העובדות. הסוברים כך מתבססים על הנחה הנקראת *מוֹדֵל לִינֵאָרִי לֵאָא סֶף* (Linear No-Threshold או LNT) של גרימת סרטן ע"י הקרינה. לפי ההנחה הנ"ל כל מנה של קרינה מייננת – תהיה נמוכה ככל שתהיה – מהווה סיכון מוגבר לסרטן, וקיים יחס ישר בין הסיכון למנת הקרינה. מודל זה משמש גם גופים מיעצים בהערכת תחלואת הסרטן הצפויה כתוצאה מהשימוש בקרינה, ובתור שכזה הוא מהווה בסיס לרגולציה (אסדרה, פיקוח ממשלתי) גרעינית ורגולציה בתחום הקרינה המייננת. עם זאת, הבסיס המדעי של המודל הלינארי מפקפק. המודל הלינארי קודם לאחר הפצת הירושימה ונגסאקי ע"י מדענים מודאגים בתקווה לרסן את מרוץ החימוש הגרעיני. עובדת היותו של מודל זה שנוי במחלוקת הוכרה תמיד ע"י גופים מדעיים וממלכתיים העוסקים בתחום –

כולל, למשל, המשרד להערכה טכנולוגית (Office of Technology Assessment) של קונגרס ארה"ב (1979). כל הגופים העוסקים בתחום מסכימים כי אין ראיות ברורות לגבי השפעות שליליות כלשהן, מסרטנות או אחרות, של מנות נמוכות מתחת ל-10 רנטגן. המועצה הלאומית של ארה"ב להגנה מפני קרינה (NCRP) ניסחה בכנות את ההיגיון של התומכים במודל הליניארי מפאת הזהירות:

... בפועל אין שום נתונים מדעיים לגבי אדם כדי להוכיח או אפילו לספק תמיכה ישירה לרעיון של [המודל הליניארי] ללא סף, עם ליניאריות ואי-תלות בקצב החשיפה... המקסימום שניתן לומר הוא שרוב המחקרים אינם מספקים נתונים כמותיים אשר סותרים אותו... בסופו של דבר, האמון במודל זה מבוסס על הבנתנו את המנגנונים הבסיסיים המעורבים ...

כנגד "הבנת המנגנונים המעורבים" ניתן לומר במילים פשוטות, כי נזק מצטבר ללא סף לאורגניזם חי (על ידי גורם כלשהו) סותר כמעט את כל המציאות המדעית הקיימת. אמנם אין ספק לגבי השפעתה המסרטנת של הקרינה המייננת במינון גבוה, אך כל דבר במינון מופרז מזיק והורג: מדי פעם אנשים מתים משתיית יתר של מים(!) שלא לדבר על כדורי שינה. אקמול, למשל, צפוי להרוג בהסתברות של 50% אם לקחת 400 כדורים תוך זמן קצר, אך אין זאת אומרת כי אחד מתוך 800 איש מת מכדור אקמול בודד!

הקרינה המייננת אכן משפיעה על תאי גוף האדם, אך יש לציין כי אנחנו נתונים להשפעת הקרינה הגרעינית הטבעית (קרינת רקע) – בעיקר קרדון (גז אציל הדולף מן האדמה, סמל כימי: Rn) וקרינה קוסמית – מאז ומעולם. יש לציין גם את סגולות הריפוי של מעיינות קרדון, אשר נוצלו במשך מאות בשנים (גם כיום הטיפול בקרדון מוכר ע"י הממסד הרפואי באירופה). שלא לדבר על קרינת UV מהשמש (מייננת גם כן) שמחסורה גורם לבעיות רפואיות ידועות. קרינת הרקע הטבעית בישראל הינה 0.2 רנטגן לשנה (ממוצע עולמי: 0.25 ר"שנה), אך ברוב מדינות אירופה, למשל, הקרינה הטבעית גבוהה בהרבה. הסיבה לכך נעוצה בגיאולוגיה – ריכוז גבוה של חומרים המפרישים קרדון באדמה. בין המדינות בהן הקרינה הטבעית חזקה פי שלושה ויותר מאשר בישראל – שבדיה ופינלנד (ראה איור 4), בהן גם תוחלת החיים מן הגבוהות בעולם.

נציין גם כי במשך כ-20 שנה (בערך 1920–1940) מנת הקרינה המותרת (והנהוגה בפועל ע"י עובדי קרינה דאז) הייתה 0.2 ר"יום – דהיינו, המנה הנימית המותרת הייתה שווה למנה שנתית של קרינה טבעית בישראל. עד היום איש לא הצליח להוכיח שמישהו ניזוק מזה.

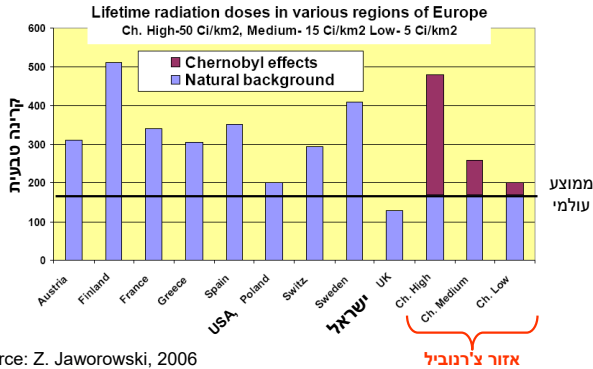
ואם ניקח את אסון צ'רנוביל, רק כ-15 מקרים של מוות מסרטן בלוטת התריס ניתן לייחס לקרינה.³ כאמור לעיל, החששות הרבים לתופעות גנטיות לא התממשו כלל וכלל. בנוסף, כ-200 אלף איש אשר טיפלו בהשלכות האסון (ליקוידטוררים) נחשפו למנת קרינה פי 40 (בממוצע) מהמנה השנתית הרגילה. תחלואת הסרטן ושיעור התמותה הכללית בקרבם אינם גבוהים מהתחלואה ומהתמותה שבכלל האוכלוסייה.

בשנת 2013 נכתב מִזְכָּר של הוועדה הבינלאומית להגנה מפני הקרינה (ICRP – International Commission on Radiological Protection) שהינה אחד הגופים המובילים בגיבוי המודל הליניארי. המִזְכָּר מודה כי תחזיותיו של מודל זה הינן "ספקולטיביות, לא מוכחות, בלתי ניתנות לגילוי ו־פאנטומיות". יתר על כן, ניתן אפילו לשער כי מינונים נמוכים של הקרינה הגרעינית מועילים לבריאות האדם בדומה לקרינת UV. השערה זו נקראת הוֹרְמֵזִיס (hormesis). נזכיר את סגולות הריפוי של מעיינות רְדוֹן, ונביא ראייה נוספת: ברוב המחקרים שנעשו על עובדי תעשיות הגרעין, שיעור התמותה מהסרטן – כמו גם התמותה הכוללת – בקרב עובדי הקרינה היה נמוך משמעותית מאשר באוכלוסיות הייחוס. גם ניסיון מצומצם אך מוצלח של טיפול בסרטן ע"י הקרנה במינון נמוך וגם תוצאות ניסויים בבעלי חיים – כל זה מהווה תמיכה מדעית גוברת בהשערת הוֹרְמֵזִיס. הנספחים באנגלית מספקים מידע נוסף.

לסיכום, קרינה גרעינית היא קטלנית במנות גבוהות כמו כל גורם אחר, אך בגוף האדם יש מנגנוני הגנה טבעיים מפני נזקי הקרינה. הם יעילים עד גבול מסוים, כנראה לפחות 0.2 רנטגן ליום ולפחות 50 רנטגן לשנה, שזה גבוה פי 250 מהרקע הטבעי בישראל.

מכל האמור לעיל יוצא כי חששות הציבור בעניין נזקי הקרינה מוגזמים מאוד.

³ לגבי סרטן בלוטת התריס, גם בלי קשר לקרינה, קיימת בעיה ידועה של אבחון-יתר (overdiagnosis) – אבחון מחלה וטיפול בה כאשר התערבות רפואית אינה מוצדקת. כך שיתכן שגם 15 מקרי המוות הללו נבעו מסיבוכים אחרי ניתוחים מיותרים.



איור 4. חשיפה לקרינה מייננת ממקורות טבעיים במדינות שונות בעולם. הממוצע העולמי של הרקע הטבעי הוא 0.25 רנטגן לשנה, או 18 רנטגן במשך 70 שנה. יחידות מנת הקרינה באיור – מיליזיֶנְרְט (mSv), 100 מיליזיֶנְרְט = 10 רנטגן. בישראל הרקע נמוך מהממוצע העולמי, בעוד שברוב מדינות אירופה הוא גבוה בהרבה ללא השפעה שלילית כלשהי. נציין כי מנת קרינה רב-שנתית באזורים המזוהמים ביותר סביב צ'רנוביל נמוכה יותר מאשר בפּוֹלַנְדָּ! נציין גם כי במשך כ-20 שנה (בערך 1920–1940) מנת הקרינה המתרת והנהוגה בפועל הייתה 0.2 ר' /יום, דהיינו פי 300 מהרקע הטבעי בישראל.

על בסיס האיור שהוכן ע"י פרופ' ז'בִּיגְנֵב בִּירוֹבְּסְקִי (פולין)

1.5 הנשק הרדיוולוגי (פצצה מלוכלכת)

כאן המקום להתייחס בקצרה לנשק הרדיוולוגי, מה שמכונה בלשון עממית פצצה מלוכלכת. נציין מיד: כאמור בהקדמה, זה נשק הפחדה הרבה יותר מנשק שפוגע פיזית כי לא ניתן להשיג רמה מסוכנת של קרינה על ידי חומרים רדיואקטיביים זמינים באופן סביר. טבלה 1 מסכמת כמה תרחישים עם מקור רדיואקטיבי להקרנות. ההשלכות הבריאותיות הישירות של כל תאונה או חבלה צפויות להיות הרבה פחות מסוכנות ממה שמקובל. בכל תרחיש, השפעות בריאותיות ישירות הן רק חלק קטן מהנזק שנגרם כתוצאה מפיחד ותגובת יתר; עבור רוב התרחישים הנזק אינו תלוי בהשפעה הבריאותית הקטנה החזויה. אך כיוון שקרינה גרעינית הפכה קשורה תפיסתית לסוף העולם של מלחמה גרעינית, תיאור רגשי של מצבי חירום רדיוולוגי מחליף בדרך כלל שיקולים כמותיים. למשל, תאונות בסדר גודל של צ'רנוביל (30 הרוגים) ופוקושימה (ללא הרוגים)

מתרחשות ברחבי העולם מדי שנה כמעט ואיש לא זוכר אותם אם לא נפגע ישירות. צ'רנוביל ופוקושימה הפכו לאסונות הומניטריים רבי-ממדים (באמת!) לא בגלל הקרינה עצמה אלא בגלל תגובת היתר של הרשויות ושל הציבור, שהובילה לפינוי לא מוצדק של מאות אלפי אנשים. הערכות כמותיות (שאיש לא עשה במשך שנים רבות) מראות שבפוקושימה הפינוי לא היה מוצדק כלל ובצ'רנוביל היה צריך לאכלס את האזור המפונה מחדש לאחר חודש אחד בלבד.⁴

טבלה 1. תרחישי הפעלת 'פצצה מלוכלכת' ממקור להקרנה רפואית Cs-137 בעל רדיואקטיביות $3000 \text{ Ci} \sim 0.1 \text{ PBq}$

זמן חשיפה – תמותה	קצב קרינה	תרחיש
20 דקות	9 Gy/h	מקור מוסתר במרחק 1 מ'
מעל 10 ימים	$1.6 \times 10^{-2} \text{ Gy/h}$	פיזור על פני 10×10 מ'
אין תופעות מיידיות	1.40 Gy/year	פיזור על פני $10 \times 100,000$ מ'

⁴ Socol Y, Y. Gofman, M. Yanovski and B. Brosh. Assessment of probable scenarios of radiological emergency and their consequences. *International Journal of Radiation Biology* 96/11 (2020), 1390-1399

2. נתונים בסיסיים על הנשק הגרעיני ותולדותיו

כאמור לעיל, מבחינים בין שתי קבוצות של נשק גרעיני: "פצצות אטום" ו"פצצות מימן" (או נשק תרמו-גרעיני). עוצמת הנשק הגרעיני נקראת תפוקה (באנגלית: yield). תפוקה נמדדת ביחידות קילו-טונה (קיצור: ק"ט, באנגלית: kiloton, KT) או מְגָה-טונה (מ"ט, באנגלית: megaton, MT). קילו-טונה – זאת יחידת אנרגיה השווה בערך לאנרגיה שמתחררת בפיצוץ של אלף טונות של חומר נפץ קונבנציונלי ט.נ.ט. (TNT), $1 \text{ מְגָה-טונה} = 1000 \text{ קילו-טונות}$.

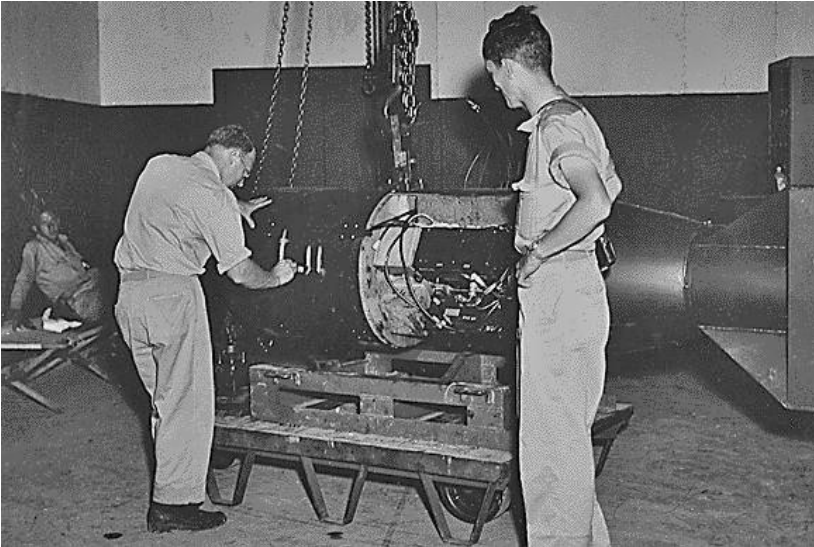
מקובל כי תפוקתן של פצצות האטום מגיעה לכ-20 ק"ט (למשל, הירושימה – 16 ק"ט, נגסאקי – 21 ק"ט). טווח הנזק החמור למבנים⁵ של פצצת 20 ק"ט, (רק כאלה צפויות להוות איום בעתיד הנראה) הינו עד 1.5 ק"מ כפי שיפורט להלן.

כדי להשיג תפוקה גבוהה יותר יש צורך בטכנולוגיית פצצת מימן שהיא מסובכת בהרבה (ניתן לומר כי פצצת אטום מהווה נפץ בלבד של פצצת מימן). טווח פגיעת הפצצה גדל עם תפוקתה, אך הקשר הזה כלל לא ליניארי. ניתן להמשיל את האנרגיה המשתחררת בפיצוץ לגז שמנפח כדור, כך שטווח הפגיעה גדל כרדיוס הכדור. דהיינו כאשר תפוקת הפצצה (האנרגיה המשתחררת בפיצוץ) גדלה, למשל, פי 8 – טווח הפגיעה גדל פי 2. כאשר התפוקה גדלה פי 1000 – טווח הפגיעה גדל פי 10. היחס הנ"ל בין תפוקה לטווח אופייני לכל פיצוץ, לאו דווקא גרעיני.

תפוקתן של פצצות מימן מגיעה בדרך כלל לכ-1000 ק"ט (1 מְגָה-טונה). טווח הנזק החמור של פצצה בעלת תפוקה של 1 מ"ט צפוי להיות 4 עד 6 ק"מ. פצצות חזקות יותר (עד 50 מ"ט) נבנו ונוסו, אך לא הוכיחו את עצמן, ועל כן אינן בנמצא כיום (טווח פגיעה של פצצת מימן בסדר גודל של עשרות מְגָה-טונות מוגבל כנראה ע"י עובי האטמוספירה). בשיא המלחמה הקרה (נתונים לשנת 1979) תפוקתם הממוצעת של כלי הנשק הגרעיניים של ארצות הברית הייתה כ-240 ק"ט. אמנם לברה"מ באותה תקופה התפוקה הממוצעת הייתה מעל 1000 ק"ט, אך לדעת המומחים להבדל זה לא הייתה חשיבות מבצעית משמעותית. מקובל לומר כי הסובייטים פשוט לא הצליחו למזער את נשקם הגרעיני.

⁵ ההגדרה המקצועית: קילו-טונה = מיליארד קילו-קלוריות $1 \text{KT} = 10^{12} \text{ cal}$

⁶ קריסת המבנה או נזק בלתי ניתן לתיקון אשר מחייב את הריסתו.



איור 5. פצצת אטום "Little Boy" אשר הרסה את הירושימה
אורך: 3 מ', קוטר: 70 ס"מ, משקל: 4000 ק"ג. תפוקה: 16 קילו-טונות

היסטורית, גודלן של הפצצות הראשונות שהושלכו על הירושימה ונגסאקי היה בסדר גודל של מטרים, ומשקלן – כמה טונות. לעומתן, פצצות המימן הראשונות היו בעלות תפוקה של כמה מֶגה-טונות, גודלן עלה על 10 מטר ומשקלן על 15 טונות. כלי הנשק הגרעיניים המודרניים קטנים בהרבה, הן מבחינת העוצמה והן מבחינת הגודל והמשקל.

כבר ב-1953 נערכו בארה"ב ניסויים בשיגור נשק גרעיני בעזרת תותחים: Atomic Annie בעלת פגז 280 מ"מ שמשקלו 365 ק"ג ותפוקתו 15 ק"ט (פצצת הירושימה בעלת תפוקה דומה שקלה פי 10 יותר). פיתוחים נוספים מיזערו את כלי הנשק הגרעיניים לקוטר של תותחי 155 מ"מ הנפוצים, אך עם תפוקות נמוכות בהרבה (כ-0.1 עד 1 ק"ט) – לדוגמה, פגז W48 (ארה"ב) בעל משקל של כ-60 ק"ג. כיום טוענים כי כל הפגזים הגרעיניים פורקו, אך היכולת הטכנולוגית בוודאי קיימת.



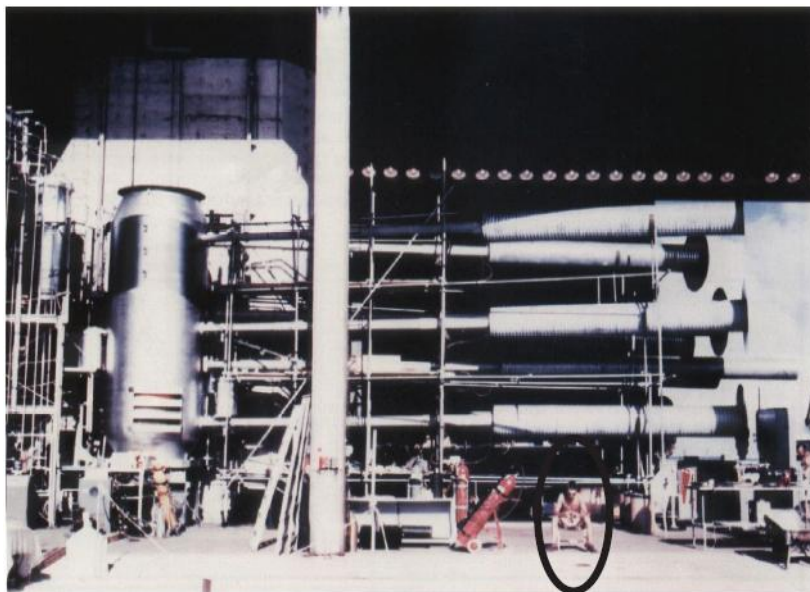
1963: W48
Diameter 155mm
Length 0.85m
Weight 58kg
Yield 0.1kt



1953: "Atomic Annie"
Diameter 280mm
Length 1.38m
Weight 365kg
Yield 15kt

איור 6. פגזי אטום – נשק גרעיני זעיר

ראשי נפץ תרמו-גרעיניים של טילי ארה"ב כגון W87 (איור 8) הינם בעלי תפוקה של עד כ-500 ק"ט ומשקלן כנראה פחות מ-500 ק"ג (הפרטים הטכניים מסווגים).

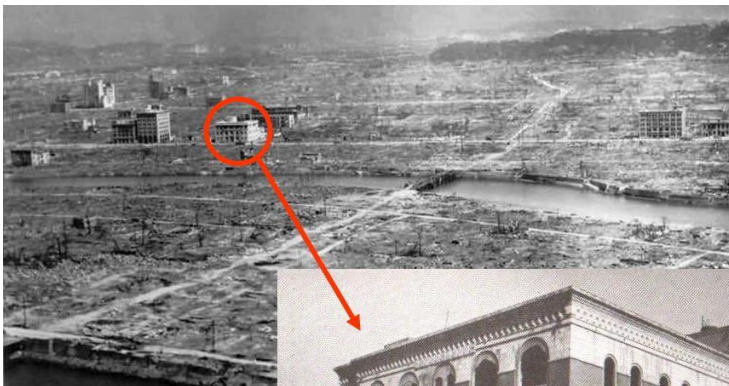
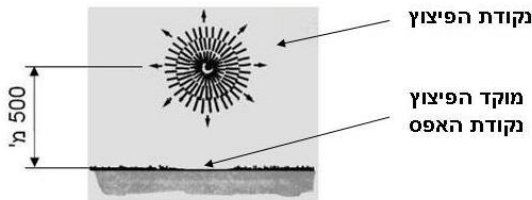


איור 7. התקן תרמו-גרעיני (פצצת מימן) ראשון. ארה"ב, 1952.
דמות אדם (מוקפת בעיגול) נותנת קנה מידה. עקב ממדיו ומשקלו,
ההתקן היה נייח. פצצה מבצעית ראשונה נוסתה ב-1953. יש לציין כי גם
כיום פצצות מימן לא ניתן למזער בקלות, זה דורש רמה טכנולוגית
גבוהה מאוד. כך שהישגי ארה"ב בתחום מזעור הנשק הגרעיני (ראה איור
8, למשל) מרשימים בהרבה מהישגי ברית המועצות.



איור 8. ראשי נפץ תרמו-גרעיניים של טיל Peacekeeper. ארה"ב, 1983
תפוקה – עד כ-500 קילו-טונות.

שימוש מבצעי בנשק גרעיני נעשה פעמיים בלבד. בהירושימה (06.08.1945), פצצה בעלת תפוקה 16 ק"ט כונתה ("Little Boy") נהרגו כ-70 אלף בני אדם, מספר דומה של אנשים נפצעו. בנגסאקי (09.08.1945), פצצה בעלת תפוקה 21 ק"ט כונתה ("Fat Man") כ-40 אלף נהרגו וכ-25 אלף נפצעו. מספר האנשים שמתו מאוחר יותר ושמותם מיוחס לקרינה המייננת מוערך בפחות מאלף, כפי שצוין בסעיף 1.3 לעיל. יש לשים לב שהפצצה בנגסאקי הייתה חזקה יותר אך גרמה לפחות אבידות. ההסבר הכי הגיוני לכך הוא שהירושימה כמטרה הראשונה נבחרה בקפידה כדי להגדיל את היקף הנזק. במקרה של הפצצה גרעינית של עיר מודרנית באמצעות פצצה דומה, מספר הנפגעים צפוי להיות נמוך משמעותית – ראה דיון בפרק 5 בהמשך.



200 מ' מנקודת האפס
550 מ' מנקודת הפיצוץ
שרידות: 50%

איור 9. הירושימה אחרי ההפצצה.
בניין הדואר המרכזי בצילום למטה (בנוי עמיד בפני רעידות אדמה) היה במרחק 200 מ' בלבד מנקודת האפס, שזה כ-550 מ' מנקודת הפיצוץ: יש לזכור כי הפיצוץ אירע באוויר ברום של 500 מ' כדי להגדיל את היקף ההרס – ראה דיון בפרק 4. כמחצית (!) מהאנשים בבניין זה שרדו (רובם שהו בקומות הקרקע). לעומתם, מי שהיה בחוץ במרחק גדול יותר פי 10 (2000 מ') – רובם נספו. כיוון שהפיצוץ אירע באוויר, לא היה זיהום רדיואקטיבי. קו מסילת הרכבת שעבר דרך העיר שב לתפקד יומיים (!) אחרי ההפצצה.



איור 10. הירושימה היום. תצלום: מייק קולס, 2006

www.MikeColes.net

3. התפשטות הנשק הגרעיני והיבטים אסטרטגיים

כדי לבנות פצצה גרעינית צריך כמות מספקת (מֶסָה קריטית) של "דלק" גרעיני (חומר ביקוע). יש שתי חלופות מעשיות לכך – אורניום-235 ופלוטוניום-239.

אורניום-235 שימש כחומר ביקוע בפצצה "Little Boy" שהרסה את הירושימה. תצורת התותח שלו (gun-type, ראה איור 2 לעיל) הינה פשוטה למדי למימוש. היא נחשבת כמיושנת אצל המדינות הגדולות עקב בעיות בטיחות ועוד, אך היא ניתנת למימוש.

כדי לקבל אורניום המתאים לייצור פצצה, יש להעשירו באיזוטופ אורניום-235 עד כמעט 100%. באורניום טבעי, איזוטופ זה מהווה 0.7% בלבד (כל השאר הוא איזוטופ אחר, אורניום-238 אשר מפריע לתגובת השרשרת). כל האורניום (235 וגם 238) נמצא בעופרת אורניום בכמות 0.2% מכלל משקל העופרה. זאת

אומרת שכדי לקבל 50 ק"ג של אורניום-235 (שזו מסה קריטית בתנאים רגילים ; "Little Boy" הכיל כ-60 ק"ג), יש לעבד 3.5 אלף טונות של עופרת אורניום.

פלוטוניום-239 המשמש בתצורת הכדור הנדחס (implosion-type, ראה איור 2) אינו נמצא בטבע, אלא מיוצר בכורים גרעיניים. יש לציין כי פלוטוניום-239 נוצר בכל כור גרעיני אף אם אין כל צורך בו. למשל, כל כור כוח טיפוסי בעל הספק של 3000 מְגוואט (1000 מְגוואט של חשמל), שבשימוש בתחנות חשמל רבות ברחבי העולם (כולל Bushehr באירן), מייצר מעל 150 ק"ג פלוטוניום-239 בשנה. אבל פלוטוניום שמיוצר בכורים הפועלים להפקת חשמל (בניגוד לכורים המיועדים לייצור פלוטוניום לנשק) מזוהם באיזוטופים בלתי רצויים. כיוון שכך, אין זה פשוט להפיק פלוטוניום באיכות של נשק מדלק גרעיני משומש של תחנות כוח גרעיניות, ויש אף אומרים שזה בכלל לא מעשי.

בכורים המיועדים לייצור פלוטוניום לנשק, התיאוריה אומרת כי קצב הייצור יכול להגיע עד כ-0.4 ק"ג לשנה לכל מְגוואט של הספק (הביצועים המעשיים מסווגים בכל מקום). אם כך, כור בעל הספק של 100 מְגוואט מסוגל לייצר תוך שנה 40 ק"ג של פלוטוניום, שיכולים להספיק ל-4 פצצות אטום.

הפצצה "Fat Man" שהרסה את נגסאקי הכילה כ-12 ק"ג של פלוטוניום-239. ההשוואה בין ביצועי הנשק הגרעיני לבין ביצועי הנשק הקונבנציונלי אינה פשוטה. יש לומר כי מבחינה אסטרטגית, לנשק הגרעיני יש לצד יתרונותיו גם חסרונות משמעותיים. בין החסרונות ניתן למנות (א) חוסר יעילות מול כוחות מזוינים שהם מפוזרים ומוגנים יחסית, וגם (ב) יעילות כלכלית נמוכה למדי (ראה דיון בפרק 5).

היתרון המבצעי המרכזי בנשק הגרעיני הוא כוח דגעי עצום וכתוצאה מכך – קלות הפעלתו ואפשרות לרכז מאמץ של שנים ברגע אחד. הפגזות בסדר גודל של קילו-טונות בוצעו כבר במלחמת העולם הראשונה, ולא היו נדירות בשנייה. הפצצות השטיח של ערי גרמניה ויפן גרמו ליותר אבידות מאשר ההפצצות הגרעיניות (למשל, דרזדן – מעל 35 אלף הרוגים, טוקיו – מעל 80 אלף).

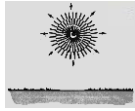
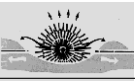
מלאי התחמושת הגרעינית של מעצמות-העל צומצם משמעותית בעשרות השנים האחרונות. נכון לשנת 2016, ארה"ב ורוסיה מחזיקות ביחד כעשרת אלפים כלי נשק גרעיניים, לעומת יותר משישים אלף בשיא המלחמה הקרה. לעומתן, מדינות רבות הצטיידו או מנסות להצטייד בנשק גרעיני. חמש מדינות גרעיניות חתמו על האמנה למניעת הפצת נשק גרעיני: ארה"ב (בעלת נשק גרעיני משנת 1945), ברה"מ (1949), בריטניה (1952), צרפת (1960), סין (1964). מאז, נשק גרעיני פותח בהודו (1974), דרום אפריקה (1983), פקיסטן (1998) וצפון קוריאה (2006). המלאי הגרעיני של דרום אפריקה פורז אחרי החלפת השלטון.

בעניין היכולת של מאמצים בין-לאומיים למנוע ממדינה מסוימת להצטייד בנשק גרעיני, יש לזכור כמה עובדות היסטוריות. בתקופה שבה פיתחה ברה"מ את נשקה הגרעיני, באזורים נרחבים שלה הרעב היה כל כך חמור שאלפי אנשים מתו מרעב ותופעת הקניבליזם הגיעה לממדים שהדאיגו את השלטונות. הודו, פקיסטן וצפון קוריאה – הן מהמדינות העניות ביותר בעולם. דרום אפריקה הייתה נתונה תחת חרם בין-לאומי (בגלל מדיניות הפרדת הגזעים) – ולמרות זאת, כל המדינות האלו פיתחו נשק גרעיני. לכן ההשערה כי אמצעים דיפלומטיים וכלכליים ימנעו מאירן או ממדינה אחרת להצטייד בנשק גרעיני – מפוקפקת למדי. יש להתייחס אפוא בכובד ראש להשלכות מעשיות של הפעלת נשק גרעיני.

4. השלכות הנשק הגרעיני

ניתן להצביע על 5 גורמי פגיעה של פיצוץ גרעיני שהשפעתם היחסית שונה בנסיבות שונות.

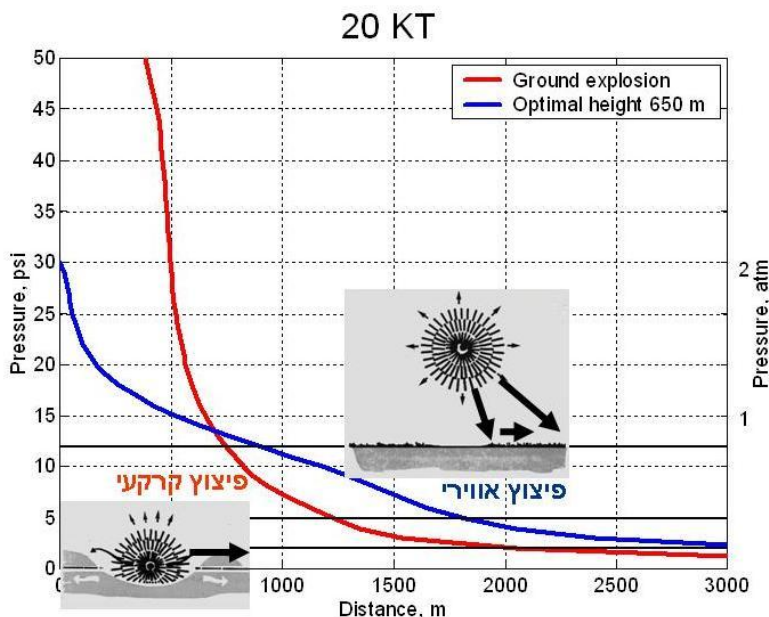
1. גל הֶדְף
2. קרינה תְּרִמִּית (קרינת אור וחום)
3. קרינה מייננת (גרעינית) מיידית
4. זיהום רדיואקטיבי (קרינה גרעינית משתיירת)
5. דֶּפֶק אֶלְקָטְרוֹמַגְנֵטִי (דוא"מ, EMP)

—	+	גובה	
1. אין נשורת 2. מקלט תת-קרקעי שורד אפילו בנקודת האפס	שטח ההרס מרבי $\times 2$	 ~ 0.5 ק"מ	פיצוץ אווירי
שטח ההרס מצומצם יחסית כ-1/2 ביחס לפיצוץ אווירי	1. יש נשורת 2. הרס מוחלט סביב נקודת האפס		פיצוץ קרקעי
אין פגיעה פיזית	דוא"מ EMP רחב היקף	< 30 ק"מ	פיצוץ ברום גבוה

איור 11. סוגי פיצוץ גרעיני לפי גובה – טבלת סיכום

1) **גל הֶדְף** (blast) יהיה כנראה גורם הפגיעה העיקרי. בניינים קורסים ובני אדם נפגעים (השפעה ישירה של לחץ גל ההדף על גוף האדם קטנה בהרבה). כאשר הפיצוץ מתרחש באוויר בגובה אופטימלי שהוא כ-600 מ' לפצצת 20 ק"ט (סדר גודל הירושימה), שטח ההרס – וכתוצאה מזה היקף הפגיעה – גדול כפליים בערך מזה של פיצוץ קרקעי. אך בפיצוץ אווירי לא נוצר בשטח זיהום רדיואקטיבי.

לפצצת 20 ק"ט טווח הרס הממ"דים⁷ צפוי להיות כחצי קילומטר, טווח הנזק החמור (קריסה או נזק בלתי ניתן לתיקון) של מבנים בעלי שלד בטון מזוין – כ-1 ק"מ, ושל בניינים בעלי קומה מפולשת – עד 1.5 ק"מ ואף יותר (טווח ניפוץ שמשות מוחלט – כ-4 ק"מ).



איור 12. גל הַדָּף של פיצוץ גרעיני 20 קילו-טונות – לחץ-יתר.

מבנים חזקים במיוחד או תת-קרקעיים עמידים הרבה יותר. בהירושימה היה בניין תלת-קומתי עמיד בפני רעידות אדמה, ששרד במרחק של 200 מ' בלבד ממוקד הפיצוץ – שכאמור התרחש באוויר ברום כ-500 מ' (ראה איור 9). אנשים רבים ששהו בבניין זה מתו אחר כך כתוצאה מהקרנתם ופציעותיהם, אך כ-50% שרדו. מקלט תת-קרקעי (והאנשים בו!) צפוי לשרוד כבר במרחק 150–200 מ' מנקודת הפיצוץ הקרקעי, ואולי אפילו במוקד של פיצוץ אווירי. מוקד (או נקודת האפס) הוא היטל נקודת הפיצוץ על הקרקע (ראה איור 9).

⁷ ממ"ד – מרחב מוגן דירתי

טווח הרס ממ"דים —————
 טווח הרס מבני בטון —————
 טווח הרס בתים בעלי קומה מפולשת - - - - -



איור 13. טווחי הרס צפויים במקרה של פגיעת פצצת אטום (בעלת תפוקה של 20 קילו-טונות) במרכז תל-אביב. צפי האבידות: 5,000 עד 25,000 אנשים, ראה פרקים 5 ו-6 לדיון מפורט יותר.

2 קרינה תרמית (thermal radiation) דומה לקרני השמש, חזקה בהרבה ביחס לפיצוץ רגיל בעל אותה עוצמה, גורמת לכוויות קשות – ביום בהיר אף במרחק של 3 ק"מ. אך די בבגד פשוט (או אף בעיתון) כדי להגן על העור מפני הכויה. הקרינה התרמית גם מציתה חומרים דליקים וגורמת לשריפות, אבל שריפות יכולות להיגרם גם כתוצאה מההרס (דליפות גז, קצרים חשמליים ועוד) ולא דווקא מהקרינה התרמית. בהירושימה השריפות הרבות התפתחו לסופת אש אשר גרמה לאבידות רבות (בנגסאקי היו שריפות רבות-היקף אך לא סופת אש). השריפות היו מרובות כל כך בגלל סגנון הבנייה המסורתי המבוסס על שימוש בחומרים דליקים. בעיר מודרנית הבנויה בעיקר מבטון, גורם השריפות משמעותי הרבה פחות והסתברות סופת אש נמוכה ביותר. אבל בכל זאת צפויות שריפות מרובות ולכן יש חשיבות רבה לנקיטת אמצעי בטיחות אש.

3) **קרינה מיִנְנֶת (גרעינית) מיידית** (initial nuclear radiation) מתפשטת, בדומה לאור, בקו ישר. היא פוגעת בעיקר במִחַ העצם – רקמה שבה נוצרים תאי הדם – ועקב כך גורמת לדימומים וזיהומים. הקרינה הגרעינית המיידית מסוכנת גם במבנים ששרדו במרחק עד כ-1 ק"מ (בשטח פתוח – עד כ-1.5 ק"מ). מחלת הקרינה עלולה להיות קטלנית אף אצל חלק מהאנשים ששרדו בממ"דים שלא נפגעו במרחק עד 1 ק"מ בערך, במיוחד אם הממ"ד לא הוסתר מנקודת הפיצוץ ע"י המבנה עצמו או מבנים אחרים. לעומת זאת, מקלטים תת-קרקעיים שלא נהרסו, מספקים הגנה מספקת גם מהקרינה. אנשים אשר קיבלו מנת קרינה מסוכנת אינם מתים מיד אלא יכולים לתפקד עוד מספר ימים עד שבועות, וטיפול רפואי מתאים (בעיקר ע"י נוגדי הקאה ואנטיביוטיקה) משפר משמעותית את סיכויי ההחלמה.

מי שחלה במחלת הקרינה והבריא – על סמך הסטטיסטיקה של ניצולי ההפצצות ביפן, ניתן לצפות לסיכון מוגבר לסרטן במהלך חייו, אולי עד פי 2 (עליה כזאת בתחלואת הסרטן צפויה לגרום לקיצור תוחלת החיים בשנתיים בערך). כאן נדגיש שוב כי החששות מפני סרטן ומוטציות מוגזמים בהרבה ביחס לנתונים הקיימים.

4) **זיהום רדיואקטיבי** (ע"י נְשֻׁלֶת גרעינית, באנגלית: fallout) נוצר אם הפיצוץ אירע בסמוך לקרקע כפי שהוסבר בפרק 1 לעיל (בהירושימה ובנגסאקי לא נוצרה נשורת כי הפיצוצים היו בגובה של כ-500 מ'). הנשורת נראית כמו חול או אפר דק. היא יורדת ומצטברת על הקרקע ועל משטחים אופקיים או משופעים. אם אין נשורת – אין קרינה משתיירת.

אנשים במרחבים מוגנים וגם בבתי קומות (לא בקומת קרקע ולא בקומת גג) אינם צפויים להיפגע – קרינת הנשורת (הקרינה הגרעינית המשתיירת) חודרנית פחות מהקרינה הגרעינית המיידית.

עוצמת קרינת הנשורת לא עולה מיד אחרי הפיצוץ. זיהום משמעותי מתחיל להיווצר בדרך כלל כחצי שעה מאוחר יותר, כאשר חלקיקים נופלים מהענן הרדיואקטיבי (הפטרייה הידועה) מגובה של 5 ק"מ ויותר. קרינת הנשורת הזאת יכולה להיות קטלנית אם אדם נשאר ללא הגנה בשטח המזוהם, שאורכו בכיוון הרוח יכול להגיע ל-20 ק"מ לפצצת 20 ק"ט. עוצמת הקרינה מגיעה למקסימום כשעה לאחר הפיצוץ ודועכת לאחר מכן על פי "כלל 7-10": אחרי 7 שעות דעיכה לרמה של כ-10%, אחרי 49 שעות (7×7, כיומיים) לכ-1% (שזה $1/10 \times 1/10$) ואחרי שבועיים (7×7 שעות) לכ-0.1% (שזה $1/10 \times 1/10 \times 1/10$). אחרי יומיים אפילו באזורים המזוהמים ביותר (עם רמת קרינה מרבית עד 1000 רנטגן/שעה) יהיה ניתן בדרך כלל להימצא בחוץ עד כשעתיים ללא פגיעה מיידית. הקרינה צפויה לרדת מתחת לסף הנזק של 0.2 רנטגן/יום (ראה פרק 1.4 לעיל) כעבור שנה אחת.

למקרה של נשק כימי – מותרות יציאות קצרות של מספר דקות. אפילו בניינים ללא ממ"דים מספקים הגנה זו או אחרת (מקדמי הגנה PF מוצגים באיור 14). קומות אמצעיות של בתי קומות מספקות הגנה טובה גם ללא ממ"ד – אך סמוך למוקד הפיצוץ עלולה להתפתח מחלת קרינה קלה (ראה נספח א'). בתים צמודי קרקע ללא ממ"ד מספקים הגנה חלקית בלבד והשוהים בהם עלולים להיפגע במרחק עד כ-20 ק"מ מנקודת הפיצוץ בכיוון הרוח.

5) **דֶּפֶק אֶלֶקְטְרוֹמַגְנֵטִי** (דוא"מ, EMP) אינו משפיע ישירות על בני אדם, אך יכול להוציא מכלל פעולה או לשבש ציוד חשמל ואלקטרוניקה כמו מחשבים וציוד שליטה ובקרה המחובר לאנטנות למיניהן, כולל חוטי חשמל ואף צנרת מים (כלל אצבע: ציוד המחובר לחוט באורך 10 מ' ויותר צריך התייחסות). מכוניות ומחשבים שלא מחוברים לחשמל, למשל, צפויים לעמוד בדוא"מ. לא צפויה פגיעה ארוכת-טווח בתשתיות.

אם נשק גרעיני מתפוצץ בגובה של מעל 30 ק"מ, דוא"מ יכול לפגוע בו-זמנית בכל שטחה של מדינת ישראל. במקרה זה היקף הנזק לתשתיות אמנם שנוי במחלוקת, אך בהחלט תיתכן קריסת מערכות חשמל ותקשורת לתקופה של שעות עד ימים. אף על פי שלא תהיה פגיעה ישירה בנפש, כתוצאה מקריסת מערכות שליטה ובקרה יתכנו אסונות (אפילו רבי-נפגעים). אגב, מקום הפיצוץ יכול להיות בכלל מחוץ לגבולות המדינה, למשל מעל הים התיכון מול לבנון. הגנה בפני דוא"מ יעילה וזולה יחסית בשלב פיתוח מערכות חשמל ואלקטרוניקה (הערכה מקובלת: 1% עד 3% מעלות המערכת) אך מסובכת ויקרה הרבה יותר למערכות הקיימות.

טווח פגיעה של פצצת אטום של 20 קילו-טונות – סיכום

- כ-0.5 ק"מ – הרס ממ"דים
- כ-1 ק"מ – נזק חמור (קריסה או נזק בלתי ניתן לתיקון) למבנים בעלי שלד בטון מזוין (הבנייה המודרנית). קרינה גרעינית מסוכנת גם במבנים ששרדו
- כ-1.5 ק"מ – נזק חמור לבנייני בטון בעלי קומה מפולשת, וגם לבנייני אבן
- כ-3 ק"מ – כוויות קשות של עור חשוף ביום בהיר, הצתה של חומרים דליקים
- כ-4 ק"מ – נזק קל: ניפוץ שמשות לא מחוזקות, פגיעה בגגות וכו'

5. צפי נפגעים

כאמור לעיל, בהירושימה נהרגו כ-70 אלף איש, בנגסאקי – כ-40 אלף. שתי ההפצצות היו כרעם ביום בהיר ללא כל התרעה. משלחת בריטית מדעית אשר חקרה את יעילות הנשק הגרעיני מיד אחרי ההפצצות, הגיעה למסקנה כי במקרה של הטלת פצצת אטום על מרכז לונדון (שצפיפות האוכלוסייה בה היא כ-11,000 איש/קמ"ר) באותם תנאים, היו נהרגים כ-50 אלף איש. מאוחר יותר, ב-1950, ועדה מדעית ממלכתית אחרת של בריטניה העריכה, כי פצצת אטום של 20 ק"ט על מרכז לונדון בתנאי מלחמת העולם השנייה (60% מהאנשים בבתים, 35% – במקלטים, 5% – ברחובות ובגנות) הייתה גורמת לכ-25,000 הרוגים. 25,000 הרוגים – זאת הייתה תוצאה בפועל של הטלת 2000 טונות של פצצות רגילות (לא 20,000 טונות) ע"י חיל האוויר הגרמני (Luftwaffe). כדי לגרום להיקף ההרס של פצצת אטום – נזק חמור לבתים בשטח כ-8 קמ"ר – היה צורך ב-6000 טונות של פצצות רגילות: פצצת אטום יעילה בהריגת אנשים פי 3 מאשר בהריסת בתים, בעיקר בגלל הקרינה הגרעינית. נציין כי הגרמנים הטילו 13,000 טונות של פצצות על לונדון לבדה.

לפי אותן ההערכות, היעד של 300,000 הרוגים בקרב האוכלוסייה האזרחית של גרמניה (תוצאת הפצצות השטיח של בעלות הברית) היה ניתן להשיג על ידי 80 פצצות אטום – זאת אומרת פחות מ-4,000 הרוגים לפצצה בממוצע.

כיצד תוצאת הכפל $25,000 \times 80$ הצטמצמה ל-300,000? יש כאן שני גורמים עיקריים. הראשון הוא דיוק סופי של הטלת הפצצות (צמצום האבידות פי 4) והשני – צפיפות אוכלוסייה נמוכה יותר של ערי גרמניה ביחס ללונדון (פי 1.5). ההערכות נעשו עם הנחות תנאי מלחמת העולם השנייה: תפוקת הפצצות 20 קילו-טונות (ק"ט), דיוק 500 מ' (דהיינו מחצית הפצצות נופלות במרחק עד 500 מ' ממטרותיהן), צפיפות האוכלוסייה (בערי גרמניה) 6–7 אלף איש/קמ"ר. להערכות הללו יש ערך רב כי המספרים שלעיל יכולים להוות הערכה ראשונית לצפי האבידות במקרה של התקפה גרעינית על ישראל בהנחת קיום התרעה קצרה (מס' דקות) אך בהיעדר הגנה יעילה.

בואו ננתח אם המספרים של מלחמת העולם השנייה סבירים גם לגבי ישראל כיום. צפיפות האוכלוסייה בארץ לא גבוהה במיוחד. רק בכמה ערים הצפיפות עולה כיום (2017) על 10,000 איש/קמ"ר, כגון בבני ברק (מעל 22,000 איש/קמ"ר), גבעתיים (כ-17,000), בת-ים (גם כ-17,000) ורמת-גן (כ-11,000). צפיפות האוכלוסייה בת"א הינה 7.8 אלף איש/קמ"ר, בירושלים – כ-6.5, פתח-תקווה – מתחת ל-6, חיפה – קצת מעל 4. המגמה לתנועת האוכלוסייה

והתשתיות לפריפריה קיימת כבר עכשיו עקב סיבות כלכליות, ובעתיד צפויה להתחזק – מה שיעשה את מדינת ישראל חסינה עוד יותר.

נדון בעוצמת הנשק הגרעיני. אמנם נכון שכיום קיים בעולם נשק תְּרָמוֹ-גרעיני (פצצת מימן) שהוא חזק יותר, אבל נשק תְּרָמוֹ-גרעיני גם מסובך ויקר הרבה יותר (כאמור בפרק 2 לעיל, ניתן לומר בפשטות כי פצצת אטום מהווה נְפֶץ בלבד של פצצת מימן). פצצת מימן גם אינה ניתנת למזעור בקלות: זה דורש רמה טכנולוגית גבוהה מאוד. כך, למשל, הישגי ארה"ב בתחום מזעור הנשק הגרעיני (איור 8) מרשימים בהרבה מהישגי ברית המועצות. עקב כך פצצת מימן דורשת ככלל שימוש בטילים מיוחדים או מטוסים. פצצות חזקות במיוחד פשוט לא יעילות. נזכיר כי התפוקה הממוצעת של המלאי הגרעיני של ארה"ב הייתה כ- 240 ק"ט.

יש עניין נוסף: פיתוח נשק תרמו-גרעיני דורש זמן ומאמץ רב. הניסיון ההיסטורי מלמד כי פיתוח פצצת מימן על גבי פצצת אטום דורש זמן שקול לזה שדרוש לפיתוח פצצת אטום. לדוגמה, ברה"מ פיתחה פצצת אטום תוך 4 שנים (1945–1949) ואחר כך פצצת מימן – עוד 5 שנים (1949–1954) במלוא המאמץ (אגב, תכניות גרעיניות של מדינות בזירתנו ארכו עשרות שנים). וגם בתרחיש פצצת מימן יש לזכור כי טווח ההרס של פצצת 1 מ"ט (1000 ק"ט) גדול פי 4 בלבד מטווח ההרס של פצצת אטום בעלת תפוקה של 20 ק"ט (ראה פרק 2 לעיל), כך שיעיל יותר להטיל 15 פצצות של 20 ק"ט מאשר אחת של 1000 ק"ט.

עוד עניין. ציינו לעיל כי פצצת אטום יעילה יותר בהריגת אנשים מאשר בהריסת מבנים. למשל, טווח הרס הממ"דים (20 ק"ט) – כ-0.5 ק"מ, ואילו הקרינה מסוכנת בממ"דים ששרדו עד כ-1 ק"מ. אבל עוצמת הקרינה הגרעינית דועכת באוויר מהר יותר מלחץ-יתר של גל ההדף. כך שלפצצת 1000 ק"ט טווח הקרינה המסוכנת כבר קצר יותר מטווח הרס הממ"דים. הערכה ראשונית מראה שהיקף ההרג של פצצת 1000 ק"ט ניתן להשיג ע"י 7 או 8 פצצות 20 ק"ט בלבד.

וחשוב מזה – במדינת ישראל יש רק מטרה אחת בפועל לפצצת מימן – הטבעת הפנימית של גוש דן: בירושלים ובחיפה פצצת מימן לא צפויה להיות יעילה עקב תבליטן ההררי.

נציין גם כי ההערכה של 300 אלף הרוגים מ-80 פצצות אטום נעשתה על סמך ניסיון יפן בלבד, שם רובם המוחלט של הבניינים היו "בנייה קלה" והתוצאות בהתאם (ראה איור 9). לא נלקח בחשבון כי בעיר מערבית מודרנית מבני בטון בולעים ומפזרים את גל ההדף. תופעת החלשת גל ההדף בסביבה עירונית צפויה לצמצם את היקף האבידות בעשרות אחוזים. על כל פנים, חוסר הוודאות לגבי מספר כלי הנשק הגרעיניים ודיוק פגיעתם גדול מזה הקשור לתפוקתם.

גם לגבי כמות פצצות האטום שהאויב יכול להפעיל נגדנו, יש הגבלות טבעיות. נזכיר כי לסיין – מעצמה ענקית – יש לפי הערכות פחות מ-300 כלי נשק גרעיניים. מה שחשוב עוד יותר: אין בישראל "מספיק" מטרות הראויות להפעלת מאות פצצות גרעיניות. למשל, מספר העיריות (דהיינו ערים בעלות 20 אלף תושבים ויותר) מסתכם כעת (2026) ב-75 בלבד.

לסיכום ניתן לומר כי בתרחישים הגרועים ביותר – מאות פצצות אטום בהיעדר הגנה אזרחית יעילה – אבידותינו יכולות להגיע עד כדי 10% מכלל האוכלוסייה. אבידות בסדר גודל כזה קשות מאוד אך אינן חסרות תקדים. הגנה אזרחית יעילה צפויה להוריד את מספר הנפגעים בסדר גודל ויותר כפי שנידון בפרק הבא. הדיון בהיבטים הכלליים של מלחמה גרעינית מובא בפרק 8 להלן. המעוניינים בפרטים נוספים מוזמנים לעיין בנספח A-1 "אתגרים של עולם גרעיני רב-קוטבי" (באנגלית).

6. יעילות ההגנה האזרחית

אף אחד לא רוצה להימצא בסביבת פיצוץ גרעיני ואנחנו מאחלים לכולנו שלא לעבור את החוויה הזאת. אבל בהחלט יש לדעת שאפשר לעבור אותה. מי שיימצא קרוב מדי לפיצוץ – ייהרג. אין מזה מנוס. זה נכון גם לגבי כל טיל, פצמ"ר או מטען חבלה, וזאת הסיבה שממ"ד תקני לא מיועד להגן בפני פגיעה ישירה של טיל. אולם במרחקים גדולים יותר (במעגלים רחבים בהרבה) – יש חשיבות רבה להתנהגות נכונה. מי ששומר על קור-רוח, מי שידע מה עליו לעשות ופועל בהתאם – מציל את עצמו וגם רבים אחרים: גם הם מושפעים מביטחוננו, פועלים כמוהו וניצלים.

ניתן לצמצם משמעותית את מספר הנפגעים על ידי פעולות פשוטות למדי כגון מיגון האוכלוסייה ופיזור. למסקנה זו הגיע דו"ח חיל האוויר של ארה"ב המסכם את תוצאות מלחמת העולם השנייה:

"...עם כל ההתפתחות הצפויה של ההגנה האווירית, יהיה בלתי אחראי לצפות כי אף מטוס או טיל של האויב לא יוכל לחדור ...

כיוון שכך, עלינו להפחית במידת האפשר את פגיעותנו להתקפה כזאת. הן הניסיון של המלחמה באירופה והן זה של המלחמה באוקיאנוס השקט מצביעים על ההיקף המשמעותי בו הגנה אזרחית יכולה להפחית את הנזק. את האבידות האזרחיות ניתן לצמצם – על ידי שימוש בשיטות ידועות ובדוקות – פי 20 או יותר. השיטות האלה – אין משמעותן לשים הכול מתחת לאדמה, אך כן מדובר בפינוי מוקדם, ביזור, התרעה, מקלטים ותכנית חילוץ והצלה. את הבסיס לכל אלה ניתן ליצור אך ורק בעת שלום. ניתוח תוצאות ההפצצות האטומיות של הירושימה ונגסאקי מעלה כי כל האמור נכון בדיוק באותה מידה – ומשמעותי הרבה יותר – בעידן של פצצות אטום. כמו כן, ניתן להגביר פלאים את חסינות הכלכלה על ידי תכנית מחושבת של מלאי חירום, ביזור, והקשחה של תשתיות חיוניות. תכנית כזאת גם כן ניתנת לפתח אך ורק בעת שלום."

מסקנות אלו נכונות בהחלט גם למקרה הישראלי. ממ"דים ובמיוחד מקלטים תת-קרקעיים (כאלה שמצויים בחצרות של בתי ספר ובתי מגורים בשכונות ותיקות) צפויים לצמצם את כמות הנפגעים עד כדי סדר גודל ביחס לתרחיש של התקפת פתע. הערכות ראשוניות מראות כי בתרחיש שכל האוכלוסייה מוגנת על ידי ממ"דים, צפי ההרוגים בתל-אביב הינו כ-15,000. בתרחיש של 45% מתפנים, 25% במקלטים תת-קרקעיים ו-30% בממ"דים, צפי ההרוגים יורד לכ-5000.

פיזור האוכלוסייה יעיל עוד יותר. ברור שככול שפחות אנשים יימצאו באזור הפגיעה, כך יפחת מספר האנשים שייפגעו. אם כ-25,000 אנשים צפויים

להיהרג באזורים צפופים של תל-אביב (בהנחת צפיפות של 11,000 איש /קמ"ר), הערכה ראשונית מעלה כי באזור עירוני צפוף פחות (כגון פתח-תקווה – 6000 איש /קמ"ר, תיתכן פגיעה בשטחים פתוחים עקב דיוק סופי של הנשק) צפי ההרוגים הוא כ-7000. ובאזור כפרי מאוכלס (1000 איש /קמ"ר, שטחים פתוחים נרחבים מסביב) – פחות מ-1000. מיגון האוכלוסייה המפוזרת צפוי להקטין עוד יותר את מספר הנפגעים.

פיזור האוכלוסייה יכול להתבצע תוך שעות ספורות אם תינתן התרעה מוקדמת על ההתקפה (תרחיש מסתבר). יש לציין גם חשיבות פיזור הדרגתי בטווח של שנים של אוכלוסיית גוש דן וביזור התשתיות הן מהבחינה הביטחונית (כל תרחיש) והן מבחינות אחרות – כלכלה, אקולוגיה, דמוגרפיה ועוד.

7. מודעות ומוכנות

מאמץ שיושקע בהגנה האזרחית יכול להיות יעיל מאוד כמו שנידון לעיל – צמצום האבידות בסדר גודל ויותר. בנוסף להצלה ישירה של חיים ורכוש, יש כאן גורם פסיכולוגי לא מבוטל. פעילות רחבת ממדים בתחום ההגנה האזרחית תעלה את רמת מודעות הציבור, וכך תמנע בהלה אשר כשלעצמה עלולה לגרום לאבידות רבות (כמו בלונדון ב-1940) ואף גרוע מזה – לכניעה ללא לחימה (כמו צ'כוסלובקיה ב-1938).

כפי שנאמר לעיל, קשה לשלול לחלוטין את האפשרות כי תוקפן זה או אחר ישיג נשק גרעיני. ואז אחד מגורמי ההרתעה המרכזיים הוא היכולת לספוג התקפה גרעינית ולצמצם את השלכותיה עד כמה שאפשר. אם תוקפן פוטנציאלי ידע כי תוצאות התקפתו יצומצמו לנזק ישיר בלבד ולא יובילו לקריסת האומה – הוא כנראה יעדיף לא להסתכן בתגובת הנגד המוחצת. כמו שכתב אֶדְוַאָרְד סְלֶר, "הגנה אזרחית לא תמנע את סכנת המלחמה הגרעינית. אך היא תקטין משמעותית את ההסתברות שהמלחמה תפרוץ".

הגנה אזרחית מתבססת באופן טבעי על אנשים מן השורה. כך שאתם יכולים לתרום תרומה חשובה לביטחונכם האישי ולחוסן המדיני ע"י דברים פשוטים יחסית כגון:

- תדברו עם בני המשפחה (ובהזדמנויות מתאימות – גם עם חברים, מכרים, עמיתים לעבודה) על כך שאין השד הגרעיני נורא כל כך כפי שמציירים אותו, ושהשד מדנית ישראל לא עומדת על הפרק.
- תחשבו מראש כיצד ייראו החיים במשך יום-יומיים במקלט וגם לאחר מכן. תגלשו במרשתת, תדברו על זה, תצטיידו בהתאם.

- תצטיידו בדברים הנחוצים בשעת חירום: מים (לפחות 2 ליטר לאדם ליממה), דלי נסגר או סיר לילה (כשירותים מאולתרים), אמצעי היגיינה (מגבונים, מפיות, חומרי חיטוי כגון כוהל ו/או "אקונומיקה"), עזרה ראשונה ועוד. אין צורך באיטום המקלט – האוויר לא הופך למזוהם.
- כשאתם שוקלים לעבור דירה, קחו בחשבון גם את שיקולי ההגנה האזרחית. עדיף לגור במקום פחות צפוף, יותר רחוק ממרכז העיר, בבית בנוי בטון יצוק (ולא בלוקים) עם ממ"ד מרווח.

ברמה מדינית – ניסיון של מדינות זרות (במיוחד שוויץ) מראה כי מאמץ ההגנה האזרחית – בהיותו אמנם מאמץ לאומי – לא חייב להתבצע על ידי המדינה מכספי משלמי המסים. דהיינו, המדינה יכולה לספק המלצות ותקנים (לבניית מקלטים ועוד) ולהבטיח הטבות למיניהן (כגון הטבות מס) למיישמי המלצות אלה. על ידי כך הוצאות המדינה קטנות והיעילות עולה. בין ההמלצות הכלליות ניתן למנות:

- פיזור האוכלוסייה והתשתיות בטווח ארוך של שנים
- מעבר לשיטות בנייה קשיחות יותר (למשל, בטון יצוק במקום בלוקים), חיזוק בניינים קיימים (יישום תמ"א 38 ע"י הוספת מגדלי ממ"דים) או בנייה מחדש (פינוי-בינוי).
- הכשרת ממ"דים לשהייה של יום-יומיים, שדרוג מבנים תת-קרקעיים (חניונים, מנהרות וכו') לשימוש דו-תכליתי
- הקשחתן של תשתיות חיוניות (כולל נושא EMP)

אי אפשר להעריך בדיוק עד כמה המאמץ שהשקיעה ארה"ב בתחום ההגנה האזרחית (שהיה, אגב, מוגבל מאוד) תרם לכך שלא פרצה מלחמת עולם שלישית מתוך המלחמה הקרה. אך עובדה היסטורית היא, שלא פרצה. במקום זה ברה"מ התפרקה.

8. על מלחמה גרעינית

הרולד מקמילן, ראש ממשלת בריטניה בשנים 1957-1963, כתב בזכרונו: "ב-1938 כולנו חשבנו על תקיפות אוויריות כמו שעכשיו חושבים על מלחמה גרעינית"⁸. בין שהמחבר התכוון לכך בין שלא, ניתן להמשיל את מקומה של לוחמה גרעינית במלחמות עתידיות למקומה של לוחמה אווירית במלחמת העולם השנייה: זה גורם חשוב ביותר, מכריע במידה רבה – אך בשום פנים ואופן לא מכריע מלחמה כשלעצמו.

היקף האבידות הצפויות במלחמה גרעינית מגיע – בתרחיש הכי גרוע – לכ- 10% מכלל האוכלוסייה. אבידות בסדר גודל כזה הינן קשות מאוד, אך אינן חסרות תקדים: ניתן להיזכר לשם כך ביוגוסלביה, פולין וברה"מ במלחמת העולם השנייה. כל עוד רוח האומה חיה – אבידות בגופה לא גורמות לאובדן עצמאותה.

מלחמה גרעינית יש חשיבות עליונה להכנות ארוכות טווח, תכנון מדוקדק וביצוע מהיר ויעיל של השלב המכריע (גיוס כללי ותחילת הלחימה) – אבל כל זה נכון לגבי כל מלחמה, לאו דווקא גרעינית. החידוש העיקרי הוא כנראה מעורבות חסרת תקדים של האוכלוסייה האזרחית (פינוי הערים לצד הגיוס הכללי וכחלק ממנו).

הנשק הגרעיני אינו צפוי להיות יעיל (ככלל) נגד הכוחות המזוינים בשטח בגלל פיזורם ומיגונם היחסי. לכן, הקרבות עצמם צפויים להתנהל במתכונת כמעט רגילה, וגם קנה המידה של הזמן צפוי להיות אמנם קצר מהרגיל אך לא בסדר גודל. גם ריחוק החזיתות והיעדר גבול יבשתי אינם דברים חדשים – כך למשל התנהלו קרבות בזירת האוקיאנוס השקט או אפריקה במלחמת העולם השנייה, ואף המלחמות הפונייות (רומא – קרתגו) בעת העתיקה.

דוקטרינת בחירת מטרות בלוחמה גרעינית דורשת תשומת לב מרבית. סביר להניח כי אויבינו יפגעו במרכזי האוכלוסייה שלנו תוך הערכה נכונה שחיי אדם הם הערך הגבוה ביותר בחברתנו, ושעל ידי הרג הם יסבו נזק הגדול ביותר. התגובה הנכונה ככל הנראה לא צריכה להיות סימטרית. כידוע, עריצות אינה רגישה יחסית לאובדן חיי אדם, אלא אם האוכלוסייה הפגועה מהווה את בסיס הכוח שלה. עקב כך, בעוד שיש לפגוע באזורי התמיכה בממשלת אויב, יש לחסוך ככל האפשר את אזורי האופוזיציה. בהקשר זה, יש לשקול בכובד ראש פגיעה

⁸ McMILLAN, Harold. *Winds of Change 1914-1939*. London: McMillan 1966, p. 522.

במטרות בעלות ערך סמלי לאויב.⁹ כמו שכתב פרופ' מרטין ון קרפלד,¹⁰ "קדושתן של כנסיות ומקדשים דתיים אחרים נשמרת בקלות כאשר שיטת האמונות החילונית הרווחת מצביעה על כך שאין להם משמעות פוליטית... אולם ייתכן שכך לא תהיה השקפתם של הדורות הבאים."

אם מדברים על הבסת אויב עם תשתית תעשייתית רצינית, חשוב ביותר לשקול את הניסיון של בעלות הברית במלחמת העולם השנייה:

החשיבות של בחירה קפדנית של מטרות לתקיפה אווירית מודגשת על ידי הניסיון. הגרמנים היו מודאגים הרבה יותר מהתקפות על התעשיות והשירותים הבסיסיים שלהם – תעשיות נפט, כימיה ופלדה, או רשתות חשמל ותחבורה – מאשר מהתקפות על התעשייה הצבאית או ערים. ההתקפות החמורות ביותר היו אלה שהרסו תעשייה או שירות שהיה חיוני לתעשיות אחרות. הגרמנים מצאו שחשוב בהרבה לתכנן אמצעים להגנה על תעשיות ושירותים בסיסיים מאשר להגנה על מפעלים המייצרים מוצרים מוגמרים.¹¹

החלטה לצאת למלחמה גרעינית אינה החלטה קלה למדינה דמוקרטית, אך גם אינה שונה בתכלית מהחלטה לצאת למלחמה קונבנציונלית (כגון מלחמת ששת הימים) או אף לפעולה נגד טרור (כגון מלחמת לבנון השנייה). בכל אלה יש בסופו של דבר אותה ברירה: ליזום מאמץ, סבל ואבידות כאשר תמיד יש תקווה (או אשליה) כי הבעיה תיפתר ללא לחימה – או לחלופין ליטול סיכון שהאבידות והסבל יהיו גדולים בהרבה אם האויב הוא שייזום את הלחימה.

לאור האמור לעיל מעניין להביא את דבריו של יוהנס זימס (Johannes Siemes), כומר קתולי ששהה בהירושימה וחווה על בשרו את ההפצצה הגרעינית:

אנחנו דנו בינינו על אתיקת השימוש בפצצת אטום. אחדים התנגדו לשימוש בה נגד האוכלוסייה האזרחית. אחרים סברו כי במלחמה טוטלית, כמו ביפן, אין הבדל בין חיילים לאזרחים. הפצצה הוכיחה את עצמה כאמצעי

⁹ FREILICH, Chuck. *The Armageddon Scenario: Israel and the Threat of Nuclear Terrorism*. Ramat Gan: The Begin-Sadat Center for Strategic Studies, 2010, p. 25. Available at: <https://besacenter.org/wp-content/uploads/2010/04/MSPS84.pdf> Accessed Mar 10, 2026.

¹⁰ CREVELD, Martin van. *The Transformation of War*, NY: The Free Press, 1991, p. 203. ISBN-10: 0029331552

¹¹ *United States Strategic Bombing Survey Summary report (European War)*, [online] Washington D.C., 15 Sep 1945, p. 16. Available at: <http://www.anesi.com/ussbs02.htm> Accessed Mar 10, 2026.

יעיל להפסקת שפיכות הדמים בזה שהיא גרמה ליפן להיכנע ולהינצל מהרס מוחלט. לי אישית נראה הגיוני כי מי שתומך במלחמה טוטלית, אינו יכול כלל לבוא בטרונייה בעניין המלחמה נגד אזרחים.¹²

לצערנו, כאשר תוקפן זה או אחר שואף לניצחון בכל מחיר, החלופה היחידה למלחמה טוטלית בו הינה כניעה. על אפשרות הכניעה לא כדאי לדון ברצינות: בנוסף להיבט העקרוני, הכניעה בדרך כלל גורמת לאובדן וסבל קשים בהרבה ממחיר הלחימה עבור החירות. שואת יהודי אירופה הינה חוליה בולטת – אך חוליה אחת בלבד – בשרשרת ארוכה של תקדימים היסטוריים המוכיחים כי, כמו שאמר המשורר גֶתֶה (J.W.Goethe):

רק הוא ראוי לחיים ולחופש –
ההולך מדי יום לכובשם מתחילה.

¹² *The Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki*. Manhattan Engineer District, 1946, p. 54. Available at: https://www.atomicarchive.com/resources/documents/med/med_chp25.html Accessed Mar 10, 2026.

אחרית דבר

הנביא ישעיהו אומר (ב, ב – ד) :

והיה באחרית הימים, נכון יהיה הר בית ה' בראש ההרים, ונישא מגבעות, ונהרו אליו כל הגויים. והלכו עמים רבים ואמרו, לכו ונעלה אל הר ה', אל בית אלוהי יעקב, ויורנו מדרכיו, ונלכה באורחותיו; כי מציון תצא תורה, ודבר ה' מירושלים. ושפט בין הגויים, והוכיח לעמים רבים; וכיתתו חרבותם לאיתים, וחניתותיהם למזמרות; לא ישא גוי אל גוי חרב, ולא ילמדו עוד מלחמה.

כמעט שלושת אלפים שנה מאוחר יותר, במעמד קבלת פרס נובל אמר פרופ' ישראל אומן :

ישעיהו אומר כי העמים יכולים לכתת חרבותם לאיתים כאשר יש ממשלה מרכזית – אל אשר כולם מכירים בו. כאשר אין זה המצב, עדיין יכול לשרור שלום – אף גוי לא ישא חרב אל גוי אחר. אך החרבות חייבות להישאר – אי-אפשר לכתת אותן לאיתים – וחייבים להמשיך ללמוד מלחמה, כדי לא להילחם!¹³

¹³ Isaiah is saying that the nations can beat their swords into ploughshares when there is a central government – a Lord, recognized by all. In the absence of that, one can perhaps have peace – no nation lifting up its sword against another. But the swords must continue to be there – they cannot be beaten into ploughshares – and the nations must continue to learn war, in order not to fight!

קריאה מומלצת

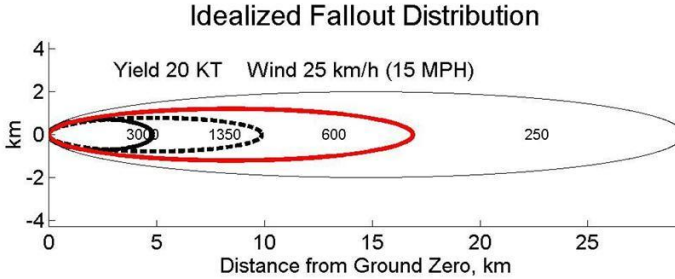
1. צה"ל, אגף המטה הכללי. הנשק הגקעיני והלחימה בעידן הגרעיני. תל-אביב תשכ"ד 1963. מספר מערכת בספריה הלאומית
990023123120205171

https://www.nli.org.il/he/books/NNL_ALEPH990023123120205171/NLI

2. Yehoshua Socol, Yuri Gofman, Moshe Yanovski and Binyamin Brosh. *Assessment of probable scenarios of radiological emergency and their consequences*. International Journal of Radiation Biology **96/11** (2020), 1390-139.
<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1798544>
3. Harold L. Brode. *A Survey of the Weapons and Hazards Which May Face the People of the United States in Wartime*. The RAND Corporation, **P-3170** (1965).
4. *Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation*. 2nd edition, US Federal Emergency Management Agency (2010).
5. Cresson H. Kearny. *Nuclear War Survival Skills*. Oak Ridge National Lab (1977). 3rd edition: Oregon Institute of Science & Medicine (1999).

נספחים

נספח א'. זיהום רדיואקטיבי – נתונים טכניים



תמותה ב-%

—————	—————	—————	
100%			10-100%	בחוץ/אוהל
100%	50-100%	0-50%	מחלה קלה	בית צמוד קרקע
מחלה קלה		אין תופעות	PF=20	קומה 3 מתוך 5
אין תופעות			PF=40	ממ"ד

המספרים על יד הקווים באיור מייצגים מנת קרינה ביחידות דנטגן (R, רי) לאדם בשטח פתוח, 24 שעות ביממה. בית צמוד קרקע – בהנחת היעדר ממ"ד וכל מחסה אחר, מקדם ההגנה PF=2-3. בית 4-5 קומות בהנחת הימצאות בקומות אמצעיות – PF=20.

מנה קטלנית LD₅₀ (מחצית המוקרנים מתים בהיעדר טיפול רפואי) נחשבת כ-400 רנטגן. טיפול רפואי יעיל עד כ-600 רנטגן.
 זמן הכניסה למחסה: עד שעה אחרי הפיצוץ (עדיף עד חצי שעה).
 זמן שהייה במחסה: עד כיומיים, כאשר עוצמת הקרינה יורדת פי 100 (כעבור יממה – פי 30).

הזיהום: עוצמת הקרינה יורדת פי 1000 תוך כ-14 יום, פי 100,000 – תוך שנה. אחרי שנה אחת, אפילו באזורים המזוהמים ביותר ואפילו ללא גשמים, טיהור וכו', עוצמת הקרינה צפויה לרדת מתחת לסף הנזק של 0.2 ר' /יום (ראה פרק 1.4).

זהום רדיואקטיבי מול זיהום כימי – טבלת השוואה

זיהום כימי	זיהום רדיואקטיבי	
<p align="center">צריך איטום הרמטי</p>	<p align="center">אין צורך באיטום הרמטי קרינה מייננת מתפשטת בקו ישר ממקורה – גרגרי נשורת הנמצאים על הקרקע ומשטחים אופקיים או משופעים</p>	1
<p align="center">צריך לסנן אוויר</p>	<p align="center">אין צורך בסינון אוויר גרגרי נשורת (גודלם כ-0.1 מ"מ) אינם נישאים ע"י רוח מצויה. אפילו שבירת חלונות לא פוגעת משמעותית במיגון. מכל מקום מסנן אבק רגיל (pre-filter) מספיק</p>	2
<p align="center">מחיצת ניילון או חליפת מגן מספיקה</p>	<p align="center">צריך מיסוך עבה. אין חליפות מגן 30 ס"מ בטון או 45 ס"מ אדמה או 9.5 ס"מ פלדה מחלישים את הקרינה פי 40. כל 5.6 ס"מ בטון מחלישים את הקרינה פי 2 (עובי המחצית)</p>	3
<p align="center">כל היחשפות עלולה להיות מסוכנת</p>	<p align="center">היחשפות קצרת-זמן אינה מסוכנת קרינה בעוצמת 600 רנטגן לשעה אשר קטלנית בוודאות בהיחשפות למשך שעה, לא גורמת למחלת הקרינה כלל בהיחשפות של 5-10 דקות.</p>	4
<p align="center">זמן השהייה במקלטים עד כ-3 שעות</p>	<p align="center">זמן שהיה במקלטים 24 שעות לפחות</p>	5

יחידות שונות של מנת קרינה לצורך השוואה

1 rem \approx 1R (רנטגן)

1 rem = 1/100 Sv = 10 mSv = 10,000 μ Sv

Sv = Sievert (זינרְט)

LD₅₀ \approx 400 rem = 4 Sv = 4000 mSv

רמות סיכון להיחשפות מיידית

400 R \approx 400 rem = 4 Sv = 4000 mSv	מנה קטלנית LD₅₀
200 R \approx 200 rem = 2 Sv = 2000 mSv	סף מחלת קרינה מסוכנת
100 R \approx 100 rem = 1 Sv = 1000 mSv	סימני מחלת הקרינה (חולשה, הקאות וכו')
25 R \approx 25 rem = 0.25 Sv = 250 mSv	סף שינויי ספירת דם
5 R \approx 5 rem = 0.05 Sv = 50 mSv	סף סיכון רדיולוגי עפ"י ANS ו-HPS

ANS – American Nuclear Society

HPS – Health Physics Society (US)

סף סיכון רדיולוגי עפ"י המלצות ICRP 1931

0.2 רנטגן/יום = 70 רנטגן/שנה

0.2 R/day \approx 0.01 R/h \approx 70 R/year \approx 700 mSv/year

הערה: ועדת ICRP (International Commission on Radiological Protection) שינתה את עמדתה ב-1958 ועד היום סוברת כי לנזקי הקרינה אין סף. יחד עם זאת, ההערכות של 1931 כנראה נכונות – ראה דיון בפרק 1.4 לעיל.

נספח ב'. רשימת מונחים בתחום הלוחמה הגרעינית

מונח אנגלי	עמ'	מונח עברי	
		כללי	
nuclear war		מלחמה גרעינית	.1
nuclear warfare		לוחמה גרעינית	.2
nuclear fighting		לחימה גרעינית	.3
		פיזיקה גרעינית	
proton	16	פרוטון	.4
neutron	16	ניטרון	.5
isotope	16	איזוטופ	.6
nuclear fission	17	בקוע גרעיני	.7
fission products	18	תוצרי בקוע	.8
nuclear fusion	18	מזוג גרעיני	.9
		נשק גרעיני	
nuclear weapon / nuclear weapons	32	קלי נשק גרעיני / קלי נשק גרעיניים	.10
warhead	27	ראש נפץ	.11
atomic bomb (fission weapon)	17	פצצת אטום נשק אטומי (נשק ביקוע גרעיני)	.12
hydrogen bomb (fusion weapon)	18	פצצת מימן (נשק מיזוג גרעיני)	.13

		פיצוץ גרעיני	
yield	25	תפוקה	.14
kiloton (KT)	25	קילו-טונה (ק"ט)	.15
megaton (MT)	25	מגה-טונה (מ"ט)	.16
burst point	30	נקודת הפיצוץ	.17
surface burst	34	פיצוץ קרקעי	.18
air burst	34	פיצוץ אווירי	.19
high-altitude burst	34	פיצוץ ברום גבוה	.20
epicenter / ground zero	30	מוקד הפיצוץ / נקודת האפס	.21
fireball	18	כדור להט	.22
fallout	19	נשורת	.23
		גורמי הפגיעה של פיצוץ גרעיני	
blast wave	34	גל הדף	.24
thermal radiation	36	קרינה תרמית	.25
initial nuclear radiation	37	קרינה גרעינית (מייננת) מיידית	.26
residual nuclear radiation/ fallout radiation	37	קרינה גרעינית משתיירת / קרינת נשורת	.27
electromagnetic pulse (EMP)	39	דפק אלקטרומגנטי (דוא"מ)	.28

		קרינה גרעינית	
ionizing radiation	17	קרינה מיננת	.29
α -radiation	17	קרינת אלפא	.30
β -radiation	17	קרינת בטא	.31
γ -radiation	17	קרינת גמא	.32
radioactive decay	16	דעיכה רדיואקטיבית	.33
half-life time	16	זמן מחצית חיים	.34
shielding	38	מסוד	.35
attenuating / attenuation	38	הנחתה / נחות	.36
half-value thickness	53	עובי המחצית	.37
protection factor (PF)	38	מקדם הגנה	.38
radiation sickness / acute radiation syndrome (ARS)	19	מחלת הקרינה	.39

Appendices

A-1 נספח

Challenges of a Multi-Polar Nuclear World

<http://DefenceAndStrategy.eu/en/archive/volume-2012/1-2012/articles/challenges-of-a-multi-polar-nuclear-world.html>

A-2 נספח

Commentary: Ethical Issues of Current Health-Protection Policies on Low-Dose Ionizing Radiation

<http://dx.doi.org/10.2203/dose-response.13-044.Socol>

A-3 נספח

Chernobyl's Legacy: Black Prophecies' Bubble

<http://AFNA-forum.org/Chernobyl.pdf>

A-4 נספח

Low-Dose Ionizing Radiation: Scientific Controversy, Moral-Ethical Aspects and Public Choice

<http://AFNA-forum.org/LowDose-IJNGEE.pdf>