



**נשק
גרעיני
אפקטים
ומיגון**

תא"ל אבושוי כ"ץ וסגן צבי סלע

ב-6 באוגוסט 1945 הוטלה על הירושימה ביפן הפצצה הגרעינית, שהביאה למותם של 70,000 בני אדם, לפציעתם של 50,000 בני אדם ולהריסתם של 65,000 בתים. שלושה ימים מאוחר יותר, ב-9 באוגוסט 1945, הוטלה הפצצה הגרעינית השנייה, על נאגאסקי ביפן וגרמה למותם של 40,000 בני אדם ולפציעתם של 40,000 נוספים. עצמת הפצצות שהוטלו על הירושימה ועל נאגאסקי הייתה 20 קילוטון כל אחת, שהם שווי ערך ל-20,000 טון חנ"ם. כיום קיימות פצצות גרעיניות, שעצמתן מגיעה למאות קילוטון ואפילו למאה מגטון (עצמה השווה למאה מיליון טון חנ"ם), ולא מן הנמנע שאם תתרגש על אזורנו מלחמה, ייעשה במהלכה שימוש בנשק מסוג זה מצד מדינות האויב. אפשרות זו מעוררת את הצורך לבחון את ההשפעות העיקריות של הנשק הגרעיני ואת האמצעים שניתן לנקוט כדי להתגונן בפניו השפעות אלה.

השפעות הפיצוץ הגרעיני

נשק גרעיני דומה לנשק קונבנציונאלי בכך שעיקר פעולת ההרס שלו נובעת מהדף ומהלם, אולם קיימים מספר הבדלים בסיסיים בין סוגי נשק אלה: הפיצוץ הגרעיני חזק באלפי ואף במיליוני פעמים מן הפיצוץ הקונבנציונאלי החזק ביותר. בנוסף לכך בפיצוץ גרעיני משתחרר חלק נכבד מן האנרגיה בצורת אור וחום או כפי שהתופעה נקראת בדרך כלל — קרינה תרמית. קרינה זו גורמת לכוויות ולדלקות במרחקים גדולים ביותר. זאת ועוד, הפיצוץ הגרעיני מלווה גם בקרינה חזקה ומוזיקה — קרינה גרעינית מיידית. ולבסוף, החומרים הנשארים לאחר הפיצוץ הגרעיני, הנקראים נשורת גרעינית, הם רדיואקטיביים, היינו פולטים קרינה גרעינית משך זמן ארוך. תופעה זו נקראת קרינה גרעינית שרידית.

הבדלים עקרוניים אלה בין פיצוץ גרעיני לבין פיצוץ קונבנציונאלי דורשים התייחסות מיוחדת לפיצוץ הגרעיני, ובמיוחד לתופעת הקרינה הנגרמת על-ידי הפיצוץ.

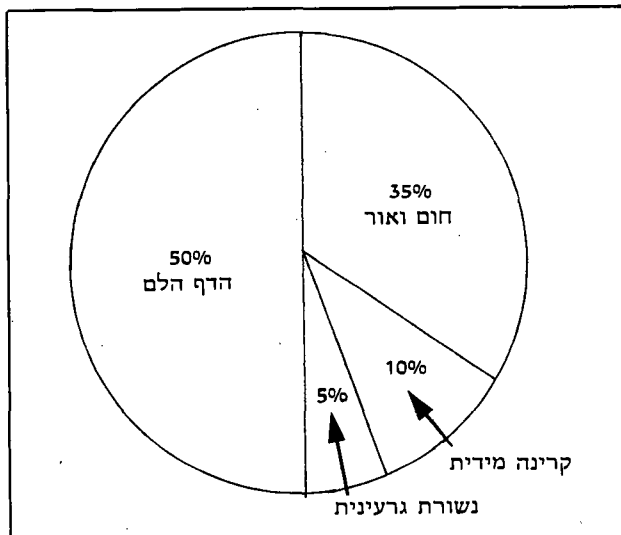
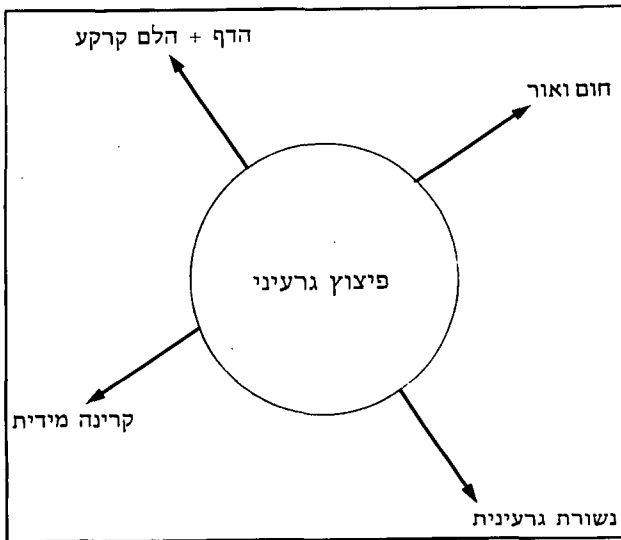
הדף האוויר

עם הפיצוץ הגרעיני נוצר כדור אש, שיש בו לחצים של מאות אלפי אטמוספירות. בגלל כדור האש לחץ אטמוספירי חיצוני רגיל. חזית גל ההדף ניתנת לתיאור כקליפה כדורית דקה, שבתוכה קיימת קפיצת לחץ מן הלחץ האטמוספירי בצד החיצוני ללחץ השיא בצד הפנימי. קליפה זו הולכת ומתקדמת מכיוון הפיצוץ והלאה. עם התקדמות גל הלחץ יורד לחץ השיא של חזית הגל.

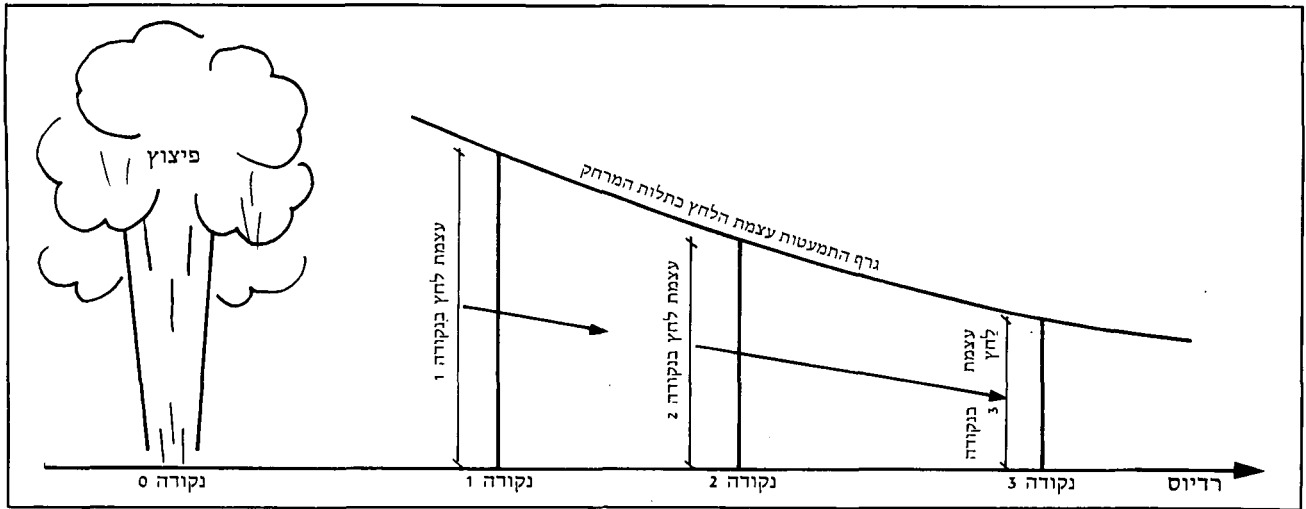
עם הגעת גל ההדף לאתר מסוים עולה הלחץ לשיאו. רוח חזקה תנשב מכיוון הפיצוץ. הלחץ יורד במהירות וחוזר לעצמתו הרגילה. משך הזמן בו שורר לחץ יתר הוא בין חצי שנייה לשנייה לפצצת 20 קילוטון ו-2 עד 4 שניות לפצצת 1 מגטון. יש לזכור שמשך גל ההדף בפיצוץ קונבנציונאלי הוא כמה אלפיות שנייה בלבד. משך הזמן הארוך של גל ההדף מפיצוץ גרעיני מקנה לגל זה את כוח ההרס העצום שלו. הלחץ ממשיך לרדת ומגיע לעצמה הנמוכה מן הלחץ האטמוספירי הרגיל. תופעה זו נקראת "ניקה". היא נמשכת כמה שניות ועצמתה קטנה מעצמת לחץ היתר ולכן הנוזקים הנגרמים בעטייה הם קטנים יותר. עם תום תקופת תת הלחץ, חוזר המצב לקדמותו. לגל ההדף מתלוות רוחות חזקות הגורמות נזקים למבנים. תופעה זו גורמת ללחץ דינאמי. עצמת הלחץ הדינאמי היא ביחס ישר לריבוע מהירות הרוח ולצפיפות האוויר שמאחורי חזית גל ההדף.

נזקי הדף לאדם
קיימים שני סוגים של נזקי הדף: נזק ישיר הנגרם לגוף האדם מעליית הלחץ הפתאומית, ונזק עקיף הנובע מפגיעת עצמים שהועפו או מהטלת הגוף כולו כנגד משטח קשה. נזק ישיר מעליית לחץ מופיע כבר בלחצי יתר של אטמוספירה אחת. בלחץ כזה יהיו נזקים לריאות. כבר בלחץ יתר של 0.3 אטמוספירות עלולים להיגרם נזקים לעור התוף. לחץ של 3.5 אטמוספירות הנמשך 0.1 שנייה יגרום לתמותה של 50 אחוזים מבני האדם בסביבה. לחץ יתר של 5 אטמוספירות הנמשך 0.1 שנייה יגרום לתמותה של 99 אחוזים מבני האדם בסביבה. גופים שונים מתרסקים עקב פגיעת גל ההדף ושבריהם מקבלים מהירויות גבוהות. עקב פגיעת גל הדף בלחץ של 0.1 אטמוספירות לדוגמה יהיה משקלם הממוצע של שברי זכוכית 1.5 גרם. מהירותם תהיה 30 מטרים בשנייה ומספרם 30 למטר ריבועי. גל הדף יכול לגרום להטלת הגוף כנגד משטחים קשים. מקובל להניח שמהירות פגיעה של 7.5 מטרים בשנייה במשטח קשה תגרום ל-50 אחוזים תמותה ומהירות 10 מטרים לשנייה תביא ל-99 אחוזים תמותה.

השפעות הפיצוץ הגרעיני



חלוקת האנרגיה בפיצוץ ביקוע טיפוסי



גרף דעיכת הלחץ כתלות במרחק

הלם קרקע

גל העיוותים והזעזועים המתקדם בתוך הקרקע בעקבות פיצוץ נקרא הלם קרקע. להלם הקרקע שני מקורות: הלם קרקע ישיר הנגרם על-ידי מכתש הפיצוץ, והלם קרקע מושך, הנגרם על-ידי פגיעת גל הדף האוויר. מידת הנוק הנגרם למבנה על-ידי הלם הקרקע תלוי בעצמת הפצצה, במרחק המבנה ממוקד הפיצוץ ומנקודת "אפס קרקע" (הנקודה על הקרקע בדיוק מתחת למוקד הפיצוץ). בסוג הקרקע, בהימצאות שכבות סלע או מי תהום, וכמובן בצורתו, בגודלו ובעומקו של המבנה. דעיכת גל הלם הקרקע מהירה בקרקעות יבשות ולא צפופות, ואיטית הרבה יותר בקרקעות צפופות או רוויות מים. שכבתיות הקרקע גורמת להחזרות של גלי ההלם ובכך מאריכה את זמן הדעיכה.

הקרינה התרמית

אחד ההבדלים העיקריים בין פיצוץ גרעיני לפיצוץ קונבנציונאלי הוא כמות האנרגיה העצומה המשתחררת בפיצוץ גרעיני בצורת קרינה תרמית (חום).

מעריכים, שהטמפרטורה בכדור האש של פיצוץ גרעיני מגיעה לעשרות מיליוני מעלות, בהשוואה לאלפי מעלות בלבד בפיצוץ חג"ם. קרינה מכדור האש הנעה במהירות האור, מעבירה את האנרגיה למרחקים עצומים בתקופות זמן אפסיות.

משך גל החום האפקטיבי מפצצת 10 מגטון הוא כ-30 שניות בעוד שפצצה בעצמה של קילוטון אחד תגרום גל חום הנמשך 0.3 שניות בלבד. עיקר ההרס בפיצוץ גרעיני נגרם על-ידי ההדף. אבל קרינה תרמית תורמת לנוק בהצתה של חומרים דליקים ובגרימת כוויות ונזקים לחלקי גוף חשופים במרחקים בהם השפעת ההדף והקרינה המיידית אינה משמעותית.

כוויות

הקרינה התרמית יכולה לגרום לכוויות בשתי צורות: כוויות ישירות על ידי פגיעת הקרינה בעור וכוויות על-ידי שרפות, שנגרמו בגלל הקרינה. רק לחמישה אחוזים מהניצולים ביפן, שסבלו מכוויות נגרמו הכוויות עקב שרפה. רובם נפגעו מכוויות ישירות של הקרינה התרמית.

קרינה גרעינית מידית

הקרינה הגרעינית המיידית היא הקרינה המשתחררת בעת הביקוע או בעת ההיתוך, כלומר בשעת הפיצוץ. המרכיבים המשמעותיים של הקרינה המיידית הם קרני גמא וקרינת נאטרונים הנוצרת משך דקה

תוצאות ההדף של פצצת 20 קילוטון המתפוצצת בגובה 600 מ' מעל פני הקרקע			
המרחק בק"מ	מאפס קרקע (הנקודה על הקרקע - מתחת לפיצוץ)	מנקודת הפיצוץ באוויר	לחץ יתר מקסימלי ק"ג/סמ"ר
0.6	0.0	3.5	הרס כל המבנים שחוקם ממוצע. מבני בטון מזוין ובונקרים מחזיקים מעמד.
0.8	0.5	2.0	הרס מבני לבנים, נזקים חמורים למבני בטון.
1.0	0.8	1.6	הרס מבני לבנים.
1.15	1.0	1.0	נזקים חמורים למבנים קלים (לבנים ומבני פלדה קלים).
1.65	1.5	0.5	נזקים חיצוניים למבנים קלים (סדקים בקירות, התמוטטות גנות).
4.05	4.0	0.1	שמשות מתנפצות.

טווח ההרס של פצצה גרעינית		
סוג ההרס	פצצת 20 קילוטון	פצצת 100 מגטון
השמדה מוחלטת - מכתש עומק מכתש	100 מטרים	1700 מטרים
הרס כולל, כל מבנה על קרקעי נהרס	20 מטרים	130 מטרים
הרס רציני לבתים, אשר את מרביתם לא ניתן לחקן	0.6 ק"מ	10 ק"מ
הרס חלקי לבתים	1.0 ק"מ	17 ק"מ
	4.0 ק"מ	68 ק"מ

בפצצת היתוך נובעת עיקר הקרינה השרידית מהשפעת השטף הגדול של הנאוטרונים על חומרים בסביבת הפיצוץ. האיום העיקרי של הקרינה השרידית נובע מיצירת נשורת הבנויה מחלקיקים מתוצרי הביקוע וחלקיקי אבק ומים המתפשטים עם הרוח.

גורם הזמן בהחלשת קרינה מנשורת גרעינית

לצורך הערכה ניתן להשתמש בכלל הבא:

כל אימת שתקופת הזמן שעברה מן הפיצוץ גדלה פי שבעה קטנה הקרינה פי עשרה: שבע שעות לאחר הפיצוץ הקרינה היא $1/10$ מן הקרינה שעה לאחר הפיצוץ. 49 שעות לאחר הפיצוץ הקרינה היא $1/100$ מן הקרינה שעה לאחר הפיצוץ. 343 שעות לאחר הפיצוץ הקרינה היא $1/1000$ מן הקרינה שעה לאחר הפיצוץ.

הסכנה העיקרית מקרינה שרידית היא חשיפת הגוף לקרינת גמא ממקורות חיצוניים או מגע עם חלקיקי נשורת גרעינית, העלולים לגרום לכוויות קרינה קשות. בשל זמן הקיום הקצר של רוב מרכיבי הנשורת הגרעינית תקטן מנת הקרינה לאחר שישה חודשים פי כמה אלפים. קיימת תופעה מסוכנת של נשורת מאוחרת. מדובר במיוחד בחומרים המופיעים במזון ונקלטים ברקמות הגוף. חומרים אלה נשארים משך זמן רב בתוך הגוף ומהווים סכנה פנימית חמורה. הן לקרינה המיידית והן לקרינה השרידית השפעה גנטית על האדם. בגלל הקרינה מתחוללים בתאי התורשה שינויים, שאינם מתגלים אלא בדורות הבאים. שינויים גנטיים הגורמים לתופעות חמורות יעלמו בדרך כלל לאחר כמה דורות כי האנשים הסובלים מהם לא יגיעו לשלב של העמדת צאצאים. הסכנה היא בשינויים לא קטלניים העלולים לגרום לבעיות במשך דורות.

האימפולס האלקטרומגנטי (E.M.P)

בזמן הפיצוץ הגרעיני משתחררת גם קרינה אלקטרומגנטית בארוכי גל של גלי רדיו, ולכן ידועה התופעה גם כ"הבזק רדיו". עצמת גלים אלה היא כזאת שביכולתם להרוס מערכות חשמליות כולל מערכות שידור וקליטה. התופעות החשמליות העיקריות הנגרמות על-ידי הפיצוץ הגרעיני הן שתיים: האימפולס האלקטרומגנטי, שהוא בעל משך זמן קצר ומתפשט במהירות האור. ברגע פגיעתו במוליך חשמלי מושרה במוליך זה מתח גבוה, הגורם למכות זרם חזקות. והגדלת צפיפות האלקטרונים בשכבות הגבוהות של האטמוספירה, תופעה העולה לשבש משך שעות עד ימים שידורי רדיו ורדאר ארוכי טווח.

צורות הפגיעה באנשים בפיצוצים הגרעיניים ביפן

כאשר דנים בהשפעת הפיצוץ הגרעיני על בני אדם, יש לזכור כי המידע הישיר היחיד העומד לרשותנו על פגיעה כזאת הוא מההפצצות בהירושימה ובנאגאסאקי. מידע זה נכון לגבי התנאים המיוחדים של הפיצוצים שהתרחשו במקומות אלה: פצצת 20 קילוטון בגובה כ-600 מטרים ובתנאי אקלים ושטח ששררו באותו רגע.

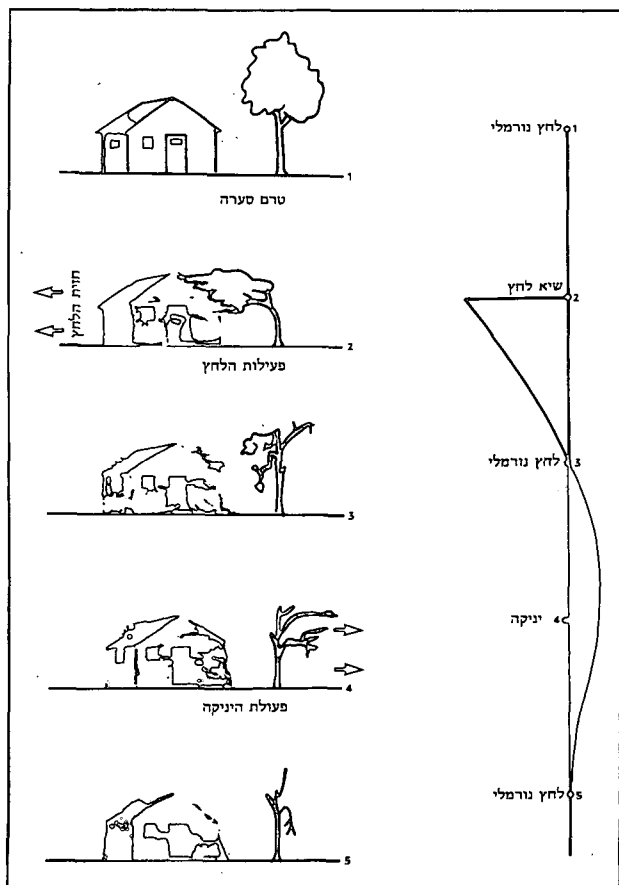
מעריכים כי 50 אחוזים ממקרי המוות היו תוצאה של כוויות. כ-30 אחוזים מן האנשים, שמתו בהירושימה, ספגו מנות קרינה קטלניות אם כי לא תמיד זו הייתה סיבת מותם. התמותה הגבוהה ביותר הייתה מקרב האנשים ששהו בחוץ בזמן הפיצוץ. מבני הבטון סיפקו הגנה טובה יחסית לאנשים בתוכם. מקרב האנשים שהיו בחוץ במרחק 1.3 ק"מ מנקודת אפס-קרקע היו 50% ניצולים לאחר 20 יום. מקרב האנשים ששהו בתוך מבני בטון שהיו מרוחקים 190 מטרים בלבד מנקודת "אפס קרקע" הגיע אחוז הניצולים ל-50% לאחר 20 יום.

צורת הפגיעות בין הניצולים

הדף (פציעות מכניות) 70%
 כוויות 65%
 קרינה רדיואקטיבית (מידית) 30%
 (סה"כ יותר ממאה אחוז בגלל מקרים רבים של פציעות אחדות באדם אחד).

טווח כוויות ושריפות

סוג הפצצה סוג הפיצוץ הנוק	20 קילוטון		100 מגטון	
	פיצוץ על באויר	פיצוץ על הקרקע	פיצוץ על באויר	פיצוץ על הקרקע
כוויות כוויות קשות ביותר לחלקי גוף חשופים	2.2 ק"מ	1.4 ק"מ	96 ק"מ	56 ק"מ
כוויות קשות	2.8 ק"מ	1.6 ק"מ	110 ק"מ	65 ק"מ
כוויות קלות	4.4 ק"מ	2.5 ק"מ	150 ק"מ	90 ק"מ
דלקות דלקות כלליות שריפות בחדות	0.8-2.6 ק"מ	0.6-1.6 ק"מ	15-70 ק"מ	14-47 ק"מ
	3.2 ק"מ	2.5 ק"מ	100 ק"מ	65 ק"מ

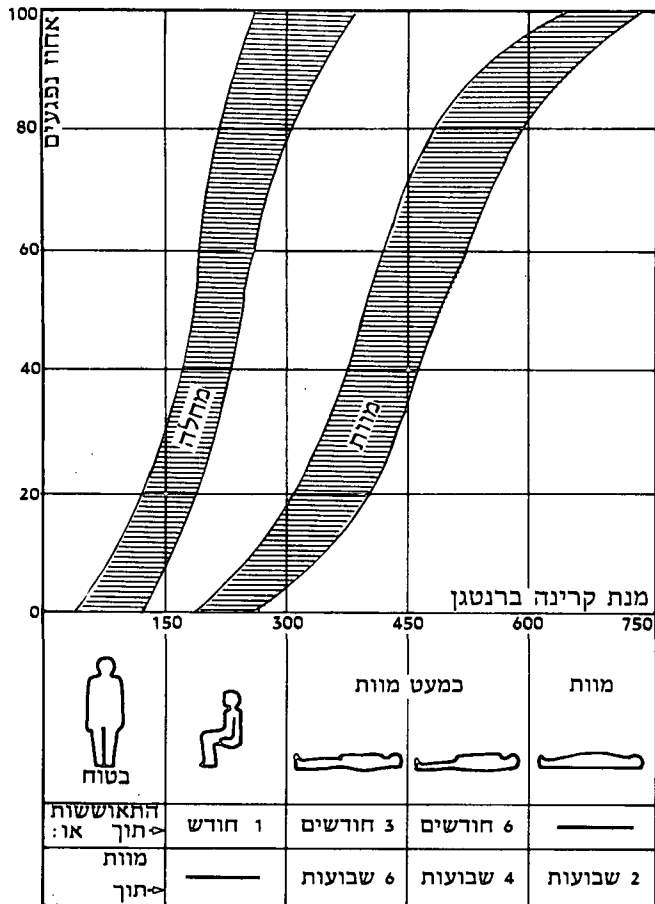


שינוי הלחץ עם הזמן במקום קבוע

לאחר הפיצוץ הגרעיני. השפעת הקרינה הגרעינית על גוף האדם היא קשה וגורמת להפרעות כבר בכמויות קטנות. מנת קרינה הנקלטת על-ידי גוף מסוים נמדדת ביחידות רנטגן.

קרינה שרידית ונשורת גרעינית

הקרינה השרידית מוגדרת כקרינה המשתחררת דקה או יותר מדקה לאחר הפיצוץ. בפצצת ביקוע נובעת קרינה זו מתוצרי הביקוע ומהשפעת שטף הנאוטרונים על חומרים שונים באטמוספירה, ועל הקרקע.



השפעת קרינה רדיואקטיבית על גוף האדם

אם האמצעים לבידוד המקלט מסביבתו אינם מספיקים, קיימת אפשרות שנייה, והיא לתכנן את המבנה כך שיעמוד בכוחות הגדולים הפועלים עליו. חשוב לזכור שהכוחות הנובעים מן הפיצוץ הם כוחות דינאמיים הגורמים למבנה לתאוצות ולתזוזות, ובכך מהווים בעיה חמורה בהרבה מן הכוחות הסטטיים עליהם אנו רגילים לבסס תכנון מבנים רגילים.

לאחר שהבטחנו את עמידות המבנה נגד כוחות הפיצוץ, יש להבטיח שפנים המקלט יהיה מבודד מהשפעות ההדף ומהעזושים הפועלים בחוץ. אנשים וציוד הנמצאים במקלט רגישים ביותר להדף ולתאוצות. כבר בלחץ יתר של 0.3 ק"ג/סמ"ר נגרמים נזקים לאזניים. תאוצות קטנות עלולות גם לגרום לנפילת אנשים ולהוצאה מכלל פעולה של ציוד רגיש. כדי למנוע כניסת גל ההדף למקלט יש לתכנן את הפתחים בהתאם. על פתחי האוורור לכלול שסתומים הנסגרים עם הופעת גל ההדף ועל דלת המקלט להיות אטומה וחזקה כך שתעמוד בכוחות המופעלים עליה. דלתות המונעות כניסת ההדף הן כבדות ביותר ולעתים שוקלות עשרות טון. מנגנוני הסגירה מסובכים, ומופעלים בעזרת מנועים. במקום בו לא קיים מקלט ניתן לחפש מיגון במבנה החזק ביותר בסביבה. הימצאות במבנה חזק מגבירה את סיכויי ההישרדות באופן משמעותי. תפיסת מחסה סמוך לקירות בקומות מרתף או קומות קרקע, הרחק מחלונות ופתחים, מגדילה את סיכויי ההצלה.

גם אם אין התראה על התקפה גרעינית, והבוק האור הוא הסימן הראשון שאכן היה פיצוץ, עשוי הזמן להספיק לנקיטת מספר פעולות מיגון נגד גל ההדף. בטבלה הבאה ניתן לראות שלגבי פיצוצים רחוקים עשוי הזמן בין הבוק האור (רגע הפיצוץ) לבין הגעת גל ההדף להגיע לכמה עשרות שניות.

יעילות יחסית של נשק גרעיני עבור תנאי פיצוץ שונים (דרגות היעילות מסומנות מ-0 עד 4, כש-4 היעיל ביותר)

תנאי הפיצוץ	קרינה תרמית		קרינה מדית	הלם קרקע או מים	הדף אוויר	נשורת
	חום	אור				
בגובה רב	2	4	1	0	1	0
בגובה נמוך	3	3	4	1	4	0
על פני הקרקע	3	2	3	2	3	4
על פני המים	3	3	3	2	3	4
עמוק, כלוא באדמה או במים	0	0	0	4	0	0

עקרונות המיגון

מספר גורמי אי הודאות בתכנון מיגון נגד פיצוץ גרעיני הוא כה גדול עד כי ניתוח מדויק של מצב מסוים אינו מעשי. לדוגמה, אין באפשרותנו לדעת מראש מתי והיכן יתפוצץ נשק גרעיני, מה תהיה עצמתו ובאיוו צורה יפעל. אף על פי כן קיימים מספר עקרונות, אשר הכנתם ויישומם יביאו להגנת חלק נכבד של האוכלוסייה במקרה של התקפה גרעינית. יישום יעיל ופורה של עקרונות המיגון דורש תכנון קפדני מצד החברה והפרט, אולם בעייתות חרום ניתן להשיג מיגון מסוים על-ידי פעולות פשוטות. זאת אם העקרונות הוכהרו והובנו בזמן. סקירת עקרונות המיגון נגד כל אחד מן האפקטים של הנשק הגרעיני תלמד כי האמצעים הננקטים למיגון כנגד אפקט מסוים מקנים מיגון גם נגד השפעות אחרות. עובדה זו מפשטת את תכנון המיגון נגד השפעות הנשק הגרעיני.

מיגון נגד ההדף והלם

אין זה מעשי לתכנן מבנה רגיל, שיעמוד בלחץ היתר הגדול הנובע מפיצוץ גרעיני. אך נקיטת צעדים מסוימים מאפשרת להגדיל את העמידות של המבנה בהדף מבלי להיזקק להוצאות גדולות. חיבורים קשוחים בין עמודים וקורות, קירות הקשחה ואמצעים דומים יגבירו את חוזק המבנה. בזמן ההפצה ביפן החזיקו מעמד מבנים מבטון מזוין, למרות שתוכנם נשרף ונהרס. מבני לבנים, מבנים מבטון לא מזוין ומבנים קלים הם בעלי עמידות נמוכה. הפיצוץ הגרעיני יוצר בהם שברים רבים המסכנים את האנשים בסביבה. מקלטים מתוכננים באופן המאפשר להם לעמוד בלחצי יתר גדולים הרבה יותר. מקלטים מסוימים נבחנו בלחצי יתר של עד 15 ק"ג/סמ"ר . במקלטים כאלה ישנם קירות בטון מזוין בעובי מטר עד מטר וחצי ולעתים אף יותר. מקלט עילי מוטרח בעיקר על-ידי גל ההדף המתקדם באוויר. על המבנה פועלים לחץ היתר של חזית הגל והלחץ הדינמי הנלווה להתקדמות גל ההדף.

מקלט חצי טמון, או טמון בעומק קטן מוטרח בעיקר על-ידי הלם הקרקע המושרה (מושרה על-ידי ההדף האוויר). במקלטים הטמונים בעומק גדול פוגעים הן הלם הקרקע המושרה והן הלם הקרקע הישיר, ויש להתחשב בשניהם. הדרך הראשונה להגן על מקלט בפני ההדף ובפני זעזועי קרקע היא לבודדו מן הסביבה על ידי שימוש באמצעים שונים. כדי להגן על המקלט מהדף ניתן למקמו במנהרה ולתכנן את הכניסות כך שיביאו להקטנת עצמת גל ההדף. מיקום המקלט על קפיצים ועל משככי זעזועים שיבודדו אותו מן הקרקע יגנו על המקלט גם מפני זעזועי הקרקע.

זמן בשניות בין הפיצוץ להגעת גל ההדף
עצמת הפיצוץ

מרחק (ק"מ)	1 קילוטון	10 קילוטון	100 קילוטון	1 מגטון	10 מגטון
1.6	4.3	3.6	3.7	2.5	1.5
3.2	9	8.1	7.4	6.5	5.0
4.8		13	12	11	9.5
8.0			21	20	16
11.2			30	28	26
16.0				42	37
32.0				90	83
48.0					130

(עבור מרחקים בהם לחץ היתר קטן ולא משמעותי לא ניתנו הזמנים)

ניתן לראות שבמרחק 16 ק"מ מפיצוץ בעצמה של 10 מגטון יעברו 37 שניות עד להגעת גל ההדף. אם ננקטת פעולה מידית יכול אדם להגיע תוך תקופה זו למקלט קרוב או למחסה כפי שהוסבר לעיל. בשטח פתוח ניתן להתגונן על-ידי שכיבה מידית על הקרקע ושהייה במצב זה עד שגל ההדף חולף. במצב שכיבה, שטח הגוף החשוף לפגיעת גל ההדף הוא קטן והסכנה להיות מועף ומוטל למרחק קטנה.

מיגון נגד קרינה תרמית

קרינת החום מפיצוץ גרעיני מגיעה בשני גלים. אם פיצוץ גרעיני מתרחש ללא התראה אין מנוס מן הגל הראשון המידי אולם יש לנקוט אמצעי מיגון. במידת האפשר לפני הגעת הגל השני. בזמן זה נקלטו רק 20 אחוזים מן האנרגיה התרמית כך שניתן להימנע מפגיעת חלק גדול של הקרינה, אם מגיעים למחסה לפני גל החום השני, או זמן קצר אחריו. בטבלה הבאה מתוארים משכי הזמן בין הפיצוץ לבין גל החום השני בפיצוצים גרעיניים בעצמות שונות.

תקופת הזמן בין הפיצוץ לגל החום השני
עצמת הפצצה

זמן בשניות	1 קילוטון	10 קילוטון	100 קילוטון	1 מגטון	10 מגטון
0.03	0.1	0.3	1.0	3.2	

מן הטבלה נראה שבפיצוצים בעלי עצמה קטנה אין סיכוי להימנע מגל החום השני אולם בפיצוצים בעצמה גדולה קיים סיכוי להספיק לנקוט פעולות הצלה.

חלק הארי של קרינת החום נע בקווים ישרים כך שכל עצם הנמצא בין כדור האש של הפיצוץ לבין העור החשוף יקנה מיגון מסוים. עובדה זו נכונה גם לעצמים שיהרסו על-ידי ההדף כי הרי קרינת החום העיקרית נגרמת לפני הגעת גל ההדף.

עם הסימן הראשון של פיצוץ גרעיני (הבזק האור), על אדם הנמצא בתוך מבנה לשכב במהירות האפשרית ולהשתדל להגיע מהר לרהיט או לנקודת מחסה מתוכננת. גם אם פעולה זו, לא מבוצעת במהירות הדרושה להקטנת ההשפעה של קרינת החום, הרי היא תבטיח לפחות מיגון מסוים בפני שברים ורסיסים הנגרמים מפעולת ההדף. אדם הנמצא בחוץ יכול להסתתר מאחורי כל עצם החוצץ בינו לבין כדור האש של הפיצוץ. אפילו חלקי לבוש בהירים עשויים לתרום תרומה משמעותית להקטנת הפגיעה של קרינת החום.

לאחר התקפה גרעינית על אזור עירוני עלולות להתפתח שרפות ענק, כפי שקרה ביפן. שרפות אלה נגרמות הן בצורה ישירה על-ידי קרינת החום או כתופעת לוואי של פעולות ההדף כמו לדוגמה, קרינת חוטי חשמל, הפיכת תנורים וכו'. פעולה מתאימה להגבלת אפשרויות ההתפתחות של שרפות גדולות צריכה לכלול צמצום מספר מוקדי ההצתה הפוטנציאליים, הכנות לבידוד מהיר של שרפות כדי למנוע התפשטותן והכנות למקרה שבכל זאת תפתח שרפת ענק.

צמצום מספר מוקדי ההצתה הפוטנציאליים מושג על-ידי הרחקת פסולת דליקה וחומרים דליקים אחרים מן החצרות ובניית מבנים מחומרים לא דליקים. כדי להבטיח ששרפות קטנות לא תהפוכנה לשרפות ענק יש לאמן את האזרחים בכיבוי שרפות בשיטות חרום. ברור שמכבי אש לא יכולים לעמוד בנטל כיבוי אלפי שרפות קטנות, ואם אלה יופלו בידי האזרחים יתפנו מכבי האש לכיבוי שרפות גדולות. בתכנון אזור עירוני יש להקדיש תשומת לב ל"מחסומי אש" על ידי פיזור אזורי המגורים ברווחים מתאימים המונעים התפשטות שריפה.

בטבלה הבאה מתוארת צפיפות נקודות ההצתה הפוטנציאליות בעיר גדולה (על סמך מחקר בערי ארה"ב). נתונים אלה משמשים כבסיס להערכת מספר השרפות שיפרצו בעיר כזאת לאחר התקפה גרעינית.

צפיפות מוקדי ההצתה הפוטנציאליים באזורים עירוניים שונים	
נקודות הצתה פוטנציאליות לדונם	האזור העירוני
7	שווקים סיטונאיים
5	פרברי עוני
3	מרכזים מסחריים שכונתיים
2	תעשייה קלה
1	מרכז מסחרי עירוני
1	שכונות מגורים
1	תעשייה כבדה

בתכנון מקלטים יש להקדיש תשומת לב לנושא המיגון בפני חום ושרפות. נקודות התורפה של המקלט בנושא חום ושרפות הם פתחי האורזורים ומערכות הסינון. למרות השרפות בחוץ על המערכות האלה להמשיך בתפקודן. חשוב לדאוג לכך שלא יישאב לתוך המקלט אוויר עם ריכוז גבוה של חד תחמוצת הפחמן ודו תחמוצת הפחמן מאזורים קרובים לאש.

מיגון נגד קרינה מידית

האיום של הקרינה הגרעינית המידית הוא לטווחים קצרים יותר מן האיומים של ההדף וקרינת החום. בטבלה שבראש העמוד הבא ניתנת השוואת טווחי האיום מקרינה גרעינית לטווחי האיום של קרינת חום והדף עבור פיצוצים שונים.

לצורך ההשוואה מופיעים הטווחים עבור מנות קרינה של 100 רנטגן (מנת הסף לנזקים לאדם), 500 רנטגן (אחוז גדול של מקרי מוות תוך מספר שבועות), 1000 רנטגן (מוות ודאי תוך שבוע בקירוב). כן מופיע הטווח לחץ יתר של 0.35 ק"ג/סמ"ר, שהוא הסף לנזקי לחץ לאדם והטווח לכוויות מדרגה שנייה כתוצאה מקרינת חום.

ניתן להבחין שהאיום מקרינת חום והדף פועל לטווחים ארוכים יותר מאיום הקרינה הגרעינית, במיוחד עבור נשק בעל עצמה גדולה. לדוגמה, אדם הנמצא במרחק שלושה ק"מ מפיצוץ בעצמה של מגטון אחד, לא יראה שום סימנים של נזקי קרינה אולם יספוג קרינת חום של

פעולות החרום שנמנו בסעיפים על מיגון נגד הדף וקרינת חום מועילות, אם כי במידה קטנה יותר, גם נגד הקרינה המידית. הטבלה הבאה מתארת את אחוזי הקרינה הנקלטת במרחקים נתונים כפונקציה של הזמן. (מפיצוצים של 20 קילוטון ו-5 מגטון במרחקים בהם קיים סיכוי הצלה).

מנת הקרינה המידית כפונקציה של הזמן לאחר הפיצוץ							
אחוז הקרינה הנקלטת						מרחק מן הפיצוץ	עצמת הפיצוץ
זמן בשניות לאחר הפיצוץ							
20	15	10	7	4	2	1	20 קילוטון 5 מגטון
100%	100%	97%	95%	88%	78%	67%	
100%	98%	90%	76%	43%	17%	5%	

נראה שע"י פעולה מידית קיים סיכוי להקטין את מנת הקרינה הנקלטת. עם זאת רק מיגון מסיבי מבטון או אדמה יקטין בצורה משמעותית את מנת הקרינה. לבוש רגיל לא יועיל למיגון נגד קרינה גרעינית למרות שביכולתו להציל מפני קרינת החום. קושי נוסף במיגון מפני הקרינה הגרעינית המידית נובע מן העובדה שקיימת תופעת שכירה ופיזור של הקרינה והיא עלולה להגיע מכיוונים שונים ולא רק מכיוון הפיצוץ.

מיגון נגד קרינה שרידית ונשורת גרעינית

ההשפעות העיקריות של הקרינה השרידית על האדם דומות לאלה של הקרינה המידית. אולם איום החשיפה לקרינה השרידית שונה לגמרי מאיום הפגיעה של הקרינה המידית. הנשורת הגרעינית המקרינה קרניים רדיואקטיביות מכסה שטח גדול בהרבה מן השטח שנפגע ע"י הדף. קרינת חום וקרינה רדיואקטיבית מידית. קיימת סכנה שאנשים ייפגעו במרחקים בהם השפעות מידיות של הפיצוץ כלל לא מורגשות. פיצוץ גרעיני בעצמה של מגטון אחד יגרום לזיהום שטחים עצומים בנשורת גרעינית. נשורת זו תגיע לאחר 24 שעות ויותר למרחקים של מאות ק"מ.

בתחום זה של נשורת גרעינית חשוב במיוחד לתכנן מראש מיגון ופעולות חרום כי מדובר בשטחים עצומים ובזמנים ארוכים של סכנה. האיום של הנשורת הגרעינית הוא משני סוגים: איום אחד הוא חשיפת הגוף לקרינת גמא הנפלטת מחלקיקים רדיואקטיביים והאיום השני הוא מגע ישיר עם חומרים רדיואקטיביים הגורם לכוויות קרינה הנקראות כוויות ביתא (נגרמות ע"י קרינת ביתא). האמצעים שיש לנקוט נגד כוויות קרינה מחומרים רדיואקטיביים הם פשוט הרחקת האבק הרדיואקטיבי מן העור. אם אבק מנשורת גרעינית מגיע לעור יש לשטוף אותו מיד במים ובסבון.

מתוך הנחה שעל האוכלוסייה להישאר באזור שזוהם על-ידי נשורת גרעינית הכרחי לדאוג למיגון המצמצם את קרינת הגמא. כמו שכבר הוסבר כל חומר מסיבי תורם לצמצום הקרינה בעוד קירות דקים, חלונות וקירות חלולים מאפשרים לקרינה לחדור. שכבה של 20 ס"מ בטון או 30 ס"מ עפר מקטינים את מנת הקרינה פי עשרה. (העובי קטן יותר מזה הדרוש למיגון נגד קרינה מידית כי האנרגיה של הקרינה המידית גדולה מזו של הקרינה השרידית). הקרינה מנשורת גרעינית תגיע מכל הכיוונים כך שיש צורך במיגון בכל הכיוונים, ולא מכיוון הפיצוץ בלבד.

טווחים למנות קרינה שונות מפיצוץ גרעיני					
10 מגטון	1 מגטון	100 קילוטון	10 קילוטון	1 קילוטון	
מרחקים בק"מ					
מנת קרינה					
3.8	2.9	2.1	1.6	1.1	100 רנטגן
3.4	2.4	1.8	1.3	1.0	500 רנטגן
3.2	2.2	1.6	1.1	0.8	1000 רנטגן
השפעות אחרות					
14.8	6.9	3.2	1.4	0.6	לחץ של 0.35 ק"ג/סמ"ר
35.2	17.6	6.4	2.4	0.8	כוויות דרגה שנייה

210 קלווריות לסמ"ר כאשר 7 קלווריות לסמ"ר כבר גורמות כוויות מדרגה שנייה.

במרחק שלושה ק"מ מפיצוץ בעצמה של מגטון אחד ישורר לחץ יתר של 1.3 ק"ג/סמ"ר, לחץ אשר יגרום נזקים כבדים אף למבנים החזקים ביותר, וודאי שיהיה קטלני לאדם. קרינת הגמא, שהיא אחד המרכיבים של הקרינה המידית, מוחלשת כמעט על-ידי כל חומר דרכו היא עוברת. מידת הירידה של עצמת הקרינה תלויה במסה של החומר-החוצץ בין מקור הקרינה לחלל המוגן. בטבלה הבאה נתון עובי של חומרים אחדים הדרוש להקטנת מנת הקרינה פי עשרה.

עובי מיגון מחומרים שונים הדרוש להקטנת מנת הקרינה פי עשרה	
החומר	העובי הדרוש בס"מ
פלדה	13
בטון	45
אדמה	65
מים	95
עץ	175

נראה שמבנה מסיבי מבטון מזוין יקנה מיגון נגד כל השפעות הפיצוץ שנסקרו עד כה: הדף, חום-ואו וקרינה מידית. מרכיב שני של הקרינה המידית היא קרינת הנאוטרונים. בעוד שמתכות כבדות כמו עופרת וברזל מהוות מגן טוב נגד קרינת גמא הן אינן מספיקות כדי לעצור קרינת נאוטרונים. עצירת קרינת נאוטרונים דורשת מספר שלבים: בשלב ראשון יש להאט את הנאוטרונים המהירים ביותר. למטרה זו משתמשים בחומרים כמו בריום וברזל. בשלב שני יש לגרום להאטה של כל הנאוטרונים על ידי שימוש בחומר כמו מים. בשלב האחרון יש לקלוט את הנאוטרונים האיטיים. המימן שבתוך המים מתאים למטרה זאת. לרוע המזל קליטת נאוטרונים מלווה בפליטת קרינת גמא, כך שיש להוסיף מיגון גם נגד קרינה זאת. כדי לקבל מיגון נגד קרינת גמא וקרינת נאוטרונים משתמשים ב"בטון כבד". בטון זה מכיל בנוסף למרכיבים הרגילים גם חלקיקי ברזל ותרכובות בריום. בטון כזה עוצר קרינת גמא וקרינת נאוטרונים כאחד. הקטנת שטף הנאוטרונים פי עשרה דורשת 20 ס"מ בטון כבד. כיסוי מבנה בשני מטרים עפר מקטין את עצמת הקרינה המגיעה למבנה פי 30.

בעיקר על משטחים אופקיים כגון גגות, כבישים ועל הקרקע. הדרך הקלה ביותר לטיהור היא שטיפת משטחים כאלה במים רצוי עם טרנגנט. השטיפה מרחיקה את החומר הרדיואקטיבי לצנרת הביוב שם הוא פחות מזיק. כיוון הקרקע בעפר לא מזוהם או הרחקת השכבה העליונה של קרקע מזוהמת הן שיטות נוספות לטיהור שטחים גדולים.

מיגון נגד האימפולס האלקטרומגנטי

האימפולס האלקטרומגנטי משפיע כאמור על ציוד חשמלי, משבש פעולתו ואף יכול להרוס אותו. כל עוד לא קיימים אמצעי הגנה בדוקים נגד האימפולס האלקטרומגנטי הדרך היעילה ביותר לצמצום הנזקים לציוד רגיש, היא לנתק אותו זמנית ממקורות זרם ומאנטנות. מיגון נוסף ניתן להשיג ע"י העברת הציוד לחללים ממוסכים מבחינה אלקטרומגנטית כגון ארגזי מתכת או מקלטים מבטון מזוין (המכילים רשתות פלדה בקירות ובתקרה).

אמצעים אלה מבטלים גם את אפשרויות ההפעלה של המכשירים אם מדובר על קליטה ושידור ויש לתכננם מראש למצב זה של ניתוק קשר מוחלט. במידה והקשר חיוני ואין אמצעי הגנה בדוקים נגד האימפולס האלקטרומגנטי יש להכין מערכות ציוד כפולות למקרה שמערכת אחת נפגעת. חשוב להשתמש בציוד שתוכנן בהתחשב באיום של האימפולס האלקטרומגנטי, כלומר הרכיבים האלקטרוניים שלו רגישים פחות ל"הבוק הרדיו".

תכנון ההגנה

בתכנון ההגנה נגד איומי הנשק הגרעיני חשוב לדעת שמידת המיגון לאוכלוסייה תלויה באופן ישר ברמת המודעות להשפעות הנשק הגרעיני והדרכים ליישם את עקרונות המיגון עוד לפני ההתקפה. יתרה מזו, קיימות מספר פעולות שניתן לבצע לאחר התקפה גרעינית כדי להקטין את הנזקים, וגם פעולות אלה יהיו יעילות יותר אם יתוכננו מראש.

מקלט מסיבי מבטון מזוין דרוש כדי להגן על אוכלוסייה בטוחים קצרים מפיצוץ גרעיני. סוג זה של מיגון הוא השלם ביותר, שכן הוא מקנה ביטחון כנגד כל אחד מן האפקטים של הפיצוץ, אולם הוא דורש ידע ותכנון מוקדם קפדני, והוא יקר מאוד.

כדי לקדם את פני הסכנה גם באזורים בהם אין מקלטים כבדים דרושה תכנית הגנה רחבה הכוללת: מערכות מקלטים נגד נשורת גרעינית עם מלאי מזון מתאים לכלל האוכלוסייה; מערכת התראה ותקשורת שתזהיר את האוכלוסייה בזמן ותהווה מקור אינפורמציה בעת חרום; מערכת לזיהוי, למדידה ולדיווח על נשורת גרעינית; ארגון ואימון בשיטות הגנה אזרחית עם דגש על ניהול מקלטים וארגונים; ביקורת, הכוונה וביצוע יעילים של פעולות חרום; מערכת להערכת אופי הנזקים מהתקפה גרעינית והיקפם; מערכת לתמיכה בניצולים ולניהול פעולות שיקום.

סיכום

קיים סיכוי שיהיו ניצולים רבים מהתקפה גרעינית. סיכוי זה יגדל אם יהיה יישום של עקרונות המיגון בהכנות ובתוכניות לפני ההתקפה הגרעינית, אם ינקטו הפעולות המתאימות בזמן ההתקפה ואם יקבע מראש כיצד יתנהל תהליך השיקום לאחר ההתקפה.



הריסות של עיר לאחר פיצוץ גרעיני

במקלטים יש צורך להכין מלאי מזון לתקופה של לפחות שבועים, מאחר שיושבי המקלט יצטרכו להישאר בו עד שהדעיכה הטבעית של הקרינה בחוץ תוריד את מנת הקרינה לרמה בלתי מזיקה. חשוב לדעת שבמקומות בהם אין מקלטים נגד קרינה ניתן להשיג מיגון גם במבנים ובמקלטים רגילים, בקומות מרתף, באזורים מוקפים קירות מכל הכיוונים או מתחת לרהיטים המכוסים ומוקפים בשקי חול. החיסרון הגדול של מחסה מאולתר נגד קרינה הוא בהעדר האפשרות לשהות בו זמן רב כך שהמסתתרו בו יאלץ לצאת ממנו לאחר תקופה קצרה יחסית למרות שהקרינה בחוץ עדיין ברמה מסוכנת. לפני שעוזבים מקלט לתקופה קצרה או ארוכה, חשוב לדעת מה מנת הקרינה מחוץ למקלט. לכן חשוב שבמקלט יהיה ציוד תקשורת כגון מקלט הפועל בעזרת סוללות וכן ציוד למדידת קרינה.

לאחר התקפה גרעינית חשוב לערוך סקר ראדיולוגי כדי לאתר שטחים נגועים בנשורת גרעינית. הדרך המהירה ביותר לערוך סקרים אלה היא מן האוויר. חשיבות הסקר האווירי בכך שניתן לבצעו באופן מדידי גם מעל אזורים שנפגעו והגישה אליהם קשה. אף על פי כן יכול סקר אוויר לתת הערכה כללית בלבד על מידת הזיהום ויש לבצעו לאחר שהנשורת הגרעינית שהייתה באוויר הגיעה לקרקע. עבור נקודות בעלות עניין מיוחד יש להשלים את הסקר האווירי בסקר קרקעי ברגע שניתן לבצע אותו. בהתאם למנת הקרינה השוררת בחוץ ניתן לחשב מה זמן שהייה בטוח עבור אנשים העוסקים בפעולות-הצלה או הבאת אספקה למקלטים.

לאחר התקפה גרעינית חשוב להגן על האוכלוסייה מחשיפה פנימית לקרינה על-ידי אכילה של מזון הכולל חלקיקים רדיואקטיביים. עקרון המיגון כאן הוא להרחיק נשורת גרעינית ממזון ומים לפני צריכתם. באותה צורה יש לסנן את האוויר מחלקיקי נשורת גרעינית לפני שנושמים אותו, זאת על-ידי מסנני אבק מתאימים. על מזון ומים לשעת חרום ניתן להגן מזיהום על-ידי אחסנתם במכלים אטומים וע"י שטיפת המכלים לפני פתיחתם בעת חרום. מזון שזוהם על-ידי אבק רדיואקטיבי ניתן לטיהור. אם מדובר בפירות וירקות הטיהור יתבצע פשוט על-ידי שטיפה וקילוף. חשוב לציין שהרחחה ובישול אינם מטהרים מזון מקרינה רדיואקטיבית. טיהור הוא תהליך ההרחקה של חומר רדיואקטיבי למקום בו לא יגרם נזק. על הטיהור להתבצע על-ידי צוותים מאומנים ותוך ביקורת מתמדת של מנות הקרינה כדי לקבוע את יעילות הטיהור. חלקיקי הנשורת הגרעינית מצטברים