# בדיקות אל-הרס – חלקיקים מגנטיים (115) – Non Destructive Testing – Magnetic Particles

אפריל 2020

## תוכן עניינים

מבוא ..... 2
עקרונות הבדיקה באמצעות חלקיקים מגנטיים ..... 2
הגדרה ..... 4
שלבים של הבדיקה ורכיבים עיקריים של המערכת לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים ..... 4
מגנטיזציה של המוצר הנבדק ..... 4
מגנטים קבועים ..... 4
אלקטרומגנטים ..... 5
דחפים ..... 5
סליל או סולנואיד ..... 6
יישום חלקיקים מגנטיים על המוצר לנבדק ..... 7
חלקיקים מגנטיים ..... 7
יישום חלקיקים במערכות נייחות ..... 8
יישום חלקיקים במערכות ניידות ..... 8
ספקי כוח ..... 9
דאמגנטיזציה של המוצר ..... 10
בדיקות אל-הרס על הגובה, במקומות מוקפים ומתחת לפני המים ..... 10
אפקטים ביולוגיים של שדה מגנטי ..... 11
שדה מגנטי כגורם מסרטן ..... 12
רגולציה של חשיפה לשדות מגנטיים ..... 12
סיכונים בטיחותיים ..... 12
מגע עם עצמים חמים ..... 12
פגיעה בעובד כתוצאה מנפילתו מגובה ..... 13
פגיעה בעובדים בעת ביצוע בדיקות בתוך מקומות מוקפים ..... 13
פגיע בעובד בעבודה מתחת לפני המים ..... 13
סיכוני פגיעה מחשמל ..... 14
חשיפה לשדה מגנטי סטטי או בתדירות נמוכה מאוד ..... 14
מניעת מפגעים (נוהג טוב) ..... 14
ביבליוגרפיה ..... 15

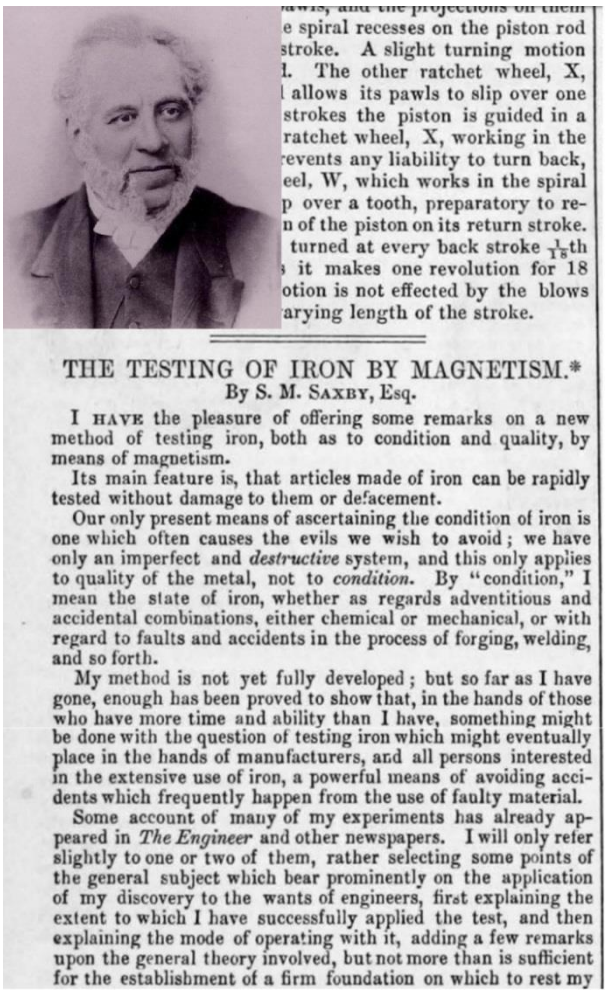
## מבוא

סטפן מרטין סקסבי ( Stephen Martin Saxby) היה מהנדס בחיל ים אנגלי, אבל נהיה מפורסם כאסטרולוג חביבן. בדצמבר 1868 הוא חזה את הסערה שב-5 באוקטובר 1869 שטפה את החוף המזרחי של קנדה וגבתה יותר מ-35 קורבנות. הסערה קיבלה את שמו – סערת סקסבי (Saxby Gale).

כמהנדס בחיל הים הסקסבי עסק בניווט. הוא הצביע על הפרעות שקורות למצפן בתוך אניות העשויות ברזל והציע שיטה לתיקון הפרעות האלה.

סקסבי היה זה שלראשונה הציע שיטה לגילוי פגמים במוצרים ברזליים באמצעות מצפן, אשר היתה מבוססת על תכונות מגנטיות של המתכת. את הניסויים של השיטה עשה סקסבי על קנים של תותחים באנייה. הוא תיאר את הניסויים בכתב עת Engineering בשנת 1868 והשיטה נחשבת כניסוי ראשון של בדיקה באמצעות חלקיקים מגנטיים [1, 2, 3, 4].

בשנת 1919 ווילאם הוק (William Hoke) בארה"ב הגיש בקשה לרישום פטנט לשיטה לבדיקת פגמים בחומרים פרומגנטיים, כמו ברזל או פלדה, באמצעות שדה מגנטי וחלקיקים דקים של חומר מגנטי שמצטברים ליד הפגם עקב השפעתו של השדה עליהם [5].



e spiral recesses on the piston rod stroke. A slight turning motion l. The other ratchet wheel, X, allows its pawls to slip over one strokes the piston is guided in a ratchet wheel, X, working in the revents any liability to turn back, eel, W, which works in the spiral p over a tooth, preparatory to re-n of the piston on its return stroke. turned at every back stroke $\frac{1}{18}$th it makes one revolution for 18 otion is not effected by the blows arying length of the stroke.

THE TESTING OF IRON BY MAGNETISM.*

By S. M. Saxby, Esq.

I have the pleasure of offering some remarks on a new method of testing iron, both as to condition and quality, by means of magnetism.

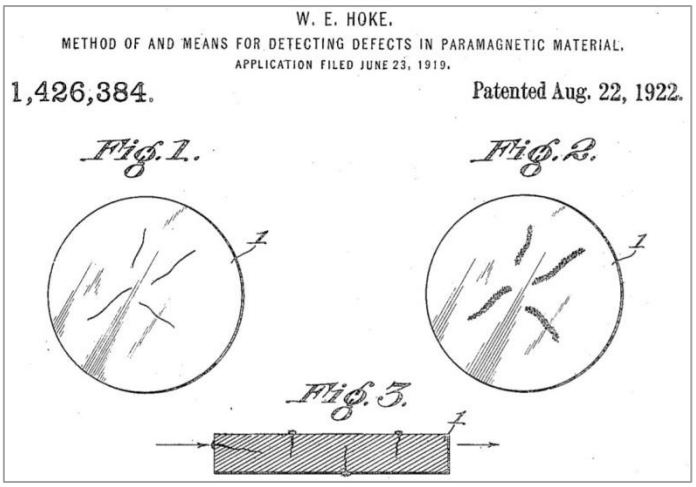
Its main feature is, that articles made of iron can be rapidly tested without damage to them or defacement.

Our only present means of ascertaining the condition of iron is one which often causes the evils we wish to avoid; we have only an imperfect and *destructive* system, and this only applies to quality of the metal, not to *condition*. By "condition," I mean the state of iron, whether as regards adventitious and accidental combinations, either chemical or mechanical, or with regard to faults and accidents in the process of forging, welding, and so forth.

My method is not yet fully developed; but so far as I have gone, enough has been proved to show that, in the hands of those who have more time and ability than I have, something might be done with the question of testing iron which might eventually place in the hands of manufacturers, and all persons interested in the extensive use of iron, a powerful means of avoiding accidents which frequently happen from the use of faulty material.

Some account of many of my experiments has already appeared in *The Engineer* and other newspapers. I will only refer slightly to one or two of them, rather selecting some points of the general subject which bear prominently on the application of my discovery to the wants of engineers, first explaining the extent to which I have successfully applied the test, and then explaining the mode of operating with it, adding a few remarks upon the general theory involved, but not more than is sufficient for the establishment of a firm foundation on which to rest my

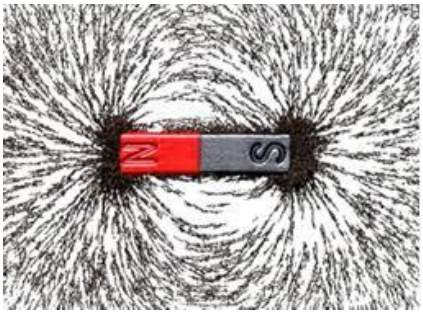
סטפן מרטין סקסבי, 1870. מקור התמונה: Albert County Museum & Rb Bennett Centre https://www.albertcountymuseum.com/




יישום תעשייתי של השיטה בוצע על ידי ויקטור דה פורסט (Victor de Forest) ופוסטר דואן (Foster Doane) לאחר שנת 1929. הם הקימו בשנת 1934 חברה בשם Magnaflux שמפורסמת ברחבי העולם עד היום [6].

### עקרונות הבדיקה באמצעות חלקיקים מגנטיים

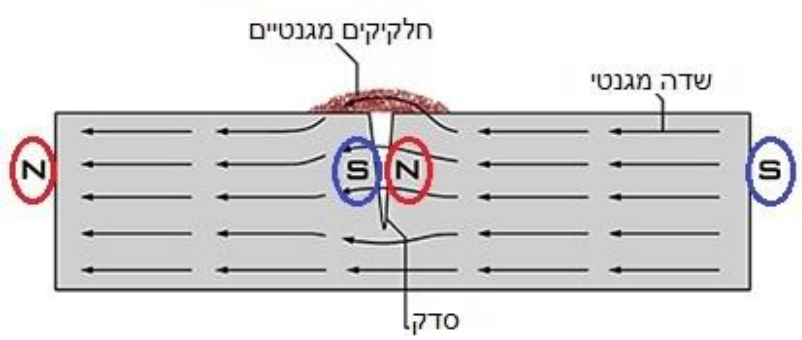
באיור הבא מוצג מגנט עם שבבים מתכתיים שממוקמים לאורך הקווים של שדה מגנטי. ניתן לראות כי השבבים מצטברים בצפיפות גדולה יותר בקטבים של המגנט.




מקור התמונה: toppr. Properties of Magnet: Types, Uses, Applications of Magnet. https://www.toppr.com/

מגנט מכיל שני קטבים – צפוני ודרומי. כאשר מחלקים את המגנט לשני חלקים, החלקים נשארים דו קוטביים, קוטב צפוני מנוגד לקוטב דרומי. סדק בחומר מגנטי מייצר דו קוטביות בתוך החלק בו הוא נוצר, כאשר דופן אחת של הסדק הופכת לקוטב צפוני והדופן שמנוגדת לו הופכת לקוטב דרומי.

שדה מגנטי שנוצר במקום הסדק מושך אליו חלקיקים המגנטים שנמצאים בסביבה והם מצטברים מסביב לסדק, כפי שמוצג באיור הבא.




מקור התמונה: David Newman, University of Alaska site, Physics in non-destructive testing. By Taylor Thrap [Updated]. http://ffden-2.phys.uaf.edu/

בדיקות אל הרס באמצעות בחלקיקים מגנטיים נמצאות בשימוש רחב. הדרישה היחידה למוצרים הנבדקים היא שהמוצר חייב להיות עשוי מחומר פרומגנטי כמו ברזל, ניקל, קובלט או חלק מסגסוגות שלהם. חומרים פרומגנטיים הם חומרים הניתנים למגנט לרמה שתאפשר בדיקה יעילה.

השיטה משמשת לבדיקת מגוון של מוצרים כגון מוצרי יציקה וחישול, תפרי ריתוך ועוד. תעשיות רבות ושונות משתמשות בבדיקת חלקיקים מגנטיים לצורך קביעת כושר של רכיב לשימוש. כמה דוגמאות לתעשיות המשתמשות בבדיקת חלקיקים מגנטיים הן הקמת מבני מתכת, תעשיית רכב, פטרוכימיה, ייצור חשמל, תעופה וחלל. בדיקות שמבצעים מתחת לפני המים הוא תחום נוסף בו ניתן להשתמש בבדיקת חלקיקים מגנטיים שנערכות על פריטים כמו מבנים ימיים וצינורות תת-מימיים.

בדיקת חלקיקים מגנטיים מתחת לפני המים. מקור התמונה: Impresub. N.D.T. (Non Destructive Test) Inspection. http://www.impresub.com/

## הגדרה

בדיקות אל-הרס – חלקיקים מגנטיים הינן בדיקות מוצרים עשויים מחומר פרומגנטי באמצעות השראת שדה מגנטי על המוצר ושימוש בחלקיקים מגנטיים שמצטברים מסביב לפגם.

חומרים פרומגנטיים הם חומרים הניתנים למגנט לרמה שתאפשר בדיקה יעילה.

הצטברות חלקיקים ניתן לראות באור טבעי או באור אולטרה סגול כאשר משתמשים בחלקיקים עם תכונות פלואורסצנטיות.

## שלבים של הבדיקה ורכיבים עיקריים של המערכת לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים

תהליך של בדיקות אל-הרס באמצעות חלקיקים מגנטיים מתבצע בשלבים הבאים:

א. מגנטיזציה של המוצר הנבדק;

ב. יישום חלקיקים מגנטיים על המוצר לנבדק;

ג. תצפית על החלקיקים וגילוי פגמים;

ד. דה-מגנטיזציה של המוצר.

הציוד לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים יכול להיות נייח ונייד.

### מגנטיזציה של המוצר הנבדק

את המגנטיזציה מבצעים על ידי השראת שדה מגנטי במוצר מאמצעות מגנט שיכול להיות מגנט קבוע או אלקטרומגנט.

#### מגנטים קבועים

מגנטים קבועים משמשים לעתים לבדיקת חלקיקים מגנטיים כמקור למגנטיות. שני הסוגים העיקריים של מגנטים קבועים הם מגנטים מסוג בר ומגנט מסוג פרסה (עול). מגנטים תעשייתיים קבועים בדרך כלל חזקים מאוד ונדרש מאמץ פיזי משמעותי בכדי להסיר אותם מהמוצר הנבדק, לכן השימוש בהם אינו פופולרי במיוחד. עם זאת, מגנטים קבועים משמשים לעתים על ידי צוללנים לבדיקה בסביבות תת-מימיות או באזורים אחרים, כמו סביבה נפיצה, בהם לא ניתן להשתמש באלקטרומגנטים [7].

להלן דוגמאות להמחשת מגנטים קבועים לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים.

מקור התמונה: Callington. PM-6 Permanent Magnet Yoke. https://www.callingtonhaven.com/

מקור התמונה: NDT Tech. Permanent Magnet Yokes. http://ndtproduct.com/

**אלקטרומגנטים**

כיום רוב הציוד המשמש ליצירת השדה המגנטי המשמש לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים מבוסס על אלקטרומגנטיות, כלומר, שימוש בזרם חשמלי לייצור השדה המגנטי.

עול אלקטרומגנטי הוא פריט ציוד נפוץ מאוד המשמש להקמת שדה מגנטי. מיצרים את העול על ידי עטיפת סליל חשמלי סביב חתיכת פלדה פרומגנטית רכה [NDT Resource Center].

להלן דוגמאות להמחשת לאלקטרומגנטים לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים.

מקור התמונה: Magnaflux. Y-2 AC electromagnetic yoke. https://www.magnaflux.com/

מקור התמונה: Jonson & Allen. JAY 'PAL' Option. https://www.johnsonandallen.co.uk/

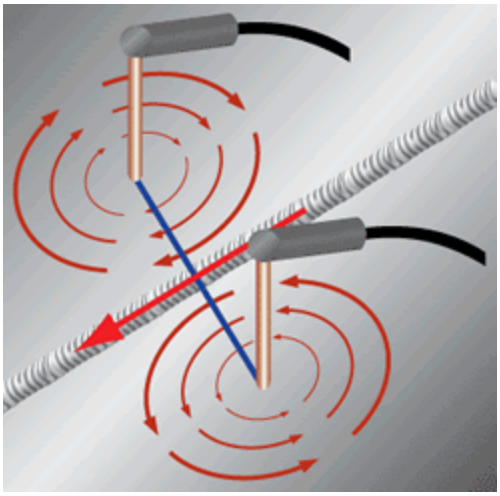
**דחפים**

דחפים (prods) הם אלקטרודות כף יד הנלחצות על פני שטח המוצר הנבדק כדי ליצור מגע לצורך העברת זרם חשמלי דרך המתכת. הזרם שעובר בין הדחפים יוצר שדה מגנטי מעגלי סביב הדחפים שניתן

להשתמש בו לבדיקת חלקיקים מגנטיים. הדחפים עשויים בדרך כלל מנחושת ויש להם ידית מבודדת המסייעת בהגנה על המפעיל. לפעמים בשיטה זו משתמשים במלחציים במקום בדחפים.

בשיטה זו השדה המגנטי נגרם על ידי זרם חשמלי באופן ישיר - אינדוקציה ישירה, להבדיל מאינדוקציה עקיפה של שדה מגנטי שנגרם על ידי מגנט [NDT Resource Center]..

להלן תמונות להמחשת תהליך יצירת שדה מגנטי על אינדוקציה ישירה ודוגמאות לציוד שמשתמשים בשיטה זאת.



בדיקת תפר ריתוך בשיטת חלקיקים מגנטיים עם יציר שדה מגנטי בעזרת דחפים. מקור התמונה: NDT Resource Center. Magnetic Particles Inspection (MPI). https://www.nde-ed.org/

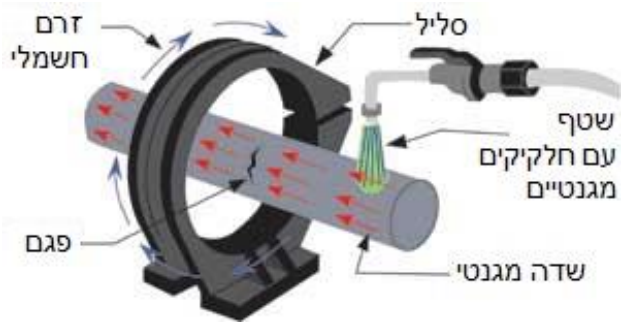
דחפים ומלחציים של חברת מגנפלקס. מקור התמונה: Magnaflux. Prods & Clamps for Magnetic Particle Inspection. https://www.magnaflux.com/

מערכת לבדיקה עם דחפים לבדיקת חלקיקי מגנטיים. מקור התמונה: Indiamart. Magnetic Particle Inspection Prod Unit Digital Type Model. https://www.indiamart.com/

### סליל או סולנואיד

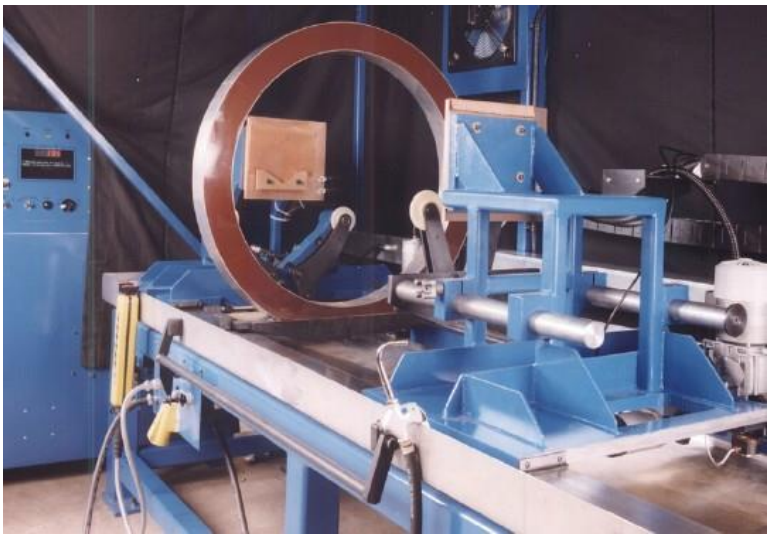
השימוש בסלילים ובסולנואידים (solenoid - מכשיר שממקד את השדה המגנטי שנוצר בסליל) היא שיטה נוספת למגנטיזציה עקיפה.

כאשר אורך המוצר גדול פי כמה מקוטרו, ניתן לייצור בו שדה מגנטי אורכי. כדי לעשות את זה המוצר ממוקמים לאורכו בשדה המגנטי שבמרכז הסליל או הסולנואיד.




איור סכמתי לבדיקת חלקיקים מגנטיים עם סליל. מקור התמונה: NDT Resource Center. MPI. Magnetization of Ferromagnetic Materials. https://www.nde-ed.org/

מערכת ניידת לבדיקת חלקיקים מגנטיים עם סליל. מקור התמונה: Magnaflux. Portable Magnetic Coils for Magnetic Particle Inspection. https://www.magnaflux.com/



מערכת נייחת לבדיקות חלקיקים מגנטיים עם סליל. מקור התמונה: Insight NDT. Bench unit for large aerospace components. https://www.insight-ndt.com/

## יישום חלקיקים מגנטיים על המוצר לנבדק

### חלקיקים מגנטיים

חלקיקים מגנטיים הם מרכיב מרכזי לבדיקה מכיוון שהם מהווים את האינדיקציות המתריעות על פגמים. החלקיקים עשויים פיסות ברזל או תחמוצת ברזל קטנות שנוצרות באמצעות טחינת מכאנית. לחלקיקים מוסיפים פיגמנט שמתקשר לשטח הפנים שלהם בכדי לתת לחלקיקים צבע [NDT Resource Center].

החלקיקים יכולים להיות בתערובת יבשה או בתמיסה רטובה כמו מים או נפט.

חלקיקים פלואורסצנטיים מצופים בחומר פלואורסצנטי ולתצפית עליהם משתמשים באור אולטרה סגול.

פרטים לגבי שימוש בחומר פלואורסצנטי לבדיקות אל-הרס ניתן לראות תהליך 113 בדיקות אל-הרס – נוזל חודר פלואורסצנטי.

להלן תמונות להמחשת אריזות של חלקיקים מגנטיים.

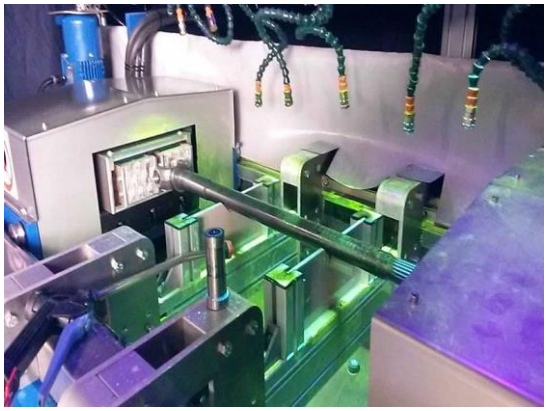
חלקיקים מגנטיים יבשים. מקור התמונה: MagWerks. Magnetic Particle Inspection Equipment & Supplies. http://www.magwerks.com/

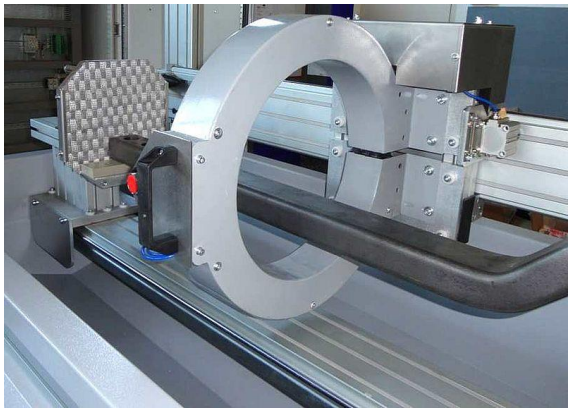
נוזל עם חלקיקים מגנטיים פלואורסצנטיים. מקור התמונה: Force Technology. MAGNAGLO®MF-655 WB Fluorescent magnetic liquid concentrate. https://ndtproducts.forcetechnology.com/

**יישום חלקיקים במערכות נייחות**

המערכת הנייחת הנפוצה ביותר היא היחידה האופקית (ספסל, bench) המשמשת לבדיקות באמצעות נוזל עם חלקיקים מגנטיים, מגנטיזציה של החלק הנבדק יכולה להיות ישירה, על ידי זרם חשמלי שעובר דרך החלק, או באמצעות סליל שהחלק הנבדק ממוקם בתוכו. כמו כן, ניתן למגנט חלקים עם מרכז פתוח, כגון גלגלי הילוכים, צינורות וחפצים אחרים בצורת טבעת, באמצעות מוט חשמלי שממוקם בפתח של החלק.

להלן תמונות להמחשת יישום חלקיקים מגנטיים במערכות מייחות.





מערכות "ספסל" עם מגנטיזציה ישירה ועם מגנטיזציה באמצעות סליל. מקור התמונות: MRChemie. Test benches for Magnetic Particle Testing. https://www.mr-chemie.de/

**יישום חלקיקים במערכות ניידות**

מכיוון שחלק ניכר מהבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים מבצעים בשטח, קיים ציוד נייד שמיועד לביצוע בדיקות כאלה.

להלן דוגמאות של כלים ניידים ושימוש בהם בשטח.

סט כלים ניידים לבדיקות באמצעות חלקיקים מגנטיים. מקור התמונה: Johnson & Allen. Portable NDT Yoke Kit. https://www.johnsonandallen.co.uk/

מקור התמונה: Globetrace. Magnetic Particles Inspection (MPI). http://www.globetrace.co.uk/

מקור התמונה: Olgoonik Inspection Services LLC. https://olgoonikinspectionservices.com/

**ספקי כוח**

להשראת שדה מגנטי בבדיקות שטח משתמשים בזרם חשמלי, ספקי כוח מספקים את החשמל הדרוש לדחפים, סלילים או כבלים. ספקי כוח זמינים במגוון גדלים. החשמל יכול להיות ישיר או עם זרם חילופין.

להלן דוגמאות להמחשת ספקי כוח ניידים.

מקור התמונות: Magnaflux. Power Packs & Electromagnetic Current Generators. https://www.magnaflux.com/

### דה-מגנטיזציה של המוצר

לאחר עריכת בדיקת חלקיקים מגנטיים יש צורך להסיר את השדה המגנטי מהמוצר הנבדק – לבצע דה-מגנטיזציה. ניתן לעשות את זה על ידי חימום של המוצר לטמפרטורה גבוהה או על ידי השראת שדה מגנטי באמצעות סליל.

להלן תמונות להמחשת מכשירי דא מגנטיזציה (דאמגנטייזרים) מסוגים שונים.

דה-מגנטייזר תעשייתי. מקור התמונה: Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields. Volume 2, Case studies. https://op.europa.eu/

דה-מגנטייזר נייד. מקור התמונה: Magnaflux. S-66 Demagnetization Coil. https://www.ndtsupplies.com/

## בדיקות אל-הרס על הגובה, במקומות מוקפים ומתחת לפני המים

את הבדיקות מבצעים הן במצבים רגילים והן במצבים קיצוניים, כמו בדיקות בגובה או במקומות מוקפים ובדיקות קונסטרוקציות מתחת לפני המים.

בעבודות אלה סיכונים מיוחדים ונדרשת נקיטת אמצעי בטיחות נוספים בהתאם לסוג העבודה.

להלן תמונות להמחשת סוגים שונים של בדיקות אל-הרס במצבים קיצוניים.

ביצוע בדיקה על הגובה. מקור התמונה: MIRA Rope Access. Non-Destructive Testing. https://www.mira-ra.com/

ביצוע בדיקה במקום מוקף. מקור התמונה: UTComp. Toward Zero Confined Space Entry. September 18, 2018. https://utcomp.com/

בדיקת חלקיקים מגנטיים מתחת לפני המים. מקור התמונה: Hydrus Inc. Gallery. Magnetic Particles Inspection. http://www.hydrus.ph/

בשנים אחרונות מתפתחות שיטות לבדיקות אל-הרס במצבים קיצוניים באמצעות רחפנים (דרונים). להלן תמונה להמחשת שיטות כאלה.

בדיקת עובי של דופן המיכל באמצעות דרון. מקור התמונה: Technology Catalog. RoNik UT drone - wall thickness measurements. https://www.technologycatalogue.com/

## אפקטים ביולוגיים של שדה מגנטי

שדות חשמליים ומגנטיים קיימים בכל מקום בו נוצר חשמל, מועבר או מופץ בקווי חשמל או בכבלים, או נמצא בשימוש במכשירי חשמל. מכיוון שהשימוש בחשמל הוא חלק בלתי נפרד מאורח החיים המודרני שלנו, שדות אלה נמצאים בכל מקום בסביבתנו [8].

שדות בעלי תדירות עד 10 מה"ץ משרים בתוך הרקמות של הגוף זרמי מערבולת שעלולים להשפיע על התכונות החשמליות של תאים חיים ולשנות את תפקודם;

סיכונים אלה תלויים בעוצמת השדות שיכולה להשתנות. על פי הפרסום של מינהל הבריאות והבטיחות של ממשל הבריטי (HSE), בין המקצועות שבהם העובדים עלולים להיחשף לשדות חשמליים ומגנטיים ברמות יחסית גבוהות נמצאים העובדים עם "מערכות חשמל" – תחנות חשמל, שירות לקווי חשמל בעלות מתח גבוה וכו'. כמו כן, למקצועות כאלה שייכים רתכים, עובדים בתהליכי חימום והלחמה באמצעות אינדוקציה, עובדים עם ציוד רפואי MRI ואחרים .

על פי הפרסום, עובדים בבדיקות אל-הרס באמצעות חלקיקים מגנטיים גם עלולים להיחשף לשדות מגנטיים ברמות יחסית גבוהות [9].

נכון להיום המידע על רמות החשיפה של עובדים לשדות מגנטיים בעת ביצוע בדיקות אל-הרס, שנמצא בספרות מקצועית, מאוד מוגבל. במאמר שהתפרסם בשנת 2007 נחקרו רמות החשיפה של עובדים בבדיקות חלקיקים מגנטיים במפעל לתיקון טורבינות. המפלסי השיא שנבדקו נעו בין פחות מ-0.1 עד 29.27 מיליטסלה (miliTesla (mT)) [10].

### שדה מגנטי כגורם מסרטן

בשנת 1979 התפרסם מאמר של ורטהיימר (Wertheimer) וליפר (Leeper), אשר לראשונה הצביע על קשר אפשרי בין לוקמיה אצל ילדים לבין חשיפה במקום מגוריהם לשדה מגנטי בתדירות של 50 הרץ, שנובע מקווי חשמל. חוקרים אחרים מצאו כי ההוכחות שהוצגו במחקר זה לא היו מספיק מבוססות, אך בהמשך בוצעו מחקרים רבים בנושא והתוצאות שהתקבלו היו מאוד קונטרוברסליות

בשנת 2002 התפרסמה מונוגרפיה של הסוכנות הבינלאומית לחקר סרטן (IARC) בה הוצגו תוצאות של ניתוח מקיף של המחקרים שפורסמו עד אז בנושא. הסוכנות קובעה כי קיימות עדויות, אומנם מוגבלות, לסכנת פגיעה במחלת סרטן, כתוצאה מחשיפה לשדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד (עד 100 קה"ץ, Extremely Low Frequency) ביחס ללוקמיה אצל ילדים. עם זאת, לא התקבלו הוכחות לסכנת פגיעה במחלת סרטן משדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד בניסוים על חיות ואין עדויות על שדות סכנות שדות אלה ביחס לסוגי סרטן אחרים.

את כל הגורמים, שלגביהם בוצע ניתוח מחקרים, הסוכנות מסווגת, בהתאם לסרטניות שלהם, לארבע קבוצות:

קבוצה 1 – מסרטנים וודאיים (Carcinogenic to humans)

קבוצה 2A - גורמים שקרוב לוודאי מסרטנים (Probably carcinogenic to humans)

קבוצה 2B – מסרטנים אפשריים (Possibly carcinogenic to humans)

קבוצה 3 – גורמים שאינם מסווגים כמסרטנים (Not classifiable as to its carcinogenicity)

בהקשר לשדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד, הסוכנות משייכת אותם לקבוצה 2B – מסרטנים אפשריים.

### רגולציה של חשיפה לשדות מגנטיים

בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), תשע"א-2011, הרגולציה של חשיפה תעסוקתית לשדות מגנטיים בארץ מבוססת על המלצות ההתאגדות האמריקאית של הגיהותנים התעשייתיים הממשלתיים (ACGIH).

הערכים המותרים הגבוליים (ערכי תקרה – Ceiling value) בהמלצות נקבעו בהתאם לתדירות של שדה. בטווח עד 300 הרץ הערך המרבי המותר הינו 60/f מיליטסלה (millitesla, mT) כאשר f - תדירות בהרץ. לפיכך, לשדה מגנטי בעוצמה (צפיפות השטף המגנטי – magnetic flux density) של 60 מיליטסלה בתדירות של 60 הרץ (זרם חילופין בקווי חשמל רגילים) הערך המרבי המור שווה 1 מיליטסלה [11].

## סיכונים בטיחותיים

### מגע עם עצמים חמים

**זיהוי:**

העובד עלול להיפגע בכוויות כתוצאה ממגע עם מיכלים או צינורות חמים עליהם מבצעים את הבדיקה.

**בקרה:**

א. חובה להשתמש בביגוד בעל שרוולים ארוכים, מכנסיים ארוכים, כפפות, משקפיים וקובע מגן;
ב. הימנעות ממגע עם חלקים חמים ולפי הצורך שימוש בכפפות נגד חום לצורך מגע עם החלק הנבדק.

### פגיעה בעובד כתוצאה מנפילתו מגובה

**זיהוי:**

עבודה בגובה הינה כל עבודה, לרבות גישה למקום העבודה, שבשלה עלול עובד ליפול לעומק העולה על 2 מטרים [12].

**בקרה:**

עבודות בגובה מוסדרות בחקיקה הרלוונטית בנושא. את העבודות יש לבצע בהתאם לדרישות תקנות הבטיחות בעבודה (עבודה בגובה), תשס"ז-2007.

### פגיעה בעובדים בעת ביצוע בדיקות בתוך מקומות מוקפים

**זיהוי:**

פגיעה בעובדים בעת עבודה בתוך מקומות מוקפים עקב הרעלה מאדי חומרים שמשתחררים במקום או חנק בשל חוסר חמצן באוויר.

**בקרה:**

בעת כניסת אדם למקום מוקף:

א. העובד חייב להשתמש במכשיר נשימה מתאים;
ב. חובה לנקוט בכל האמצעים המעשיים לסילוק אדים העלולים להיות שם ולמנוע חדירת אדים למקום המוקף;
ג. כל עוד לא הראה מבחן נאות שאין במקום אדים מסוכנים יהיה האדם הנכנס חגור חגורה שאליה מחובר לבטח חבל שקצהו החופשי מוחזק בידי אדם בחוץ;
ד. במקומות עבודה בהם עלולים להיווצר אדים רעילים במהלך ביצוע עבודות (כגון בור ביוב) יש להקפיד על שימוש בציוד נשימה עם הספקת אוטונומית של אוויר.

### פגיעה בעובד בעבודה מתחת לפני המים

**זיהוי:**

פגיעה בעובדים בעת ביצוע עבודות צלילה תעסוקתית אשר מהווה סיכון מיוחד עקב תנאי הסביבה קיצוניים ושימוש בציוד מיוחד.

**בקרה:**

בישראל קיים נהל תפעול והתנהגות (Codes of Practice) אשר מגדיר את דרישות הבטיחות בצלילה תעסוקתית [13].

הדרישות העיקריות של הנוהל:

א. בדיקת כשירות לעבודות צלילה תעסוקתית לפני הצלילה והתאמה רפואית למקצוע;

ב. הכשרה לעיסוק בעבודות צלילה תעסוקתית וקבלת הסמכה;

ג. הנחיות הבטיחות לקראת צלילות תעסוקתיות:

a. ציוד צלילה מתאים;

b. חובות המעסיק, כולל מינוי ראש צוות צלילה, מינוי והעסקה של מפקח צלילה, ביצוע הדרכה לפני כל צלילה, תיעוד פעולות צלילה, ווידואי אמצעי פינוי ועזרה רפואית מתאימים לסוג הצלילה ועוד.

### סיכוני פגיעה מחשמל

**זיהוי:**

העובד עלול להיפגע כתוצאה מהתחשמלות/מכת חשמל הנובעת משימוש בציוד חשמלי לא תקין בשעת ביצוע בדיקות עם ציוד חשמלי.

מכת חשמל (שוק) הנה תוצאה של מעבר זרם דרך הגוף בעוצמה הגורמת לתופעות פיסיולוגיות שליליות. חומרת המכה תלויה בכמות הזרם, משך ההופעה ומסלולו.

**בקרה:**

א. לצורך מניעת פגיעה עקב התחשמלות יש להשתמש בציוד חשמלי תיקני, תקין ובדוק בהתאם לחוק החשמל, תשי"ד – 1954 ובשיטות עבודה בטוחות בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (חשמל), התש"ן – 1990;

ב. מכשור חשמלי ייבדק תקופתית על ידי חשמלאי מוסמך. הבדיקות תתועדנה ותשמרנה.

### חשיפה לשדה מגנטי סטטי או בתדירות נמוכה מאוד

**זיהוי:**

בעת ביצוע בדיקות אל-הרס באמצעות חלקיקים מגנטיים העובדים עלולים להיחשף לשדה מגנטי ברמות גבוהות.

**בקרה:**

יש לבצע הערכה לרמות החשיפה של העובדים לשדה מגנטי ולנקוט באמצעים המגבילים את החשיפה לרמות שאינן עולות על הערכים הגבוליים המותרים לפי המלצות ההתאגדות האמריקאית של הגיהותנים התעשייתיים הממשלתיים (ACGIH).

## מניעת מפגעים (נוהג טוב)

ניהול היבטי הבטיחות בעבודות בדיקת אל-הרס באמצעות חלקיקים מגנטיים 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 עובד יש לדאוג לביצוע הדרכה בנוגע לסיכונים בעבודה, שימוש אמצעים להפחתת סיכונים לרבות אמצעי מיגון אישי, התנהגות בעת אירוע חריג לרבות תאונה וכמעט תאונה [14].

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

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

### 2. נפילה מגובה

לבצע עבודות בגובה (מעל 2 מטר ממשטח העבודה) רק כאשר קיים גידור או מעקה תקני או כאשר העובד מאובטח במשך כל זמן העבודה באמצעות מערכת למניעת או בלימת נפילה מגובה.

**3. עבודה במקומות מוקפים**

א. העובד חייב להיות מצויד במכשיר נשימה מתאים;

ב. חובה לנקוט בכל האמצעים המעשיים לסילוק אדים העלולים להיות שם ולמנוע חדירת אדים למקום המוקף;

ג. כל עוד לא הראה מבחן נאות שאין במקום אדים מסוכנים יהיה האדם הנכנס חגור חגורה שאליה מחובר לבטח חבל שקצהו החופשי מוחזק בידי אדם בחוץ;

ד. במקומות עבודה בהם עלולים להיווצר אדים רעילים במהלך ביצוע עבודות (כגון בור ביוב) יש להקפיד על שימוש בציוד נשימה עם אספקת אוטונומית של אוויר.

**4. עבודה מתחת לפני המים**

ביצוע עבודות של צלילה בהתאם לנהלי תפעול והתנהגות בצלילה תעסוקתית.

**5. פגיעה מכנית**

א. שימוש בביגוד בעל שרוולים ארוכים, מכנסיים ארוכים;

ב. הרכבת משקפי מגן;

ג. הגנת ראש על ידי קובע מגן תיקני;

ד. הגנת כפות הרגליים על ידי נעלי בטיחות תקניות.

**6. סיכוני פגיעה מחשמל**

א. ביצוע עבודות חשמל רק על ידי חשמלאי מוסמך;

ב. שימוש בציוד חשמלי תקני, תקין ובדוק;

ג. בדיקה תקופתית של הציוד החשמלי.

**7. חשיפה לשדה מגנטי**

הערכת חשיפה לשדה מגנטי ונקיטת אמצעים להגבלתה בהתאם לדרישות של תקנות הבטיחות בעבודה.

## ביבליוגרפיה


1. The Saxby Gale. Albert County Museum & Rb Bennett Centre. https://www.albertcountymuseum.com/the-saxby-gale

2. The Compass and its Evils. The Nautical Magazine and Naval Chronicle for 1856. Cambridge University Press, Feb 2013. https://books.google.co.il/

3. Saxby's Spherograph. The Nautical Magazine and Naval Chronicle for 1857. https://books.google.co.il/

4. Saxby S.M.: The Testing of Iron by Magnetism. Engineering, 1868. Vol.5: pp 267-269. Grace's Guide to British Industrial History. https://www.gracesguide.co.uk/Engineering_1868_Jan-Jun:_Index

5.United State Patent Office. William E. Hoke, of Washington, district of Columbia. Method of and Means for Detecting Defects in Paramagnetic Material. 1,426,384. https://patentimages.storage.googleapis.com/75/80/e8/d9fdd46e7416dd/US1426384.pdf

6. Deutsch V.: History of NDT-Instrumentation. 15th World Conference on Nondestructive Testing. Roma (Italy) 15-21 October 2000. https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn378/idn378.htm

7. NDT Resource Center. Magnetic Particles Inspection (MPI). https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Equipment/EquipmentPortable.htm
8. WHO. Environmental Health Criteria 238. Extremely Low Frequency Fields . World Health Organization 2007. https://www.who.int/peh-emf/publications/Complet_DEC_2007.pdf
9. HSE. Electromagnetic fields at work A guide to the Control of Electromagnetic Fields at Work Regulations 2016. Health and Safety Executive, HSG281, 2016. https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg281.pdf
10. Lippert J. F., Lacey S. E., Kennedy K. J. et al.: Magnetic Field Exposure in a Nondestructive Testing Operation. Archives of Environmental & Occupational Health. Volume 62 (4), 2007 pp: 187-193.
11. ACGIH. 2019 TLVs® and BEIs®. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2019.
12. תקנות הבטיחות בעבודה (עבודה בגובה), התשס"ז-2007 .
13. צלילה תעסוקתית, Codes of Practice, נהלי תפעול והתנהגות. מינהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית. משרד התעשייה, המסחר והתעסוקה, מרץ 2012.
https://employment.molsa.gov.il/Employment/SafetyAndHealth/Mafar/MafarInstructions/DivingCodeOfPractice.pdf
14. תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (מסירת מידע והדרכת עובדים), תשנ"ט-1999.