בדיקות אל-הרס – פליטת קרינת גמה (112) – Non Destructive Testing – Gamma Rays

פברואר 2020

תוכן עניינים

מבוא 2
חומרים רדיואקטיביים 2
הגדרה 4
מבנה של מערכות לבדיקות אל-הרס - גמא 4
מקורות של קרינת גמא 4
הפעלת המערכת 5
בקרת חשיפה לקרינה מיננת 6
ערכי חשיפה מותרים לקרינה מיננת 6
בקרת החשיפה לקרינה מיננת 7
זמן 7
מרחק 7
מיסוך 7
בקרת חשיפה אישית – רישום רמות החשיפה 8
תצלומים 9
סיכונים בטיחותיים 9
חשיפה לקרינה מיננת 9
מניעת מפגעים (נוהג טוב) 10
ביבליוגרפיה 10

מבוא

בסוף המאה ה-19, גילוי קרינת רנטגן (1895) יחד עם גילוי הרדיואקטיביות (1896) וגילוי האלקטרון (1897) פתחו את חקר העולם האטומי והתחילו את עידן הפיזיקה המודרנית [1].

חומרים רדיואקטיביים

חומרים רדיואקטיביים הם חומרים המורכבים מאטומים שגרעיניהם בלתי יציבים. אטומים אלה מתפרקים ופולטים קרינה. כאשר אטום עובר דעיכה רדיואקטיבית הוא פולט אחת או יותר סוגים של קרינה עם אנרגיה מספקת כדי ליינן את האטומים האחרים איתם הקרינה מתקשרת.

ישנם יסודות רדיואקטיביים מטבעם (אורניום, רדיום ועוד). חומרים אחרים ניתן לעשות רדיואקטיביים באמצעות הקרנתם בקרינה מיוננת הנפלטת מאטומים רדיואקטיביים.

קיימים שלושה סוגים עיקריים של קרינה מיוננת טבעית: קרינת אלפא, קרינת בטא וקרינת גמא.

קרינת אלפא

קרינת אלפא הינה חלקיקים של יחידות קשורות היטב של שני נויטרונים ושני פרוטונים כל אחת (גרעין He4) ויש להם מטען חיובי.

קרינת בטא

קרינת בטא הינה קרינה של אלקטרונים, שנוצרת כאשר גרעין האטום אינו יציב והוא מתפורר באמצעות פליטת אלקטרונים עם מטען שלילי.

קרינת גמא

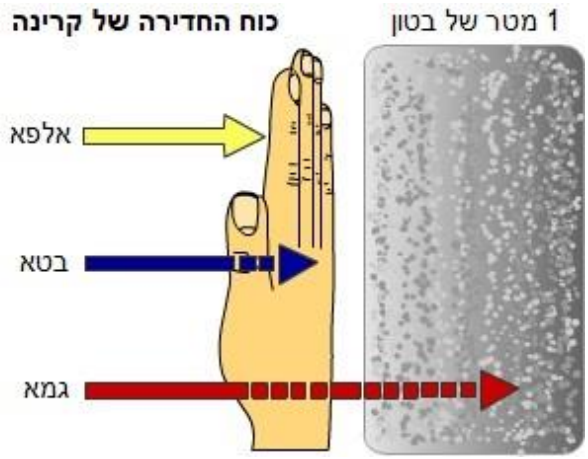
כאשר קרינה מיוננת עוברת מנקודה לנקודה בחומר, היא מאבדת את האנרגיה שלה דרך אינטראקציות שונות עם האטומים שהיא נתקלת בהם. כתוצאה מכך האטומים החדשים עוברים למצב של יינון, כאשר הם מאבדים אלקטרונים שנפלטים מהם, או למצב של עירור (excitation), כאשר אלקטרונית מקבלים אנרגיה מהחלקיק הטעון החולף, אך אינם נפלטים מהאטום.

האטום שנמצא במצב מעורר פולט קרינה אלקטרומגנטית שהיא קרינת גמא, ועובר למצב "רגוע" ויציב עם אנרגיה נמוכה יותר. בד"כ פליטה של קרינת גמא מלווה את התפוררות של גרעין האטום עם פליטת קרינות אלפא ובטא ותהליכים של דעיכה גרעינית אחרים.

בגלל המטען שלהם ומהירותם האיטית יחסית, לחלקיקי אלפא כוח יינון גבוה ביותר, אך טווח החדירה שלהן לתוך החומר הינו נמוך יחסית (כמה סנטימטרים באוויר ופחות ממילימטר ברקמה). חלקיקי בטא, שהם קטנים בהרבה מחלקיקי אלפא ושיש גם להם מטען חשמלי, הם בעלי כוח יינון נמוך בהרבה מחלקיקי אלפא, אך טווח החדירה שלהם לתוך החומר גדול יותר.

קרינת גמא (כמו גם קרינת רנטגן וקרינת נויטרונים) לא גורמת ליינון אטומים באופן ישיר על ידי דחיפת אלקטרונים של אטום ממסלולם, כמו חלקיקי אלפא ובטא. לקרינות גמא רנטגן ונויטרונים אין מטען חשמלי והן חודרות בין האטומים עמוק לתוך החומר עד שהן נתקלות בחלקיק כלשהו. אם החלקיק הוא אלקטרון, הוא עשוי לקבל מספיק אנרגיה כדי להיות מיונן ולצאת מהאטום, ואז הוא גורם ליינון נוסף על ידי דחיפה ישירה של אלקטרונים אחרים. קרינות גמא, רנטגן ונויטרונים הן קרינות מיוננות בעקיפין והן יכולות לגרום לשחרור של חלקיקים מיוננים (אלקטרונים) בעומק החומר [2].

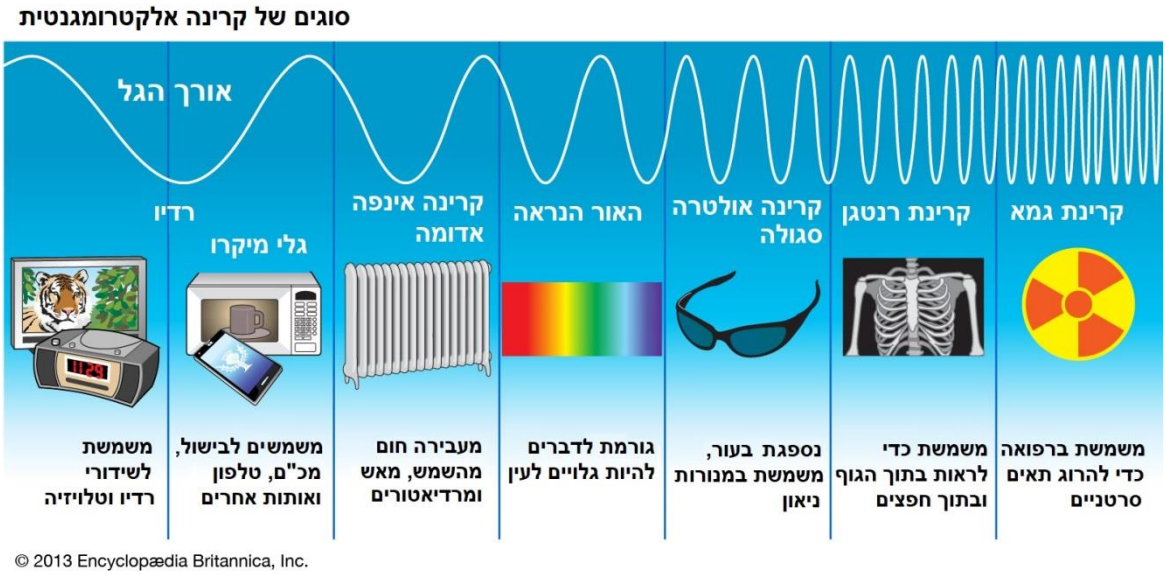
להלן התמונה להמחשת כוח חדירה של קרינות מיוננות מסוגים שונים.



מקור התמונה: NDT Resource Center. Ionization [Updated]. https://www.nde-ed.org/

קרינת גמא הינה קרינה אלקטרומגנטית עם אורך גל קצר מאוד (פחות מ- 10^{-10} מטר). לקרינת גמא ישנה אנרגיה גבוהה מעשרות אלפי אלקטרון וולטים (eV) [3].

להלן תמונה להמחשת פיזור גלים אלקטרומגנטיים ומיקומה של קרינת גמא בסקלה זאת.



מקור התמונה: Encyclopedia Britannica. Electromagnetic Spectrum [Updated]. https://www.britannica.com/

בקרינת גמא משתמשים בהדמיה ברפואה, כמו טומוגרפיה פליטת פוזיטרון (Positron Emission Tomography), ולטיפולי הקרינה להריגת תאים סרטניים.

לזיהוי ורישום קרני גמא ממקורות טבעיים בקרקע ומהחלל משתמשים במיפוי גיאולוגי וחקר מינרלים ובמחקר אסטרונומי [Britannica].

כמו כן, בקרינת גמא משתמשים לחיטוי מכשירים רפואיים ולשימור מזון [4].

אחד השימושים הנפוצים בקרינת גמא הוא רדיוגרפיה תעשייתית. מכיוון שאורך הגל של קרינת גמא קצר ב- 100 עד- 1000 לעומת קרינת רנטגן, כוח החדירה של קרינת גמא הוא גבוה יותר. כמו כן לשם שימוש בקרינת גמא אין צורך במקור חשמל, פליטת הקרינה מתבצעת כל הזמן מהאיזוטופ שנמצא בתוך הגנרטור. יתרון כזה מאפשר לבצע בדיקות רדיוגרפיה במקומות בהם אין אפשרות להשתמש בקרינת רנטגן, למשל בתוך צינורות דקים [5].

הגדרה

בדיקות אל-הרס - פליטת קרינת גמא הינן בדיקות מוצרים על ידי הקרנתם בקרני גמא מצידם האחד ומדידת כמות הקרינה העוברת דרכם בצידם השני, הקרינה העוברת נקלטת על גבי סרט, מסך דו – מימדי, באמצעות דימוי תלת מימדי.

מבנה של מערכות לבדיקות אל-הרס - גמא

החיסרון של בדיקות אל-הרס באמצעות קרינת גמא הוא בכך שלעולם לא ניתן לכבות את הקרינה ומקור הקרינה תמיד נמצא במצב פעיל.

המערכות לבדיקות קרינת גמא כוללות מקור של קרינת גמא, קולט שהוא סרט צילום או מכשיר דיגיטלי (בד"כ בצורה של לוח) רגיש לקרני גמא, ומסך להצגת התמונה. במקרה של שימוש בסרטי צילום הם עוברים פיתוח באמצעות חומרים כימיים, ובמקרה של לוח דיגיטלי התמונה מוצגת על המסך של מכשיר ההצגה.

מקורות של קרינת גמא

מקורות רדיואקטיביים מעשה ידי אדם מיוצרים על ידי החדרת נויטרון נוסף לאטומים של חומר המקור.

ככל שהחומר פורש את עצמו מהנויטרון, משתחררת אנרגיה בצורת קרינת גמא. שני המקורות הנפוצים ביותר לקרינת גמא ברדיוגרפיה תעשייתית הם אירידיום-192 וקובלט-60.

הגודל הפיזי של חומרים איזוטופים משתנה בין היצרנים, אך בדרך כלל החומר הוא גליל בעל ממדים של 1.5 מ"מ על 1.5 מ"מ. תלוי ברמת הפעילות הרצויה, גליל או גלילים נטענים בקפסולת נירוסטה ונאטמים באמצעות ריתוך. הקפסולה מחוברת לכבל גמיש קצר שלפעמים נקרא צמה (pigtail). הקפסולה עם האיזוטופ נמצאת בתוך קונטיינר רדיוגרפי (מקרן) ועטופה בחומר מגן.

להלן תמונות להמחשת מבנה של מקור הקרינה ומערכות לבדיקות אל-הרס באמצעות קרינת גמא.

מקור התמונה: NDT Resource Center. Radio Isotope (Gamma) Sources. https://www.nde-ed.org/

מקרן (קונטיינר) גמא. מקור התמונה: NDT Equipment Sales. Sentinel 880 Delta Source Projector. https://www.ndt.com.au/

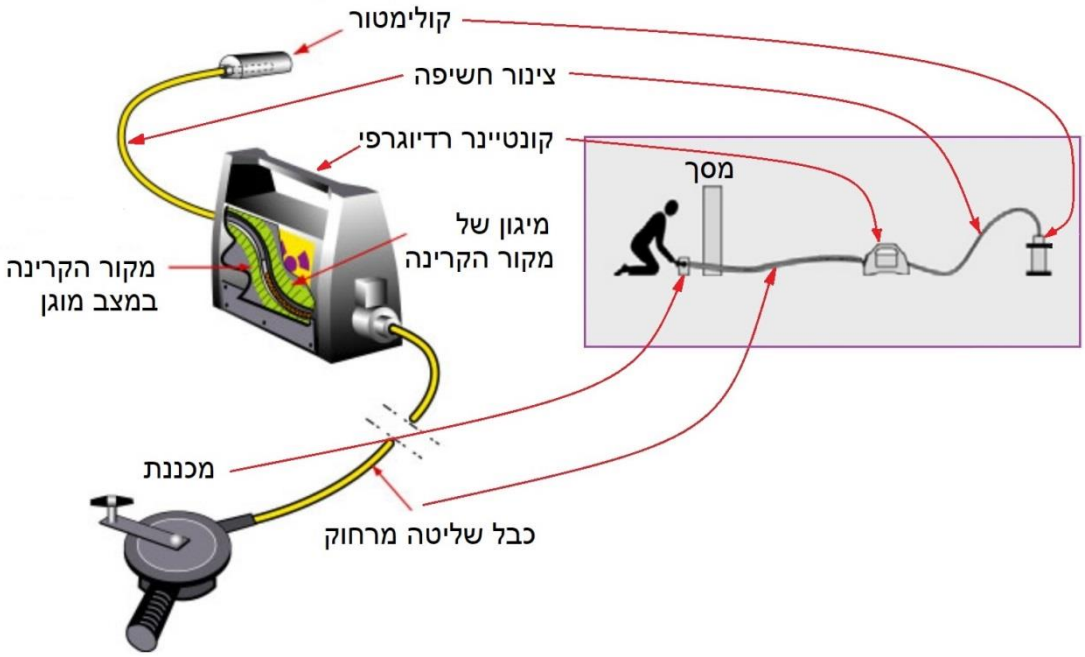
מקרן גמא עם כבלים ומכננת. מקור התמונה: SPEC. SPEC-150 & SPEC-300 Industrial Radiography Systems. http://www.spec150.com/

מקרן גמא עם מערכת זחילה לבדיקות אל-הרס של צינורות. מקור התמונה: JME Advances Inspection Systems. https://www.jme.co.uk/

הפעלת המערכת

כדי לבצע בדיקות רדיוגרפיות יש להעביר את הקפסולה מהמקרן לקולימטור דרך צינור חשיפה. כאשר הקפסולה יוצאת מהמקרן, הקרינה נפלטת לסביבה, לכן מבצעים את הפעולה בשליטה מרחוק באמצעות מכננת דרך כבל ארוך. הקולימטור מחזיק את הקפסולה בזמן הבדיקה ומכוון את הקרינה לנקודת הבדיקה. לאחר סיום הבדיקה מחזירים את הקפסולה למקרן [6].

להלן תמונה להמחשת הפעלה של מערכת לרדיוגרפיה באמצעות קרינת גמא.



איור סכמתי של הפעלת מכשיר לבדיקות גמא. מקורות התמונה:

א. DSA Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority. Industrial Radiography. [Updated]. https://www.dsa.no/

ב. Sentinel. Gamma Radiography Sources. Safety Information and Guidance. HI018 Issue 11 [Updated]. http://hightechsource.co.uk/

בדיקה רדיוגרפית באמצעות קרינת גמא. מקור התמונה: NDT Resource Center. Radio Isotope (Gamma) Sources. https://www.nde-ed.org/

בקרת חשיפה לקרינה מיוננת

ערכי חשיפה מותרים לקרינה מיוננת

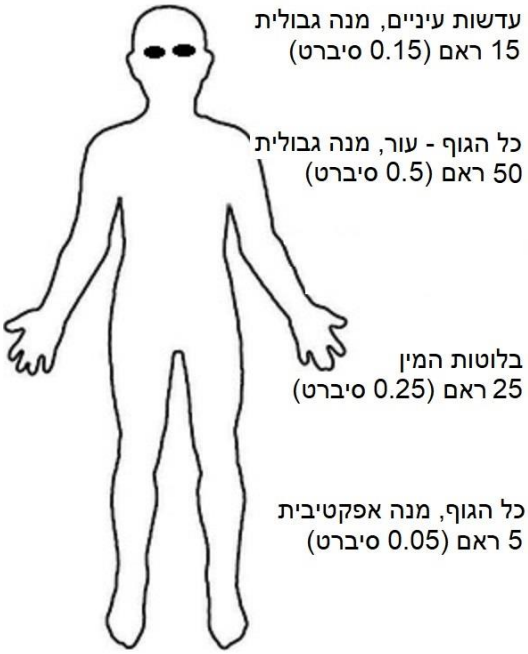
הרגולציה של רמות החשיפה אצל עובדים בבדיקות אל-הרס – פליטת קרינת גמא בארץ מבוססת על שתי תקנות. תקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובריאות העוסקים בקרינה מיוננת), תשנ"ג-1992 מגדירות את המושגים של העבודה עם הקרינה ואת התנאים להגבלת החשיפה, ותקנות הבטיחות בעבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), תשע"א-2011 מגדירות את הערכים הגבוליים של חשיפה מותרת.

להלן המושגים העיקריים בהם משתמשים בהערכת החשיפה לקרינה מיוננת:

חשיפה (Exposure). חשיפה היא מדד לחוזק של שדה קרינה בנקודה מסוימת באוויר. מודדים את החשיפה ביחידה שנקראת רנטגן ((R) roentgen)

מנת קרינה או מנת קרינה נבלעת (Dose or Absorbed Dose) - כמות האנרגיה הנבלעת ביחידת מסה של גוף האדם עקב חשיפתו לקרינה מיוננת. במילים אחרות המנה היא כמות של קרינה שנספגה על ידי הגוף המוקרן. היחידות למנת הקרינה הנבלעת הן גרי ((Gy) gray) או ראד (Radiation Absorbed Dose (Rad)).

שקול המנה (Dose Equivalent). שקול המנה מקשר בין מנת הקרינה שנספגה לבין ההשפעה הביולוגית של אותה המנה. המנה הנבלעת של סוגים שונים של קרינה מוכפלת ב-"גורמי איכות" (Quality Factor) המתאימים לכל הרקמות. היחידות של שקול המנה הן סיברט ((SV) sievert), וראם (Roentgen Equivalent in Man (Rem)).



דוגמאות למנה גבולית (הערך המרבי המותר) של קרינה מיוננת. מקור התמונה: NDT Resource Center. Exposure Limits [Updated]. https://www.nde-ed.org/

לקרינות מסוג רנטגן וגמא גורם האיכות שווה 1, לכן בהקשר לבדיקות אל-הרס ניתן להתחשב ברנטגן, ראד וראם כשווי ערך.

הערך המותר הגבולי השנתי מוגדר בשתי צורות:

א. מנה אפקטיבית (מנה כוללת) לכל הגוף (5 ראם או 0.05 סיברט לשנה);

ב. מנה גבולית לאיברים מסוימים אשר נקבעה בהתאם לרגישות של האיבר לקרינה.

לנשים בהיריון המנה האפקטיבית לכל הגוף המותרת מוגבלת ב-0.1 ראם או 0.001 סיברט לשנה בלבד.

בקרת החשיפה לקרינה מיוננת

חשיפה לקרינה מיוננת יכולה להיות חריפה (אקוטית) וכרונית. הראשונה הינה חשיפה לרמות גבוהות שמתקבלת בזמן קצר, והשנייה הינה חשיפה מצטברת לרמות נמוכות למשך זמן רב.

קיימות שלוש דרכים בסיסיות לבקרת החשיפה מקרינה והן:

א. הגבלת זמן שהות העובד ליד מקור הקרינה;

ב. הגדלת המרחק ממקור הקרינה;

ג. מיסוך הקרינה כדי לנטרל את הקרינה או להוריד את רמת החשיפה אליה.

זמן – מרחק – מיסוך. עקרונות לבקרת החשיפה מקרינה מיוננת. מקור התמונה: USNRC. United States Nuclear Radiology Commission. Minimize Your Exposure. Time, Distance, and Shielding [Updated]. https://www.nrc.gov/

זמן

מנת הקרינה נמצאת ביחס ישיר לזמן ההקרנה. לפיכך, אסור לאדם להישאר בקרבת מקור קרינה יותר מהנדרש והמותר.

מרחק

הגדלת המרחק ממקור הקרינה תפחית את כמות הקרינה שמתקבלת.

מיסוך

הדרך השלישית להפחתת החשיפה לקרינה היא למקם מסך בין עובד לבין מקור הקרינה. באופן כללי, ככל שחומר המסך צפוף יותר הוא יספק מיגון טוב יותר.

ספיגת הקרינה במסך מתחילה ברגע שהקרינה נכנסת לחומר. התהליך הוא פרוגרסיבי ונמשך ככל שהקרינה חודרת עמוק יותר לחומר. אנרגיה נוספת של הקרינה נספגת בתהליכי היינון השונים. בשכבה כלשהי בעומק החומר, עוצמת הקרינה הופכת לחצי מזאת שהייתה לה פני הכניסה למסך. עומק זה ידוע

בשם שכבת מחצית הערך ((Half Value Layer (HVL) עבור אותו חומר. לכל חומר עובי של HVL ספציפי משלו. עם זאת, ה- HVL תלוי לא רק בחומר, אלא שהוא גם תלוי באנרגיה של הקרינה.

להלן הטבלה שמציגה HVL לעופרת ולבטון בהתאם לאנרגיה של הקרינה [7].

אנרגיה (קילוולט)	עופרת (מ"מ)	בטון (מ"מ)
50	0.06	4.32
70	0.18	12.0
100	0.27	15.10
150	0.30	22.32
200	0.52	25.00
250	0.88	28.00
300	1.47	31.21
400	2.50	33.00
1000	7.90	44.45
2000	9.98	62.23

בקרת חשיפה אישית – רישום רמות החשיפה

בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובריאות העוסקים בקרינה מיננת), תשנ"ג-1992, כול עובד שעקב תפקידו עלול להיחשף לרמת הקרינה שעולה על 0.3 מהמנה הגבולית בשנה, אמור להיות מבוקר באופן אישי. בהקשר לעובדים בבדיקות אל-הרס – פליטת קרינת גמא, לבקרת החשיפה משתמשים במכשיר מדידה שהוא דוזימטר אישי. העובד חייב לשאת את הדוזימטר במקום או במקומות מתאימים על גופו, במשך כל זמן עיסוקו במקורות קרינה.

להלן תמונות להמחשת סוגים שונים של דוזימטרים אישיים.

מקור התמונות: Google search “personal x-ray dosimeter”.

תצלומים

המטרה של בדיקה רדיוגרפית היא לייצר תמונה פנימית של החלק הנבדק עם כמות הפרטים הגבוהה ביותר.

לצילומים רדיוגרפים משתמשים בסרט צילום שלאחר הצילום עובר תהליך פיתוח באמצעות חומרים כימיים.

את התצלומים בודקים בדרך כלל על תיבת אור. כמו כן, ניתן לבצע דיגיטליזציה של התצלומים ולנתח אותם במוניטור ברזולוציה גבוהה.

מקור התמונה: U.S. Air Forces in Europe & Air Forces Africa. Attention to detail at its finest. By Staff Sgt. Emerson Nuñez, 48th Fighter Wing Public Affairs / Published September 12, 2014. https://www.usafe.af.mil/

סיכונים בטיחותיים

חשיפה לקרינה מיוננת

זיהוי:

עובדים בבדיקות אל-הרס – פליטת קרינת גמא עלולים להיחשף לקרינת גמא ברמות שעולות על הרמה המותרת חן בחשיפה אקוטית וחן בחשיפה כרונית בזמן ביצוע הבדיקות.

בקרה:

א. בזמן ביצוע הבדיקה יש להקפיד על שלושה עקרונות של הגבלת החשיפה: קיצור זמן החשיפה, הגדלת מרחק ממקור הקרינה ושימוש במסכים מפני הקרינה;

ב. לעובדים שעלולים להיחשף לרמות שעולות על 0.3 מהרמה המותרת השנתית יש לארגן בקרה אישית על רמות החשיפה באמצעות דוזימטריה אישית;

ג. אסור שרמות החשיפה יעלו על הרמות המוגבלות הן לכול הגוף והן לאיברים נפרדים בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), תשע"א-2011;

ד. לנשים בהיריון המנה האפקטיבית לכל הגוף המותרת מוגבלת ב-0.1 ראם או 0.001 סיברט לשנה בלבד.

מניעת מפגעים (נוהג טוב)

ניהול היבטי הבטיחות בעבודות בדיקת אולטרסאונד תוך הקפדה על התנאים הבאים:

1. כללי

קיום הדרכה לפחות אחת לשנה בדבר מניעת סיכונים והגנה מפניהם באמצעות בעל מקצוע מתאים אשר יוודא שכל עובד הבין את הסיכונים והוא בקיא דיו בנושאי ההדרכה, בהתאם לתפקידו ולסיכונים שלהם הוא חשוף.

ניהול פנקס הדרכה לרבות תיעוד מועד ההדרכה, המדריך והחומר הנלמד. עם כניסתו של עובד חדש או שינוי עמדת העבודה של העובד יש לדאוג לביצוע הדרכה ביחס לסיכונים בעבודה, שימוש באמצעים להפחתת הסיכונים לרבות אמצעי מיגון אישי, כללי התנהגות בעת אירוע חריג לרבות תאונה וכמעט תאונה [8].

שילוט הסיכונים הבטיחותיים באיזור העבודה. שילוט בדבר הצורך בשימוש בציוד מגן אישי.

הגדרת שיטה (נוהל בכתב) להעברת מידע על מפגעי בטיחות בתהליך העבודה, באמצעות מחזיק במקום העבודה. העברת מידע מהעובדים להנהלת האתר, באמצעות דיווח על מפגעי בטיחות, כמעט תאונות או תאונת עבודה.

ביבליוגרפיה

1. Encyclopedia Britannica. X-ray. https://www.britannica.com/science/X-ray

2. NDT resource Center. Ionization. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/Ionization.htm

3. Encyclopedia Britannica. Gamma Ray. https://www.britannica.com/science/gamma-ray

4. Sciencing. What Uses Do Gamma Rays Have? Updated April 25, 2017 By Joshua Wade. https://sciencing.com/uses-do-gamma-rays-8286669.html

5. Encyclopedia Britannica. Gamma radiography. https://www.britannica.com/technology/technology-of-photography/Ultraviolet-photography#ref416296

6. NDT Resource Center. Radio Isotope (Gamma) Sources. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/EquipmentMaterials/isotopesources.htm

7. NDT Resource Center. Depth of Penetration of Radiation Energy. https://www.nde-ed.org/EducationResources/HighSchool/Radiography/penetrationdepth.htm

8. תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (מסירת מידע והדרכת עובדים), תשנ"ט-1999.