

פליטה אקוסטית

מאת: ד"ר בוריס מורבין

מבוא

פליטה אקוסטית (Acoustic Emission) הינה תופעה פיזיקאלית של פליטת קול עקב דפורמציה או התפתחות שבר בחומר. מקורות פליטה אקוסטית בחומרים מבניים (מתכות, חומרים מרוכבים, עץ) הם פגמים מקרוסקופיים או מיקרוסקופיים שונים, כגון סדקים, אי-רציפויות, חללים ותכלילים של חומרים זרים אשר מתפתחים בגוף השרוי בתנאי מאמץ ע"י כוח חיצוני משתנה או קבוע, לחץ פנימי או שינוי טמפרטורה. מקורות נוספים של פליטה אקוסטית יכולים להיבצר בזמן שינויים מבניים בחומר. תהליך התפתחות הפגמים מלווה בשחרור אנרגיה בצורה של גלי מאמץ (stress waves) אשר מתפזרים בתוך החומר. טווח התדרים של הפליטה אקוסטית נע בין 20KHz-1MHz. שיטה בדיקה לא הרסנית (בל"ה) המתבססת על תופעת הפליטה האקוסטית נקראת שיטת פליטה אקוסטית. השיטה מאפשרת זיהוי ומיקום (איור 1) של מקורות הגורמים לפליטה אקוסטית בחומר על ידי חיישנים פייזואלקטריים. טכנולוגיות מתקדמות מאפשרות זיהוי סוג הפגם ולערכת רמת סיכנון.

היסטוריה

ההיסטוריה של הפליטה האקוסטית מתחילה למעשה מתקופת האדם הקדמון. כבר בתקופה זאת, הקדמונים הבחינו והשתמשו בקולות שנשמעו במהלך שבירתם של אבנים, עץ או חרסין. כך למשל במהלך הכנת כלי החרס, פליטת הקול ממנו סייעה בשליטת קצב קירורה, כל זאת על מנת לקבל כלי חרס איכותיים ללא סדקים.

תצפית ורישום ראשונים של פליטה אקוסטית נעשו על בדיל בידי גאבר, אלכימאי ערבי, במאה השמינית לספירה. עם זאת, מחקרים מדעיים של התופעה בחומרים הנדסיים שונים בוצעו רק בתחילת המאה העשרים וקיבלו תאוצה בשנות ה-50 וה-60 של מאה זו עם פיתוח יישומים הנדסיים של פליטה אקוסטית כשיטת בדיקה בלתי הורסת (בל"ה). בעקבות המחקרים, התגלה שניתן לזהות ולנתח את אותות הפליטה האקוסטית, אשר מספקות מידע אודות הפגם ומקורו בחומר ולכן ניתן להשתמש בתופעת הפליטה האקוסטית על מנת לבצע בדיקות לא הרסניות (בל"ה). בשנות ה-60 המאוחרות, הוקמה חברה ראשונה שהציעה בל"ה על בסיס פליטה אקוסטית.

יישומים

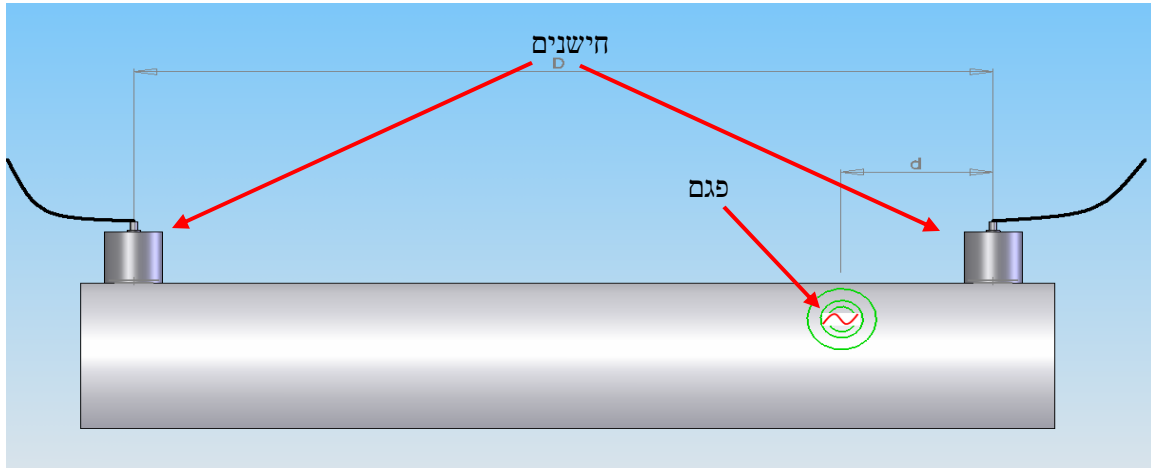
היום קיים מגוון רחב של יישומים תעשייתיים של בדיקות בעזרת פליטה אקוסטית כגון: בדיקות מיכלי לחץ עשויים ממתכת או חומרים מרוכבים, צנרת, בקרת איכות ריתוכים, בדיקות מבני בטון ובטון מזוין כמו גשרים ומנהרות. יתר על כן, באמצעות פליטה אקוסטית ניתן ללמוד על תכונות שונות של חומרים.

השיטה מיושמת גם בתעשיות התעופה, החלל והים. קיימים גם תחומים נוספים כמו רפואה, בהם השימוש בשיטה עדיין בשלבי פיתוח. דוגמא ליישום מעולם הרפואה הוא בדיקת התאמתם של שתלים אורטופדיים לתנאי העבודה בסביבות עוינות. בשנים האחרונות ישנם עבודות החוקרות קצבי תגובות כימיות באמצעות פליטה אקוסטית.

נוסף לזיהוי פגמים אופייניים כמו שבר התעייפות, קורוזיה מאמצים וסדקים שונים ניתן לזהות באמצעות פליטה אקוסטית תקלות בשסתומים, במערכות מכאניות ונזילות בצנרת או מיכלים. תחום המחקר והפיתוח של שיטת הפליטה האקוסטית מתמקד כיום בחקר תכונות החומרים ולימוד התנהגותם בתנאים סביבתיים קשים ותחת מאמצים שונים.

פליטה אקוסטית הינה ייחודית מבין שיטות בל"ה בשני היבטים עיקריים:

- הבדיקה מגלה תהליכים דינאמיים בחומר עקב התפתחות שבר או דפורמציה או שינוי מבני בחומר ובכך למשל ניתן להבדיל בין פגמים מתפתחים או סטטיים.
- בדיקה בעזרת פליטה אקוסטית נעשית בדרך כלל בתנאי עבודה רגילים של המבנה עם מספר מצומצם של חישנים אשר בודקים את כלל המבנה בו זמנית.



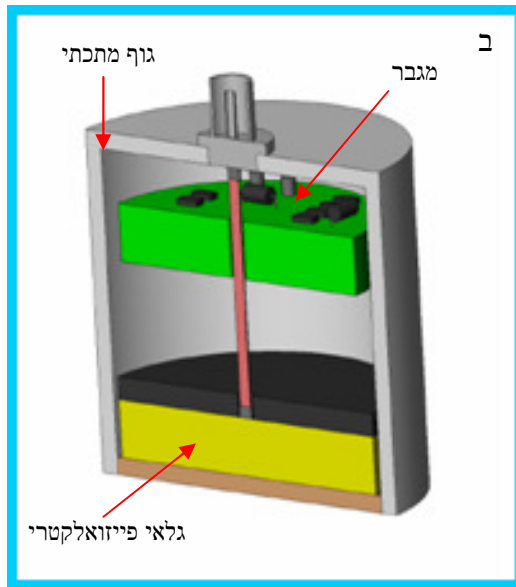
איור 1: מבנה סכמתי של מערכת בדיקה של צינור.

ציוד המדידה

הציוד הבסיסי למדידת פליטה אקוסטית מורכב ממספר פריטים:

1. חישן פיזוואלקטרי הממיר זעזוע מכאני אל פני המבנה לאות חשמלי. החישן מורכב מגוף מתכתי עם אלמנט קרמי פיזוואלקטרי (איור 2).
2. מגבר שתפקידו להגביר את האות החשמלי שמתקבל מהחישן הפיזוואלקטרי. המגבר יכול להיות כיחידה נפרדת (איור 3) או מותקן בגוף החישן (איור 2ב).
3. כרטיס מחשב לקליטה, מספור ועיבוד אותות (איור 4).
4. כבלים לחיבור כל חלקי המערכת.

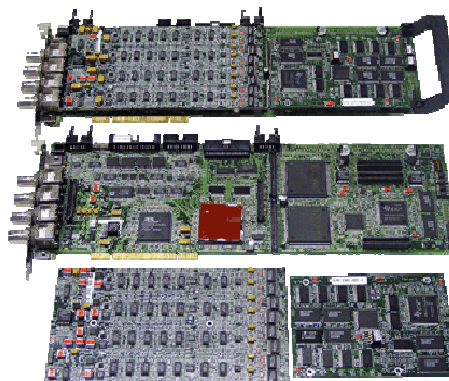
במהלך ביצוע המדידה התכונות המאפיינות את הגלים הנפלטים כגון: אמפליטודה, אנרגיה, משך האירוע, ספירות, תדר ממוצע וכ"ו (איור 5), מחושבות באמצעות כרטיס ותוכנה יעודיים ונשמרות בתוך קובץ במחשב.



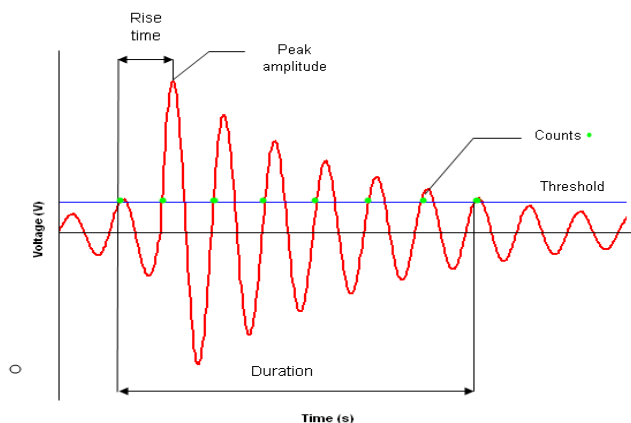
איור 2: צילום של חישן רגיל (א) והצגה סכמאטית של חישן אינטגרלי, חישן + מגבר, (ב).



איור 3: מגבר חיצוני.



איור 4: כרטיסי PCI לקליטה ועיבוד אותות של פליטה אקוסטית.



איור 5: תכונות אופייניות של גל המתאר את של פליטה אקוסטית.

הערכת מיקום הפגמים

באמצעות שיטת הפליטה האקוסטית ניתן למקם את האזורים בהם ישנה פעילות אקוסטית עקב התפתחות הפגמים. לצורך כך פותחו מספר שיטות מיקום כאשר שימוש בשיטה זו או אחרת תלוי בגיאומטריית הגוף הנבדק וברמת הדיוק הנדרשת.

שיטות המיקום המתבססות על שלושה עקרונות עיקריים:

- חישוב הפרשי זמנים בין הגעת האותות לחישנים.
- קרוס קורלציה בין האותות המתקבלים.
- מיקום אזורי – החישן בעל אמפליטודה או אנרגיה הגבוהה ביותר הוא הקרוב ביותר למקור האירוע.

המיקום הליניארי הוא דוגמא לשימוש הנפוץ ביותר במיקום בשיטת הבדלי זמן. השיטה מבוססת על הבדלי זמן בין הגעת האותות המתקבלים בשני חישנים סמוכים למקור ומיושמת בדרך כלל למציאת מיקום פגמים בצינורות (איור 5). חישוב המרחק מתבצע באמצעות נוסחה 1.

$$(1) \quad d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \cdot V)$$

כאשר:

- d מרחק בין המקור לגלאי הקרוב יותר.
- D מרחק בין גלאים.
- V מהירות קול בחומר.

יתרונות שיטת הפליטה האקוסטית

לשיטה יש מספר רב של יתרונות ייחודיים, ובכללם:

- זיהוי מוקדם של פגמים וסדקים בשלבי התפתחות.
- רגישות גבוהה (יכולת זיהוי של פגמים מיקרוסקופיים).
- ניתן להבדיל בין פגם מתפתח לפגם יציב.
- יכולת ביצוע בדיקה בתנאי עבודה אמיתיים ובזמן אמת.

- אין צורך בסריקה של כל פני שטח החלק הנבדק.
- התקנה פשוטה ללא צורך בהסרת אזורים גדולים של בידודים או הכנות פני שטח מיוחדות.
- יכולת מיקום מדויק של אזורים פגומים.
- על ידי פענוח תוצאות ניתן לדעת את סוג הפגם ורמת חומרתו.

מגבלות השיטה:

- הבדיקה נעשית בתנאי מאמץ רגילים של המבנה.
- פענוח נתונים מרכב ודורש מומחיות ומיומנות גבוהה.
- הגדרת סוג הפגם ורמת הסיכון נעשות על ידי שיטות פענוח מתקדמות.
- הערכת מיקום פחות מדויקת בהשוואה לשיטות מקומיות אקטיביות. הטעות האופיינית יכולה להיות כ-5-10% מהמרחק בין החישנים.

קהילות

מספר ארגונים בין לאומיים העוסקים בתחום פליטה אקוסטית הולך וגדל עם הזמן. בין התפקידים החשובים של ארגונים אלה הם חקר והפצה של השיטה. בין הגופים הגדולים נמנים:

- Acoustic Emission Working Group (AEWG) USA
- Japanese Committee on Acoustic Emission (JCAE)
- European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)

תקנים

במהלך השנים עם צבירת ניסיון ושימוש רב בשיטה נוצר צורך בקביעת תקנים המגדירים את תהליך הבדיקה, שיטת הפענוח, ודרישות לצוות המבצע. מספר תקנים הקשורים בבדיקות בל"ה המבוססות על פליטה אקוסטית הוא כמספר התקנים של השיטות האחרות כמו בדיקה אולטרא סוניית או בדיקת חלקיקים מגנטיים. ישנם גופים רבים במדינות שונות המפתחים סטנדרטים לביצוע בדיקות של מבנים שונים. התקנים מתייחסים לנושאים כמו:

- מעקב אחרי תקינות ציוד הבדיקה.
- שיטות לכיול הציוד.
- קביעת נהלים לביצוע בדיקות למבנים שונים.

הגופים הגדולים האחראיים על הוצאת התקנים הם:

- ASME - American Society of Mechanical Engineers, www.asme.org
- ASTM - American Society for Testing and Materials, www.astm.org
- ANST - American Society for Nondestructive Testing, www.asnt.org
- International Organization for Standardization, www.iso.org

להלן רשימה חלקית של תקנים בתחום פליטה אקוסטית:

ASME - American Society of Mechanical Engineers

- Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels, Article 11, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code
- Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing, Article 12, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code
- Continuous Acoustic Emission Monitoring, Article 13 Section V

ASTM - American Society for Testing and Materials

- E569-97 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation
 - E650-97 Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors
 - E749-96 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Continuous Welding
 - E750-98 Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation
 - E976-00 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
 - E1067-96 Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels
 - E1106-86(1997) Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors
 - E1118-95 Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP)
 - E1139-97 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries
 - E1211-97 Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors
 - E1316-00 Standard Terminology for Nondestructive Examinations
 - E1419-00 Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission
 - E1781-98 Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors
-
- E1932-97 Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small Parts
 - E1930-97 Standard Test Method for Examination of Liquid Filled Atmospheric and Low Pressure Metal Storage Tanks Using Acoustic Emission
 - E2075-00 Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod
 - E2076-00 Standard Test Method for Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Fan Blades Using Acoustic Emission

ASNT - American Society for Nondestructive Testing

- ANSI/ASNT CP-189, ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel.

- CARP Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Pressurized Highway Tankers Made of Fiberglass reinforced with Balsa Cores.
- Recommended Practice No. SNT-TC-1A.

Association of American Railroads

- Procedure for Acoustic Emission Evaluation of Tank Cars and IM-101 tanks, Issue 1, and Annex Z thereto, “ Test Methods to Meet FRA Request for Draft Sill Inspection program, docket T79.20-90 (BRW) ,” Preliminary 2

Compressed Gas Association

- C-1, Methods for Acoustic Emission Requalification of Seamless Steel Compressed Gas Tubes.

European Committee for Standardization

- DIN EN 14584, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Examination of Metallic Pressure Equipment during Proof Testing; Planar Location of AE Sources.
- EN 1330-9, Non-Destructive Testing – Terminology – Part 9, Terms Used in Acoustic Emission Testing.
- EN 13477-1, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Equipment Characterization – Part 1, Equipment Description.
- EN 13477-2, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Equipment Characterization – Part 2, Verification of Operating Characteristics.
- EN 13554, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – General Principles.

Institute of Electrical and Electronics Engineers

- IEEE C57.127, Trial-Use guide for the Detection of Acoustic Emission from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers.

International Organization for Standardization

- ISO 12713, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers.
- ISO 12714, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection – Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
- ISO 12716, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection – Vocabulary
- ISO/DIS 16148, gas Cylinders – Refillable Seamless Steel gas Cylinders – Acoustic Emission Examination (AEE) for Periodic Inspection.

Japanese Institute for Standardization

- JIS Z 2342, Methods for Acoustic Testing of Pressure Vessels during Pressure Tests and Classification of Test Results.

Japanese Society for Nondestructive Inspection

- NDIS 2106-79, Evaluation of performance Characteristics of Acoustic Emission Testing Equipment.
- NDIS 2109-91, Methods for Absolute calibration of Acoustic Emission Transducers by Reciprocity Technique.
- NDIS 2412-80, Acoustic Emission Testing of Spherical Pressure Vessels of High Tensile Strength Steel and Classification of Test Results.