

הרצאה בנושא  
**צנרת תת קרקעית:**  
**הגנה מפני קורוזיה**  
**באמצעות אינהיביטורים**

מהנדס חגי שושני

ניצוץ – ייעוץ לתעשייה, ת.ד. 15096 רחובות 7615002,

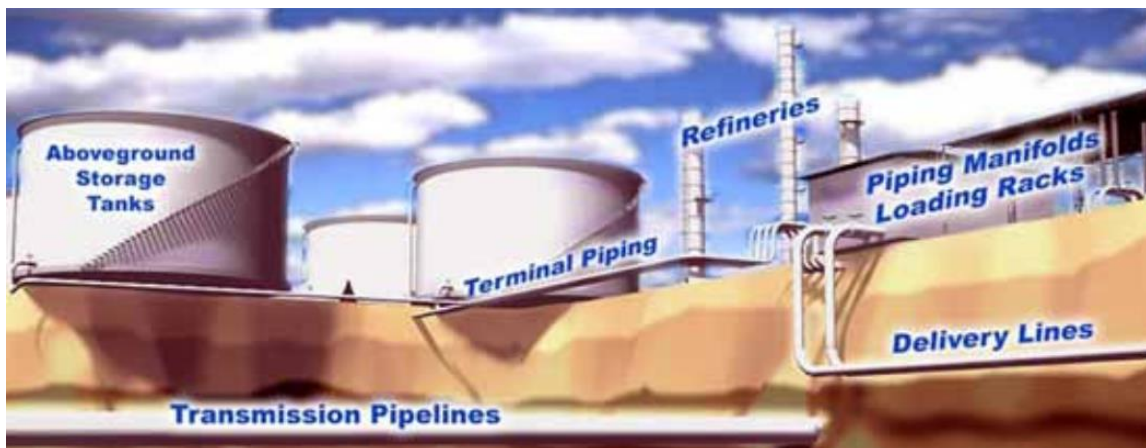
[office@glimmer.co.il](mailto:office@glimmer.co.il)

**Under-Ground Pipes:**  
**Corrosion Suppression By MCIs**

**Eng. Haggai Shoshany**

Glimmer – Industrial Consultation, P.O.B 15096 Rehovot, Israel, 7615002

[office@glimmer.co.il](mailto:office@glimmer.co.il)



## מבוא:

קורוזיה היא גורם הכשל העיקרי של צנרת בכלל, וצנרת תת קרקעית בפרט. מאחר וצנרת תת קרקעית אינה גלוייה לעיין, כשלים בה מתגלים רק מאוחר, כאשר הנזק משמעותי ועלות התיקון גבוהה מאוד. תכנון משך שרות ארוך ככל האפשר לצנרת תת קרקעית הוא איפה בעל חשיבות כלכלית וסביבתית גבוהה. דרך יעילה להארכת משך השרות היא שימוש במעכבי קורוזיה נודדים (אינהיביטורים).

## אפיון צנרת:

מתוך מגוון עצום של אפשרויות אפיון כדוגמת חומרי מבנה, חוס, לחץ, קוטר, עובי דופן, ציפויים, וכדומה, ייתרכז מאמר זה בשלושה מאפיינים:

- צינורות המכילים פלדה
- סביבת הצינור החיצונית
- סביבת הצינור הפנימית

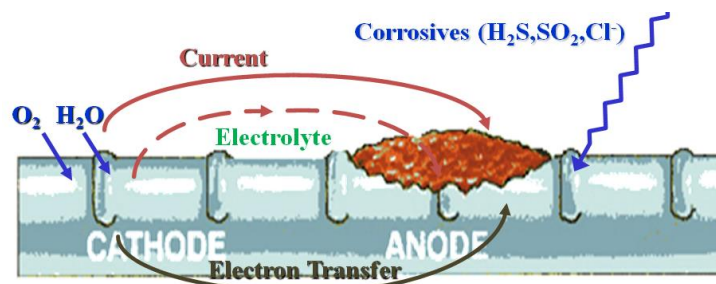
## צינורות המכילים פלדה:

צינורות המכילים פלדה מתחלקים לשני סוגים:

- צינורות בטון מזויין, בהם רשת או רשתות פלדה מוטבעות בבטון. צינורות בטון מזויין מיוצרים בסגמנטים/חוליות. את החוליות מצמידים ומחברים זו לזו באתר. את החיבורים אוטמים במגוון אפשרויות של חומרים פולימריים, ביטומניים או צמנטיים, העמידים בשימוש המיועד (מים שפירים, מי ניקוז, ביוב, מי תהליך, מי ים, תמלחות, ועוד).
- צינורות פלדה, בהם פלדה משוחלת או מרותכת עשויה להיות מצופה בחומרים מגוונים, מבפנים ומבחוץ. ציפויים נפוצים כוללים בטון, פלסטיק, אפוקסי, MMA, גילון אבץ, ועוד. בחירת הציפוי החיצוני נעשית על פי אגרסיביות סביבת הצינור החיצונית, כלומר, אגרסיביות הקרקע על פי תקן 118, תקן 466, או תקן רלוונטי אחר. בחירת הציפוי הפנימי נעשית על פי אגרסיביות סביבת הצינור הפנימית, כלומר, הנוזל או הגז העובר בו. רוב שטח הצינור משני צידיו מצופה בהתאמה במפעל. את צינורות הפלדה הבדידים מרתכים בשטח, ומיישמים על הריתוכים את הציפויים המתאימים עד חיבורם עם הציפוי מהמפעל.

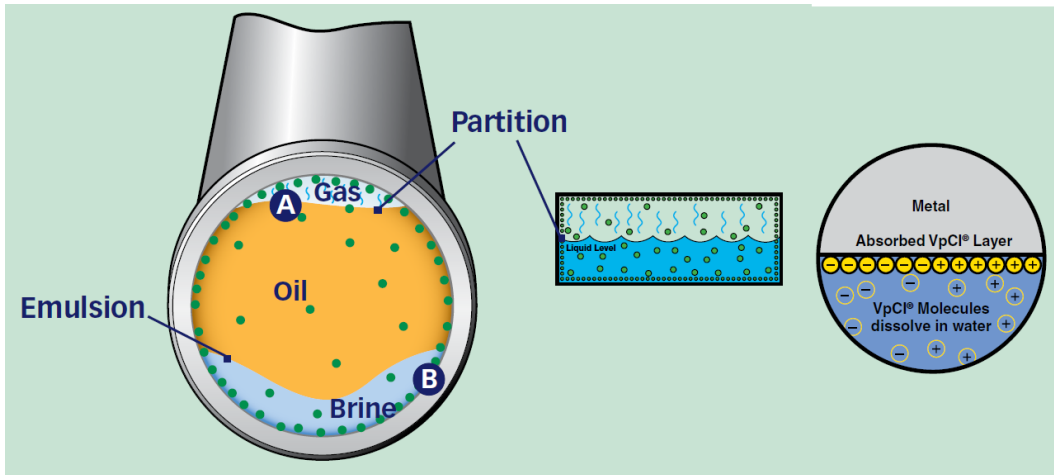
## סביבת הצינור החיצונית:

סביבת הצינור החיצונית היא האזור דרכו עוברים גורמי כשל מכניים וכימיים אל דופן הצינור. על גורמי כשל מכניים אפשר למנות הידוק מצע, סחיפת מצע, התנפחות תשתית, שינויי טמפרטורה, וכדומה. גורמים מכניים נוספים עלולים לכלול לחץ נקודתי של אבנים על ציפוי הצינור, חפירה לא מבוקרת ופגיעה בצינור, ריתוך וציפוי בשטח של חיבורים בין חוליות הצינור, ועוד. שלל הגורמים המכניים פוגעים במרבית המקרים בציפוי החיצוני של צינור הפלדה וחושפים אותו לסביבה הכימית, המביאה לכשל כללי באמצעות קורוזיה. רק מיעוטם של מקרי הכשל ניתנים לייחוס בלעדי לגורמים מכניים. גורמי הכשל הכימיים, רובם ככולם, נובעים מחלודה של הפלדה. כפי שיפורט להלן, ישנם סוגי חלודה (קורוזיה) רבים. לחות ורטיבות בסביבת הצינור החיצונית מאפשרת סגירת מעגל מוליכות חשמלית אלקטרו-כימי בין שתי נקודות פגומות בציפוי הצינור החיצוני. הפרש פוטנציאל חשמלי בין שתי הנקודות הפגומות הופך אחת מהן לאנודה (מינוס) ואת השנייה לקתודה (פלוס). חלודה מתרחשת באנודה בלבד. תחמוצת הפלדה מתנפחת פי 8 לערך לעומת הפלדה המקורית, מרחיבה את אזור הנזק עד כשל. המרחק בין האנודה לקתודה יכול להיות פחות מילימטר בחלודת מאמצים, נקיקים, נקבים או גלוונית, ויכול להיות מטרים רבים בחלודת שטח או התקפה אנונית בהשפעת זרם תועה.



### סביבת הצינור הפנימית:

סביבת הצינור הפנימית, גם היא איננה אחידה, ועלולים להיווצר בה מעגלים אלקטרו-כימיים המאיצים קורוזיה. אזורים רגישים במיוחד לקורוזיה הם אזורי החיץ בין משקעים בתחתית לבין הנוזל הזורם בצינור, או בין הנוזל הזורם לבין כיסי אוויר או גז בחלקו העליון של הצינור, או בין נוזל מימי הזורם בצינור לבין נוזל שמנוני הצף עליו. סדקים או פגמים בציפוי הפנימי של הצינור מביאים את הנוזלים הזורמים בו למגע ישיר בפלדה ומעודדים קורוזיה, במנגנונים דומים לאלו של סביבת הצינור החיצונית.



### גורמים משותפים בכשלי צנרת תת קרקעית:

**הגורם המשותף הראשון** האופייני בכל סוגי הצנרת המכילים פלדה הוא העובדה שרוב הכשלים מקורם בקורוזיה.

**גורם משותף שני** הוא שהקורוזיה נגרמת משילוב של סביבה קורוזיבית (בתוך הצינור ו/או מחוץ לצינור) עם פגמים נקודתיים בציפוי האמור להגן על הפלדה. באזור פגם הציפוי מתחילה להתפתח קורוזיה, הגורמת להתרחבות הנזק עד כשל הצינור. אין אפשרות מעשית להגן על צינור תת קרקעי בציפוי מושלם, במיוחד בצינורות ארוכים אותם מחברים בשטח ממקטעים קצרים. שילוב תנאים פיסיים וכימיים גורם לסוגי קורוזיה (חלודה) רבים, עליהם נמנים:

- Galvanic rust - חלודה גלוונית
- Flash rust - חלודה מיידית
- Surface rust - חלודת שטח
- fatigue / strain rust - חלודת מאמצים
- Crevice corrosion - חלודת נקיקים
- Pitting corrosion - חלודת נקבים
- Stray Current Corrosion - חלודת זרם תועה

**גורם משותף שלישי** הוא העובדה שכשלים בצנרת תת קרקעית מתגלים כמעט תמיד רק לאחר נזק משמעותי ופריצה של תכולת הצינור לסביבה. עלות איבחון ותיקון של צינור תת קרקעי היא גבוהה ביותר, ועלולה לכלול גם הטרדה סביבתית משמעותית. דוגמאות החרוטות בזיכרון בישראל כוללות את פריצת צינור השפד"ן בשנת 2003 שזיהמה את החופים מגוש דן ועד חיפה למשך קיץ שלם, פריצת צינור קצא"א בדצמבר 2014 שזיהמה את שמורת עברונה, ועוד.

עלויות התיקון הגבוהות מדגישות את הצורך במשך שרות ארוך ככל האפשר של צינורות תת קרקעים. **אופיין רביעי משותף** לכל סוגי הצנרת המכילה פלדה, ולכל סוגי הקורוזיה, הוא העובדה שמעכבי קורוזיה נודדים מדכאים את קצב התפתחות הנזק, דוחים את תחילת הקורוזיה במקומות שטרם החלידו, ומעלים את סף המתח ממנו יפרוץ זרם תועה אל צינור בלתי מוגן.

## מעכבי קורוזיה נודדים:

אינהיביטורים (מעכבי קורוזיה נודדים VpCI, MCI) מוכיחים עצמם בשטח כבר כ- 40 שנה: מעכבי קורוזיה נודדים נמשכים אל המתכת ונספחים אל פני השטח שלה. ספיחת מעכבי החלודה לשטח המתכת יוצרת עליה שכבת מגן חד מולקולארית מתחדשת. שכבת המגן נוצרת על פני המתכת גם כאשר המתכת מכוסה נוזל, גז (אוויר), ציפוי או צבע. תכונה ייחודית של אינהיביטורים נודדים הוא יכולתם לנוע בתוך גז, נוזל, או מוצק פורוזיבי, ולחדש את שכבת המגן המולקולארית על המתכת. כושר תנועה זה מאפשר דיכוי החלודה ללא צורך במגע ישיר עם האזור בו מתפתח פוטנציאל קורוזיבי. מולקולות אינהיביטור נמשכות לאזורים בהם מתפתחת קורוזיה במתכת "כמו מגנט לדלת המקרר" ומפחיתות משמעותית את קצב התפתחות הנוק. בכל משך הפעילות שלהם, מהיישום ועד שנים לאחריו, מולקולות האינהיביטור (מעכב חלודה) מחדשות את שכבת המגן בכל נקודה מיקרוסקופית בה "נפרצה" ההגנה.

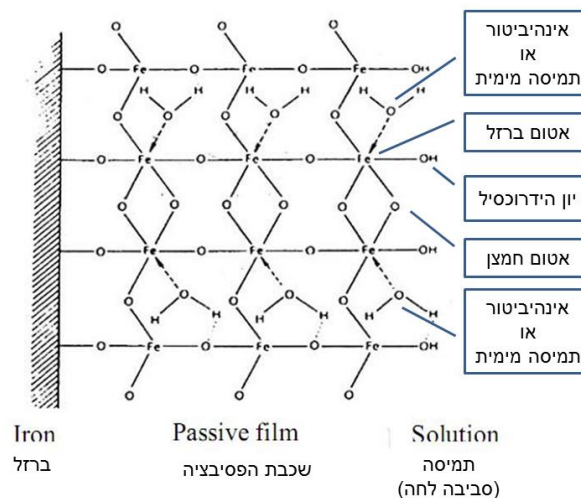
אינהיביטורים נודדים (מעכבי קורוזיה) מכילים תערובת של בסיסים נדיפים או של המלחים שלהם. חומרים נדיפים אלו מכילים רכיבי מגע היוצרים פילם מולקולארי רציף. לחץ האדים של האינהיביטור נמוך מאוד, כלומר, אינהיביטור בסביבת מתכת מתנדף ומפיץ את עצמו במשך שנים רבות. אינהיביטורים מסויימים פעילים למשך 25 שנה ויותר, נעים בצורת גז מנקודת ההפצה שלהם אל המתכת וייספחו אליה בחוזקה, תוך יצירת שכבת מגן בעובי מולקולארי. ניתן לשלב אינהיביטורים במים, ממיסים אורגניים, או ממיסים סינטטיים לקבלת הגנה גם בסביבת נוזל או מוצק.

אינהיביטורים על בסיס אמין-קרבוקסילאט (VpCI, MCI) מגינים על מגוון מתכות מפני קורוזיה, כולל פלדות, גיליון, פליז אלומיניום, ונחושת. אינהיביטורים אלו מדכאים ומפחיתים את התפתחות הקורוזיה פי 5-15 לעומת המצב בלעדיהם. בנוסף, אינהיביטורים יפחיתו משמעותית את רגישות המתכות לקורוזיית מאמצים (STRESS), קורוזיית סדקים (CREVICE), קורוזיית גימום (PITTING), וקורוזיית זרם תועה (התקפה אנודית).

אינהיביטורים משולבים במגוון פתרונות להגנה על מתכות בבניין ובתעשייה, כגון תוספי בטון, איבוק, אמיתרים (שקיות הפצה), תוספים למים, תוספים לשמנים, חומרי עטיפה, מילוי, איטום, ציפוי, צבעים וכדומה.

## אופן הפעילות של פעילות מעכבי קורוזיה נודדים:

פלדה יוצרת גבישים בעלי מבנה המשתנה על פי תנאי העיבוד וההרכב הכימי שלה. פני השטח של הפלדה מגיבים עם הסביבה המיידית (ציפוי, צבע, אוויר וכדומה) ליצירת שכבה דקיקה פסיבית בעובי מינימאלי של אטומים בודדים.



מעכבי החלודה הנוודים, נספחים לשכבת הפסיבציה של הפלדה ויוצרים עליה שכבת מגן חד מולקולארית. הספיחה של מעכב החלודה נוצרת על ידי משיכה יונית חזקה. חוזק קשר הספיחה בין מעכבי החלודה מסוג אמין קרבוקסילאט לבין המתכת עולה על חוזק הקשר עם גורמי חלודה (כלורידים, סולפטים, וכדומה). מעכבי חלודה אלו מפחיתים את קצב החלודה פי 5-15. במשך שנים לאחר היישום, מולקולות מעכב החלודה ממריאות (מתאיידות ממוצק לגז) בסביבת המתכת, ומחדשות את שכבת המגן בכל נקודה מיקרוסקופית בה "נפרצה" ההגנה. מעכבי קורוזיה על בסיס אמינו-אלכוהול מדכאים את החלודה באופן דומה, אך פי 2 בלבד.

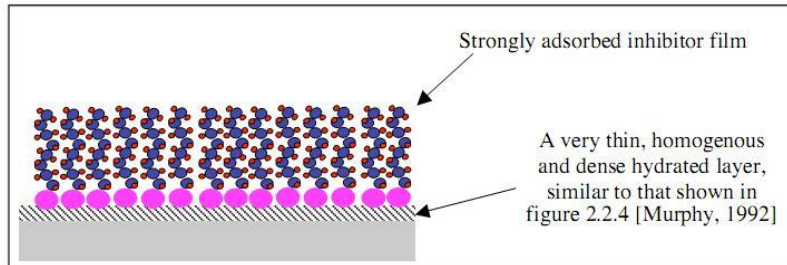
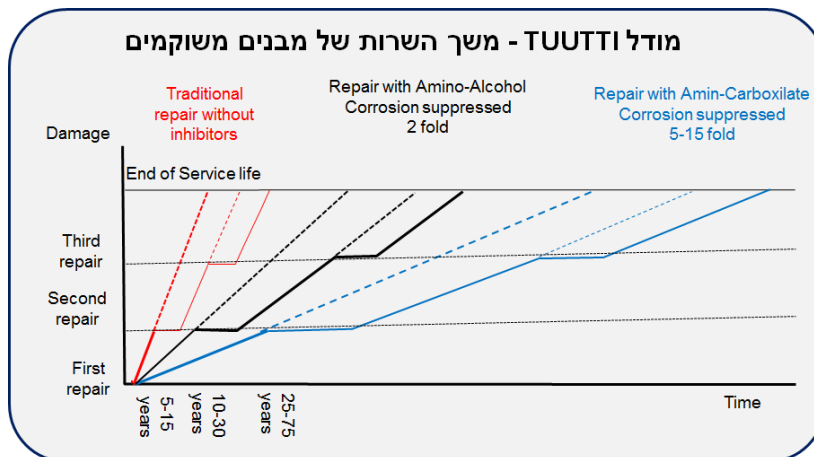


Figure 5.2.11. A Schematic representation of the passive film formed on steel in saturated  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solutions with the addition of MCI2005.

הדמיה גרפית של התנהגות הפלדה ה"רגילה" לעומת פלדה שבסביבתה הקרובה מצוייה אחת משתי משפחות מעכבי קורוזיה הנוודים מופיעה בתרשים הבא:



על המתבר:



מהנדס חגי שושני, בעלים ומנכ"ל חברת ניצוץ - יעוץ לתעשייה, העוסקת בייבוא פתרונות לבנייה ותשתיות וביעוץ תהליכי ייצור. שרת בצה"ל כקצין. בוגר הנדסה-כימית בטכניון (1990). בוגר מנהל-עסקי-בכיר באוני' חיפה (1997). עבד כמנהל תפעול ופיתוח בתעשיות פלסטיקה, איטום וכימיקלים. המציא מספר פטנטים בינלאומיים בתחומי בטון, גבס, לבידים, אנרגיה חליפית, ועוד. נשוי + 3 וסב לשניים. תושב רחובות.