

מדע והנדסת קורוזיה בישראל

ד"ר אלק גרויסמן¹

קורוזיה היא קשר הדדי בין מתכת לסביבה שבה היא נמצאת, קשר הגורם להתדרדרות בתכונות הפונקציונליות של ציוד העשוי ממתכת. נזקי הקורוזיה עולים כסף רב - כ-3.5% מהתמ"ג וקשורים לכל תחום בחיינו: כל תעשייה, ארגון, מוסד ובית שמשמשים בציוד ובמבנים מתכתיים נתקלים בבעיות קורוזיה.

התעשייה הכימית סובלת במיוחד מקורוזיה בגלל תהליכים כימיים ופיזיקליים המתרחשים במגע עם ציוד מתכתי ובנוכחות והשתתפות של תרכובות אגרסיביות שונות, בתנאים קשים מאוד של טמפרטורות ולחצים גבוהים, במהירויות זרימה גבוהות וברתיחה ועיבוי של מים ושל ממסים אחרים. לכן התפתחות של תעשיות, של טכנולוגיות ושימוש בחומרים חדשים אינם יכולים להתרחש ללא טיפוח של מדע והנדסת קורוזיה.

הקורוזיה מתרחשת באופן ספונטני על פי החוק השני של התרמודינמיקה. לשמחתנו, מנגוני הקורוזיה ידועים, ואנו מסוגלים לשלוט בהם, לבצע בקרה ובהרבה מן המקרים אף למנוע את הקורוזיה. היום אנו עדים ל**ניהול קורוזיה** (corrosion management) אשר כולל מגוון פעולות לתכנון, מניעה, בקרה, מעקב וניטור של קורוזיה בציוד ובמבנים תעשייתיים, וכן לשינוי במודעות לנושא.

דוגמה לשינוי במודעות לנושא הקורוזיה היא סיפורו של פרופ' יוסף יהלום אשר סיים בשנות השישים דוקטורט בנושא קורוזיה באוניברסיטת קמברידג' באנגליה, חזר לטכניון וביקש ללמד קורס בנושא "קורוזיה". "בשעה הראשונה אתה תספר על קורוזיה. מה תעשה בשעה השנייה?" נשאל פרופ' יהלום. מאז, כמובן, המודעות לנושא השתנתה. יוסף יהלום ביצע מחקרים בתחומים מגוונים של מדע והנדסת קורוזיה [1-5] והעמיד דור חדש של מדענים ומהנדסים בתחום כמו יוסי זהבי [6], לאה גל-אור [7-9] ומיכאל שור [10-12].

השיטות העיקריות לשליטה, בקרה ומניעה של קורוזיה הן תכנון הנדסי יעיל, שימוש בחומרים עמידים או תואמים לסביבה קורוזיבית, שימוש בציפויים, שיטות אלקטרוכימיות, שינוי תנאי הסביבה ושיטות טכנולוגיות שונות.

מחקרים בנושא קורוזיה קשורים לתחומים רבים, כמו מעקב אחר הקורוזיה, הגנה על שתלים דנטליים והתקנים רפואיים אחרים המוכנסים לגוף, תעשיית החלל, הגנה על ציוד בסביבה ימית, הגנה על צנרת מים, נפט ודלק, ועוד.

נושא הקורוזיה בישראל תופס מקום חשוב בתעשייה ובמחקר האקדמי, והמאמץ המחקרי בנושא החל עוד לפני קום המדינה. הרשימה הביבליוגרפית המצומצמת, אך הארוכה, המצורפת למאמר זה היא עדות לכך.

מחקרים רבים בארץ בנושא הקורוזיה קשורים לתעשייה בארץ. נביא כאן מספר קטן של דוגמאות למחקרים כאלה וכן למוצרים שפותחו בתעשייה ונועדו להגן בפני קורוזיה.

- מכון המתכות הישראלי בטכניון שנוסד ב-1963 חקר וקבע את מנגונון הקורוזיה של מתכות בברום נוזלי עבור מפעלי הברום בים המלח. משנת 2001 התפתחו מחקרים במדע הקורוזיה בטכניון בזכותו של פרופ' יאיר עין-אלי.
- אדוארד קוגן ממעבדת הקורוזיה בתמ"י (תעשיות מחצבי ישראל) של חברת כימיקליים לישראל בע"מ, פיתח פלדה בלתי מחלידה ייחודית, המשמשת לבניית משאבות לתהליך הייצור של חומצה זרחתית. כמו כן מחקרים על קורוזיה במי ים המלח ועל שיטות לקביעת קצב קורוזיה נעשו בתמ"י ע"י אריקה ויינראוב, מיכאל שור [13] וד"ר יוסף ריסקין [14].
- פרופ' אליעזר גלעד מאוניברסיטת תל אביב ביצע עבודות בתחום האלקטרוכימיה שנתנו בסיס להנדסת קורוזיה וליישום שיטות מדידות של קצבי קורוזיה והגנה בפני קורוזיה [15-25]. הוא פיתח בין השאר אמבטים לציפוי פלדות, מסגים של טונגסטן (W) ושל רניום (Re) עם יסודות מתכתיים אחרים כגון ניקל (Ni) וקובלט (Co). ציפויים אלה עשויים לאפשר פריצות דרך טכנולוגיות בתעשיית התעופה והחלל (לדוגמה, העלאת טמפרטורת העבודה של מנועי סילון), וכן בתעשיית המיקרואלקטרוניקה (לדוגמה, שכבות דקות חוסמות בין מצע הסיליקון לשכבת הנוחשת).
- פרופ' נעם אליעז, אף הוא מאוניברסיטת תל אביב, ייסד בשנת 2001 את המעבדה לקורוזיה וביו-חומרים [26]. מחקריו הם בשימוש מערכת הביטחון ויצרניות השתלים. בין השאר פיתח שיטה לניטור המצב וחקר הכשל במנועי F-16 וציפויים של שתלים דנטליים.
- המהנדס גרגורי ניזבסטני, מנהל מחלקת הנדסת קורוזיה וחומרים בחברת מקורות מאז 2002, הכניס לשימוש תערובות מלט המיועדות להשלמת טיח באזורי ריתוך ובהסתעפויות T של צנרת פלדה למניעת קורוזיה באזורים אלה, וכן הנהיג בדיקות איכות המאפשרות לאתר פגמים בעטיפה חיצונית של צינורות הפלדה התת-קרקעיים.

¹ alecgroysman@gmail.com

Website: www.alecgroysman.com

- בקבוצתו של פרופ' דני מנדלר באוניברסיטה העברית נחקרו תהליכי קורוזיה ומניעתם בעזרת הגנה על ידי שכבות סול-גיל [27-30]. אלה הם ציפויים דקים שעוביים מעשרות ננומטרים ועד מיקרונים המשמשים כציפוי הגנה לעדשות, מסכי טלוויזיה, סיבים אופטיים, להגנה בפני שיתוך של מתכות ועוד. ב-2017 החלה המעבדה לעסוק במניעת שיתוך על פני מעגלים מודפסים של נחושת [31]. השימוש באלקטרוניקה מודפסת (printed electronics) הולך וגדל בהדפסות על פלסטיק כמו כרטיסי אשראי, אנטנות וכד'. המוליכים עשויים בדרך כלל מנחושת שנוטה להתחמצן, ובמעבדה הוכח שניתן למנוע את השיתוך של פסי הנחושת בעזרת ציפוי בשכבה הידרופובית של סול-גיל.
- בתעשיית עיבוד הנפט חומצות נפתניות המצויות בנפט גולמי, גורמות לקורוזיה חמורה של ציוד מפלדה רכה בטמפרטורות מעל 200°C. במו"פ של בתי זיקוק חיפה הפרידו חומצות נפתניות שנמצאות בנפט גולמי לפרקציות, ואז התברר שחומצות נפתניות עם מסה מולקולרית גבוהה מגינות על פלדה רכה מקורוזיה על ידי חומצות נפתניות עם מסה מולקולרית נמוכה. מחקר זה מופיע בפטנט ובפרסומים [32-34].
- רוב שיטות ההגנה בפני קורוזיה מבוססות על ציפויים שונים. חברת "טמבור" פיתחה במהלך השנים צבעים רבים לשימושים שונים: צביעה של אניות בצי הסוחר, הגנת מתכות בפני חומצות ובסיסים, הגנה על צינורות תת-קרקעיים והגנה של ציוד בטחוני ממתכת.
- שתי חברות ליצירת צינורות, "צינורות המזרח התיכון" ו"אברות תעשיות" החלו בשנת 1996 לייצר צינורות המיועדים להובלת מי שתייה, מי שופכין, מי ים, דלקים, גז טבעי וכימיקלים שונים עם עטיפה תלת-שכבתית המגינה עליהם מפני קורוזיה. הצינורות מיועדים לשימוש תת-קרקעי ותת-ימי, והציפוי המגן עליהם עשוי מאפוקסי, דבק ושכבת פוליאיתילן או פוליפרופילן [35].



באדיבות ד"ר אליק גרויסמן

מכל עילי לאחסון דלקים. מערכת הצבעים העמידה בפני אטמוספירה תעשייתית היא של חברת "טמבור"



באדיבות חברת אברות

עטיפה תלת-שכבתית על צינורות תת-קרקעיים

קורוזיה קשורה גם לבטיחות ולאיכות הסביבה. קורוזיה גורמת לאסונות לא צפויים כמו פיצוצים, שריפות, דליפות של חומרים רעילים, נזקים כבדים לסביבה, ואף מוות של בני אדם. לכן חשוב לדעת בזמן אמת מה מצבו של ציוד מתכתי מבחינת ההתפתחות של קורוזיה, האגרסיביות של הסביבה שבה נמצא הציוד, ויעילות השיטות שנגקטו למניעת קורוזיה והגנה מפניה.

מחקרים בנושא הקורוזיה אף עוזרים לשמירה על איכות הסביבה, והנה שתי דוגמאות:

- בחברת החשמל משתמשים במים לייצור קיטור. מים אלה צריכים להיות טהורים כדי למנוע יצירת תוצרי שיתוך שעלולים לגרום נזק לטורבינה מכיוון שקצב השיתוך בודד הקיטור מושפע רבות הן מה-pH והן מנוכחות חמצן מומס במים, מקובל להוסיף למים הידרזין, N_2H_4 , שתפקידו ללכוד את החמצן המומס על פי הניסוח: $N_2H_{4(aq)} + O_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$. מכיוון שהידרזין הוא חומר רעיל, החלה חברת החשמל להשתמש בשיטה מהפכנית להגנה על הדוודים והצינורות שפותחה ברוסיה ובגרמניה. השיטה מבוססת על הזרקת חמצן אל המים המוזנים לדוודים, כדי לייצר שכבה פסיבית של תחמוצות ברזל על פני השטח הפנימיים של הצינורות והדוודים. שיטה "ירוקה" זו מונעת את הצורך בהוספת הידרזין למים.
- למי הקירור בתעשייה מוסיפים מעכבי שיתוך (אינהיביטורים). בשנות ה-80 הוחלפו יוני הכרומט הרעילים, CrO_4^{2-} , ששימשו כמעכבי שיתוך במערכות של מי הקירור, במעכבי שיתוך ידידותיים יותר לאדם ולסביבה [36].

רוב אנשים רואים בקורוזיה תופעה מזיקה - תהליך דגדגציה של חומרים שאינו נעים לעין. לא נעים להסתכל על מבנים חלודים, עם סדקים וחורים, לסבול מהפסקת מים עקב חורים בצנרת מי השתייה או לראות כלים, מכשירים ותכשיטי כסף שהשחירו. אך יש לזכור כי קיימים הרבה תהליכי קורוזיה (כעשרים במספר) שמביאים תועלת [37]. אתן מספר דוגמאות:



באדיבות ד"ר אליק גרויסמן

אנודות מקריבות מאלומיניום (מסומנות באות A) המורכבות בתוך מחליף חום המצופה מבפנים בצבע אפוקסי יוק. במחליף החום עוברים מי קירור.

- קשה לתאר את העולם שלנו ללא שעונים, רכבים וציוד חשמלי אחר. מכשירים אלה פועלים בעזרת סוללות ומצברים, שבתוכם מתרחשים תהליכי קורוזיה של מתכת אחת שנמצאת באלקטרוליט. התהליך המתרחש בסוללות הוא למעשה קורוזיה גלואנית מועילה שמביאה להיווצרות זרם חשמלי.

- דוגמה אחרת של קורוזיה גלואנית מועילה היא הגנה קתודית שפועלת בזכותה של הקורוזיה - מחברים למתכת שעליה רוצים להגן מתכת אחרת שהיא מחזרת טובה יותר, ולכן עוברת קורוזיה במקום המתכת שעליה רוצים להגן. המתכת שעוברת קורוזיה נקראת "אנודה מקריבה".

- קורוזיה בקנה מידה קטן של כלים מכסף במים גורמת להופעת קטיוני כסף אשר מחטאים את המים מחיידקים. קורוזיה של נחושת גורמת אף היא לחיטוי מים. אנשים השתמשו בתופעת קורוזיה מועילה זו במשך כ-2,000 שנה ללא ידע של עקרונות הקורוזיה.

- פסיבציה היא תהליך שבו הופכים את החומר לפחות פעיל, פחות מושפע מהסביבה ופחות מועד לתהליך של קורוזיה. פסיבציה מכוונת של אלומיניום, טיטניום, פלדה בלתי מחלידה ועוד מתכות, יוצרת בתהליך קורוזיה תחמוצות המכסות את פני השטח ומגנות על המתכת.

ארגונים, כנסים, ספרים ופרסומים של ישראלים בתחום הקורוזיה

במהלך 30 השנה האחרונות נעשו פעולות רבות על מנת להגביר את המודעות של אנשי המקצוע העוסקים בתחום הקורוזיה ומניעתה, בתעשייה, באקדמיה וגם בקרב הקהל הרחב.

הפעולות נעשו במסגרת הפורום לקורוזיה הפועל בלשכת המהנדסים על ידי ארגון כנסים וקורסים, ובמסגרת פרטית על ידי העברת הרצאות מוזמנות בתחום הקורוזיה למהנדסים ולמהנדסות העובדים בתעשייה הכימית.

מיכאל שור ערך כתב העת הבינלאומי Corrosion Reviews מ-1985 עד ל-2004, ופרופ' נעם אליעז היה העורך של כתב עת זה עד 2017. האגודה הישראלית לציפוי מתכות החלה לפעול מאמצע שנות ה-60, ומתחילת המאה ה-21 החלה לפעול גם העמותה לטכנולוגיות ציפוי וגימור. המהנדס נחום נוה ארגן הרצאות, פרסם ספרים, חוברת בשם "קורוזיה ושימור חומרים" ומאמרים רבים בנושאי קורוזיה לקהל רחב של מהנדסים וטכנאים בתעשייה [38].

המהנדס רפאל סרוסי ארגן ב-1992 את הפורום הישראלי לקורוזיה באגודת מהנדסי הכימיה והכימאים בלשכת המהנדסים. הפורום מאגד מהנדסים, מדענים, טכנאים ויועצים פרטיים הפעילים בתחום הקורוזיה ומארגן כל שנתיים כנס ברמה בינלאומית בנושא הקורוזיה. הכנס הבא, ה-13 במספר, יתקיים בשמונה בנובמבר 2018 בכפר המכבייה ברמת גן [39].

ספרים בנושא הקורוזיה שקיבלו הכרה בינלאומית ויצאו בהוצאות לאור יוקרתיות נכתבו (באנגלית) על ידי מומחים ישראלים כמו יוסף ריסקין [40], נעם אליעז ואליעזר גלעדי [41, 42], עמנואל גוטמן [43, 44], דוד יצחקי [45] ואליק גרויסמן [37, 46, 47].

במכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה יצאו לאור שני ספרים בעברית שבתוכם פרקים על קורוזיה במערכות גז, מערכות נפט ועיבוד נפט [48, 49]. מכון התקנים הישראלי פועל להכנת תקנים בתחום קורוזיה וציפויים בישראל [50].

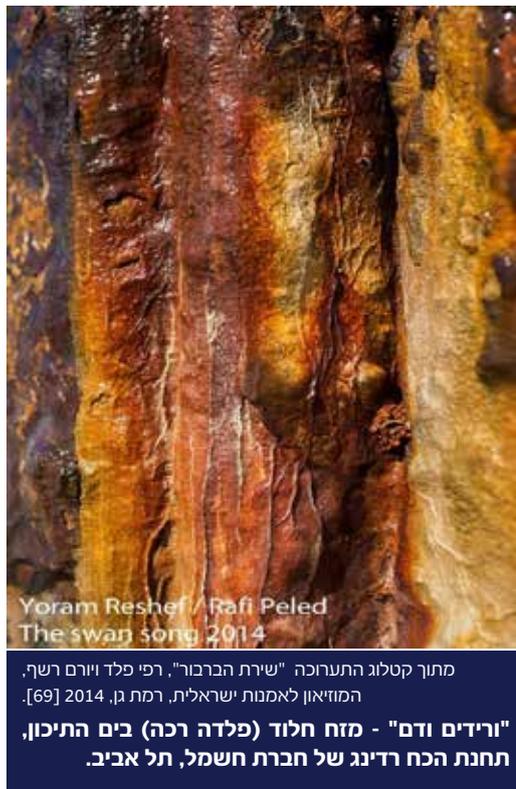
אפשר לומר בחיך שהקורוזיה מעניקה תעסוקה ומזון לאנשים רבים שעוסקים במחקרים בנושא הקורוזיה, מייצרים ציוד ומבנים מתכתיים חדשים להחלפת אלה שעברו שיתוך ומייצרים צבעים וציפויים או אמצעי הגנה אחרים מפני קורוזיה.

בהמשך מאמר זה אספר בקצרה על תחום מחקר מעניין בתחום הקורוזיה מתוך מגוון רב של מחקרים שנעשו ונעשים בנושא בארץ, הלא הוא קורוזיה על ידי חיידקים (קורוזיה מיקרוביאלית), ועל שני מדענים: ד"ר דוד סטרוסבצקי וד"ר ז'אנה סטרוסבצקי שעוסקים במחקר בתחום זה.

בעלייה הגדולה מבר"מ בשנות התשעים של המאה ה-20 הגיעו לארץ מומחים רבים בתחום קורוזיה. מהנדסים ישראליים ארגנו באפריל 1991 כנס בחיפה, וכל אחד מהעולים החדשים שרק הגיע ארצה סיפר על המומחיות שלו בתחום הקורוזיה. ד"ר ז'אנה סטרוסבצקי סיפרה על קורוזיה מיקרוביאלית - או ביוקורוזיה - התחום שבו עסקה במוסקבה. מהנדס ישראלי ותיק בתחום הקורוזיה ניגש אליה בהפסקה ואמר לה: "אני מצטער שבילך. אין חיידקים גורמי קורוזיה בארץ".

ביוקורוזיה היא ענף חדש יחסית בחקר הקורוזיה, החוקר תהליכי קורוזיה שנגרמים בהשפעת מיקרואורגניזמים. חיידקים כאלה נמצאים בתמיסות שונות בתעשייה הכימית, בתעשיית נפט והפטרוכימית, בתחנות כוח, במערכות להובלת ואחסון נפט, דלקים ומים. דוגמה לחיידקים כאלה הם חיידקים מחזרי סולפט, הצורכים נפט ותוצריו כמקור לפחמן וסולפט, ומייצרים חומצה גופרית, H_2S , שגורמת נזקים כבדים לציוד ומבנים מתכתיים. דוגמה נוספת היא חיידקים מחזרי ברזל או מחמצני ברזל. חיידקים אלה מנצלים אנרגיה המופקת מחמצון או מחיזור יוני ברזל וגורמים לקורוזיה של הברזל.

מובן שכשד"ר ז'אנה סטרוסבצקי התחילה לעבוד בטכניון ב-1992, התברר שיש הרבה בעיות קורוזיה כאלה "בזכותה" [51-54]. באחד ממחקריה הוכח שאפשר להשתמש בחיידקים מחזרי ברזל להמסה והסרת חלודה משטח של פלדה רכה [55], ובכך נפתחה דרך חדשה לטיפול בשטחים חלודים של מבני פלדה רכה.



ד"ר דוד סטרוסבצקי שהתחיל אף הוא לעבוד בטכניון ב-1992, עסק בחקר מגננוני הקורוזיה בסביבת חיידקים מחזרי סולפט [56-58] וחיידקי ברזל [51, 52, 58-62]. לדוגמה, הוא חקר את מגננון השייך של סגסוגות מגנזיום [63] וסגסוגות טיטניום (Ti-Ni, Ti-Al-V, וכו') עבור יישומים רפואיים כמו כלי ניתוח ושתלים: צנתרים לקיבה, תומקנים (stents) לעורקים ועוד [64-68].

ולסיום: קורוזיה באמנות. אמנים רבים מסתכלים על תהליך הקורוזיה כעל מאבק בין המתכת לסביבה - מאבק שיוצר הרס ויזם בו-זמנית. כאשר מביטים על צבעי החלודה העזים והמורפולוגיה שלה, אפשר לומר כי הברזל סיים בעצם את תפקידו הפונקציונלי והפך לאובייקט אסתטי [37, 69], ומוזאון רמת גן לאמנות ישראלית אף הציג בשנת 2014 תערוכה שלמה של רפי פלד ויורם רשף - "שירת הברבור" - שעוסקת בקורוזיה.

אני מודה לעמיתים ולחברים שתרמו מידע על ההיסטוריה ועל ההתפתחות של נושא הקורוזיה בישראל: שוש תמיר, לאה גל-אור, דוד סטרוסבצקי, פטר לטאי, משה זמיר, מיכאל שור, גרגורי ניזבסטיני, משה גרף, נעם אליעז, נחום לזר, קונסטנטין בורודיונסקי, אריה פיסטינר, ענבר דג, אהוד סוצקובר, ויקטור מרקו, אלי אלגרסי, יוסי וויל, אפרת ברייר, ז'אנה סטרוסבצקי ועוד רבים.

לערי קצרה היריעה במאמר זה מלהזכיר את כל המדענים והמהנדסים הישראלים שפרסמו מאמרים בנושא זה במשך 70 שנה.

אני מודה לרותי שטנגר על עריכת המאמר.

ביבליוגרפיה

1. <https://materials.technion.ac.il/members/joseph-yahalom/>
2. https://www.researchgate.net/scientific-contributions/2060729904_J_Yahalom
3. T.P. Hoar and J. Yahalom, The Initiation of Pores in Anodic Oxide Films Formed on Aluminum in Acid Solutions, J. Electrochem. Soc., 1963, 110 (6), 14.
4. J. Yahalom, L. K. Ives, Electron-microscopical studies of passive films on stainless steels, Proc. USA-Japan seminar on passivity and its breakdown on iron and iron base alloys, Honolulu, March 10-12 1975, pp. 69-71.
5. L. Zanker, J. Yahalom, Galvanic Behaviour of the Fe-Cd couple, Corrosion Science, 1969, 9, p. 157.
6. https://www.researchgate.net/scientific-contributions/76334963_J_Zahavi
7. <https://prabook.com/web/leah.gal-or-schulwolf/555052>
8. L. Gal-Or, J. Yahalom, The Corrosion Mechanism in Low Conductivity Media with Water Traces: Studies in Wet Bromine, Corrosion, 1974;30(11):399-407.
9. C. Feigenbaum, L. Gal-Or, J. Yahalom, Scale Protection Criteria in Natural Waters, Corrosion, 1978, 34(4):133-137.
10. A. Alon, M. Schorr, and A. Vromen, Corrosion resistance of tantalum to mixture of phosphoric acid and potassium chloride at 120oC, Corrosion, 1966, 22(1): 1-6.
11. M. Schorr, Acid penetration into plastics, Materials Protection, 1967, 6(6): 44-45.

12. M. Schorr and J. Yahalom, The significance of the energy of activation for the dissolution reaction of metals in acids, *Corrosion Science*, 1972, Vol. 12, p. 817.
13. J. Charrach, M. Schorr, and E. Weintraub, Corrosion and Scaling Behaviour in Dead Sea Basin Saline Waters, *Corrosion Reviews*, 1990, 9(3-4): 293-352.
14. J. Riskin, G. Genkin, An Empirical Method for the Rapid Estimation of Corrosion Rates, *Chemistry and Chemical Engineering*, Dec. 1993, Tel Aviv, Israel, No 16, pp. 37-39.
15. E. Gileadi, E. Kirowa-Eisner and J. Penciner, *Interfacial Electrochemistry - An Experimental Approach*, Addison-Wesley, MA, 1975, 525 p.
16. E. Gileadi, *Electrode Kinetics - For Chemists, Chemical Engineers and Materials Scientists*, VCH Publishers, Germany (1993) 598 p.
17. E. Gileadi, *Physical Electrochemistry: Fundamentals, Techniques and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim (2011) 374 p.
18. E. Gileadi, Radiotracer Studies of Electrosorption of Neutral Molecules. Proc. 2nd European Corrosion Inhibitors Symposium, 1966, 543.
19. G.E. Stoner, S. Senti and E. Gileadi, The Effect of NaF and SnF₂ on the Rate of Corrosion of Dental Amalgams. *J. Den. Res.*, 1971, 50, 1647.
20. J. R. Scully, P. J. Moran and E. Gileadi, Electrochemical Measurement of Corrosion Rates in Media of Low Conductivity, *J. Electrochem. Soc.*, 1986, 133, 579.
21. J. N. Murray, P. J. Moran and E. Gileadi, Pseudocapacitance of Corroding Steel Surfaces. *Corrosion Science* 1988, 44, 533.
22. R. Taylor and E. Gileadi, The Physical Interpretation of the Warburg Impedance. *Corrosion*, 1995, 51, 664.
23. C.S. Brossia, E. Gileadi and R. G. Kelly, The Electrochemistry of Fe in Methanolic Solutions and its Relation to the Corrosion Phenomenology. *Corrosion Science*, 1995, 37, 1455.
24. E. Gileadi and E. Kirowa-Eisner, Some Observations Concerning the Tafel Equation and its Relevance to Charge Transfer in Corrosion. *Corr. Sci.*, 2005, 47, 3068.
25. E. Gileadi and N. Eliaz, *Physical Electrochemistry and its Applications*, Wiley-VCH, 2nd Edition, 2018.
26. <http://www.eng.tau.ac.il/~neliaz/>
27. M. Sheffer, A. Groysman, and D. Mandler, Electrodeposition of sol-gel films on Al for corrosion protection. *Corrosion Science*, 2003, 45, 2893-2904.
28. M. Sheffer, A. Groysman, D. Starosvetsky, N. Savchenko, and D. Mandler, Anion embedded sol-gel films on Al for corrosion protection. *Corrosion Science*, 2004, 46, 2975-2985.
29. Y. Tama, and D. Mandler, Corrosion inhibition of magnesium by combined zirconia silica sol-gel films. *Electrochimica Acta*, 2008, 53, 5118-5127.
30. L. Liu and D. Mandler, Electro-assist deposition of binary sol-gel films with graded structure. *Electrochimica Acta*, 2013, 102, 212-218.
31. O. Geuli and D. Mandler, The Synergistic Effect of Benzotriazole and Trimethylsiloxysilicate towards Corrosion Protection of Printed Cu-Based Electronics. Submitted.
32. A. Groysman and J. Penner, Process for Inhibiting Naphthenic Acid Corrosion, WO/2009/053971, 22.10.2007, USA.
33. A. Groysman et al, Low Temperature Naphthenic Acid Corrosion Study, Paper 07569, CORROSION 2007, Nashville, USA, 11-15 March 2007, p. 20.
34. A. Groysman et al, Study of Corrosiveness of Acidic Crude Oil and its Fractions, Paper 05568, CORROSION 2005, Houston, Texas, USA, 2- 7 April 2005, p.13.
35. www.avrot.co.il; www.paladex.com
36. A. Groysman and I. Shvarts, Study of Efficiency of Industrial Corrosion Inhibitors for Cooling Water Systems at Oil Refining Industry, Paper 06097, CORROSION 2006, San Diego, California, USA, 12-16 March 2006, p.10.
37. Alec Groysman, *Corrosion for Everybody*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 368.
38. נחום נוה, הגנה בפני קורוזיה, בליה ואש במבנים, הנדסת קורוזיה, חומרים וצינורות בע"מ, 1998.
39. <https://www.aeai.org.il/activity/corrosion-conference/>
40. Joseph Riskin, *Electrocorrosion and Protection of Metals*, Elsevier Science, 2009, p. 264.
41. E. Gileadi and N. Eliaz, *Physical Electrochemistry and its Applications*, Wiley-VCH, 2nd Edition, 2018.

42. Degradation of Implant Materials, Ed. Noam Eliaz, 2012, Springer-Verlag, New York, p. 516.
43. E. M. Gutman, Mechanochemistry of Solid Surfaces. World Scientific, New Jersey, 1994, p. 332.
44. E. M. Gutman, Mechanochemistry of Materials. Cambridge Interscience, Cambridge, 1998, p. 205.
45. David Itzhak, Corrosion and Risk Assessment. From Theory to Practice, 2013.
46. Alec Groysman, Corrosion in Systems for Transportation and Storage of Petroleum Products and Biofuels, Springer, Dordrecht, 2014, p. 297.
47. Alec Groysman, Corrosion Problems and Solutions in Oil Refining and Petrochemical Industry, Springer, Dordrecht, 2017, p. 356.
48. גז טבעי, עורכים משה רבייב וקרן גול, המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה, 2017, עמ' 367-427. אליק גרויסמן, קורוזיה במערכות גז טבעי.
49. נפט ומוצרי, עורך משה רבייב, המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה, 2012, עמ' 247-295. אליק גרויסמן, קורוזיה, במערכות מוצרי נפט.
50. <https://portal.sii.org.il/heb/standardization/tekensearchex.aspx?ft%3D=D7%A7%D7%95%D7%A8%D7%95%D7%96%D7%99%D7%94>
51. J. Starosvetsky, R. Armon, A. Groysman, and D. Starosvetsky, MIC of Storage Tank Aluminum Floating Roofs During Hydrotest, *Materials Performance*, 2002, 41(4): 50-54.
52. Jeana Starosvetsky, Robert Armon, Alec Groysman, and David Starosvetsky, Fouling of Carbon Steel Heat Exchanger Caused by Iron Bacteria, *Materials Performance*, 1999, 38(1): 55-61.
53. J. Starosvetsky, D. Starosvetsky, R. Armon, Identification of microbiologically influenced corrosion (MIC) in industrial equipment failures. *Israel Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(8): 1500-1511.
54. J. Starosvetsky, R. Armon, M. Ratzker, S. Levitsky, and E. Tuval, Failure Analysis: Investigation of Severe Corrosion of Aluminum Parts in Stored Diesel Engine Cooling Systems, *Materials Performance*, 2005, 44(8): 56-65.
55. J. Starosvetsky, R. Kamari, Y. Farber, D. Bilanović, R. Armon, Rust dissolution and removal by iron-reducing bacteria: A potential rehabilitation of rusted equipment, *Corrosion Science*, 2016, 102, 446-454.
56. D. Starosvetsky, O. Khaselev, J. Starosvetsky, R. Armon, and J. Yahalom. Effect of iron exposure in SRB media on pitting initiation, *Corrosion Science*, 2000, 42, 345-359.
57. D. Starosvetsky, J. Starosvetsky, R. Armon, and Y. Ein-Eli, A Peculiar Cathodic Process during Iron and Steel Corrosion in Sulfate Reducing Bacteria (SRB) Media, *Corrosion Science*, 2010, 52, 1536-1540.
58. D. Starosvetsky, O. Khaselev, J. Starosvetsky, J. Yahalom, and R. Armon, The Role of Sulphides in Iron Activation in Chloride Containing Solutions, *Electrochemical and Solid State Letters*, 1999, 2(6): 265-266.
59. D. Starosvetsky, J. Starosvetsky, R. Armon, and J. Yahalom. Pitting corrosion of carbon steel by iron bacteria. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2001, 47(4): 79-91.
60. J. Starosvetsky, D. Starosvetsky, M. Danciger, and R. Armon. Adsorption of Flavobacterium and P. fluorescens P17 on different metals. *Electrochemical polarization effect. Biofouling*, 2001, 17(4): 289-301.
61. J. Starosvetsky, R. Armon, A. Groysman, and D. Starosvetsky, MIC of Storage Tank Aluminum Floating Roofs During Hydrotest, *Materials Performance*, 2002, 41(4): 50-54.
62. I. Popov, D. Starosvetsky, D. Shechtman, Initial stages of corrosion within Mg-Zn-Y-Zr alloy in 1 g/l NaCl. *Journal of Materials Science*, 2000, 35, 1-8.
63. D. Starosvetsky, O. Khaselev, and J. Yahalom. Corrosion Behavior of Heat-Treated Intermetallic TiNi in HCl Solutions. *Corrosion*, 1998, 54(7): 525-530.
64. D. Starosvetsky, A. Shenhar, and I. Gotman, Corrosion Behavior of PIRAC nitrided Ti-6Al-4V surgical alloy. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2001, 12, 1-6.
65. D. Starosvetsky and I. Gotman, Corrosion Behavior of PIRAC nitrided NiTi shape memory surgical alloy. *Biomaterials*, 2001, 22(13): 1853-1859.
66. D. Starosvetsky and I. Gotman, TiN coating improves the corrosion behavior of a superelastic NiTi surgical alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2001, Vol. 148, Issues 2-3: 268-276.
67. R. Rosenberg, D. Starosvetsky, I. Gotman, Surface modification of a low modulus Ti-Nb alloy for use in medical implants. *Journal of Materials Science Letters*, 2003, 22(1): 29-32.
68. Reut Godley, David Starosvetsky, Irena Gotman, Bonelike apatite formation on niobium metal treated in aqueous NaOH, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2004, 15(10): 1073-1077.
69. רפי פלד, יורם רשף, שירת הברבור, המוזאון לאמנות ישראלית, רמת גן, ישראל, 2014.