

חיכוך וחיכוך ביולוגי

ניר קמפף¹

מבוא

חיכוך הוא תכונת פני שטח. כ-23% מצריכת האנרגיה בעולם כיום משמשת להתגברות על חיכוך (!), בעיקר בתחומי השינוע ותהליכי ייצור תעשייתיים. השימוש בנוזל סיכה על מנת להוריד את החיכוך בין פסל אבן כבד לבין הקרקע שעליה הוא נגרר תועד לראשונה על תבליטים והירוגליפים מצריים מלפני כ-4,500 שנים (תמונה 1). מעניין לציין, שאף שנראה מלכתחילה שהנוזל המשמש את המובילים לסיכוך הוא שמן, צורת הכד מלמדת כי הנוזל הוא מים וייתכן אף כי אלו מי ים. אך לנושא זה עוד נחזור בהמשך.

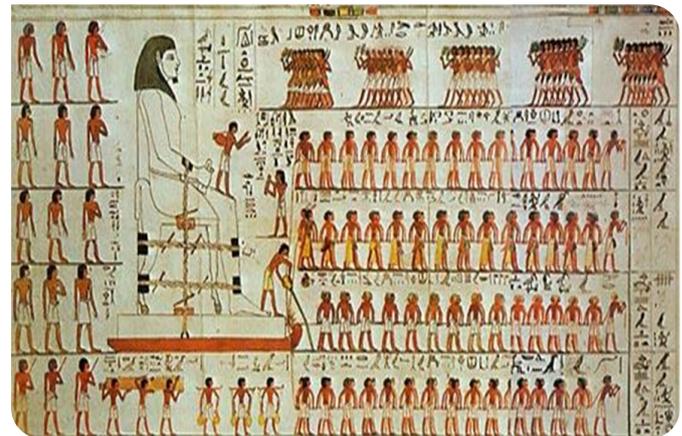
מקדם החיכוך

מקדם החיכוך (μ) מוגדר כיחס בין כוח החיכוך הנמדד (F_s - Shear force) לבין כוח הניצב הנמדד (F_n - Normal force).

$$\mu = \frac{F_s}{F_n}$$

מקדם החיכוך משמש להשוואה של יעילות החיכוך בין משטחים שונים; כאשר ערכו גבוה יעילות החיכוך גבוהה וכאשר הוא נמוך יעילות החיכוך נמוכה. להלן דוגמאות לערכים של מקדמי חיכוך בין שני משטחים זהים יבשים מוצקים: גומי - 1.15; ברזל - 1.0; זכוכית - 1.0-0.9; פלדה (תערובת של ברזל ופחמן) - 0.8; עץ - 0.5-0.25; טפלון - 0.2-0.05; קרח - 0.04-0.02.

מושג נוסף הקשור בחיכוך הוא **בלאי**, ומוגדר כשחיקת חומר כתוצאה מחיכוך. היחידות המקובלות לתיאור בלאי הן ס"מ, מ"מ וכיוצא באלה, דהיינו, שינוי בממדי החומר (בדרך כלל עובי) כתוצאה מסילוקו בתהליך השחיקה.



תמונה 1: ציור קיר משנת 1880 לפנה"ס מקברו של ג'וה'וטהופ (לקוח מתוך: PHYSICAL REVIEW LETTERS 112, 175502 (2014)).

כדי להגן על המשטחים ולמזער את האפקטים הפיזיקליים שהוזכרו, המתרחשים בין המשטחים בתהליך ההחלקה והגורמים לנזק וכשל של חומרי המשטחים פותחו שיטות שונות להקטנת החיכוך:

(1) **שימוש בחומרי סיכוך** (או סיכה, באנגלית Lubricants). חומרי הסיכה פועלים בכמה אופנים: (1) הידרודינמית (Hydrodynamic lubricants) - נוזל המצוי בין המשטחים יוצר שכבה נוזלית לא דחיסה המפרידה בין המשטחים; (2) סיכוך שכבת הגבול (Boundary lubrication) - חומרים היוצרים שכבה דקה על פני המשטחים, המקטינה את המגע בין המשטחים ואת הנזק המכני העלול להיווצר, והינה עמידה ללחץ הנוצר בעקבות המגע ההדוק בין המשטחים. כדי שחומרי הסיכוך יפעלו ביעילות עליהם להיות בעלי צמיגות נמוכה, עמידות כימית, עמידות לחום (כגון אלו המשמשים במנועים) ועמידות בלחץ גבוה.

(2) **שימוש במסבים** (Ball-bearings) יכול גם הוא להוריד את החיכוך. כך, למשל, אפשר להוריד את מקדם החיכוך בין שתי מתכות מ-0.6 ל-0.002.

לאונרדו דה-וינצ'י למד מניסוייו בסוף המאה ה-15 שכוח החיכוך אינו תלוי בגודלו של שטח המגע, אך תלוי בכוח הנורמלי (הניצב) שמפעיל הגוף המחליק על המשטח. כיום מקובל לחשוב כי הכוח (ליחידת שטח) המתנגד להחלקה (Shear stress) עולה עם העומס, תוך כדי מעורבותם של מנגנונים נוספים (כגון הדבקה, חספוס ויצירת קשרים כימיים) התורמים לכוח החיכוך הכללי. לדוגמה, בעוד שעל צמיג המכונית להסתובב ולנוע תוך כדי נסיעה, נדרש בנוסף גם חיכוך גבוה כדי למנוע החלקה. האנרגיה המושקעת כדי להזיז שני משטחים בכיוונים מנוגדים משמשת להתגברות על המנגנונים שצוינו (הדבקה, חספוס ויצירת קשרים כימיים) ומשתחררת לסביבה בעיקר בצורה של חום, אך גם כאנרגיית גלי קול (כתוצאה מרעידת החומר).

1 ד"ר ניר קמפף הוא מדען סגל בכיר במעבדה למדידת כוחות בפני שטח (בראשותו של פרופ' יעקב קליין), ובמעבדה לאנליזת פני שטח בפקולטה לכימיה, במכון יוצמן למדע. הוא חוקר תופעות פני שטח, בשיתוף עם מדענים רבים בארץ ובח"ל.

מקובל לחשוב על חיכוך המתרחש בין שני מוצקים, אך קיימות מערכות רבות שמעורב בהן חיכוך בין חומרים רכים, לדוגמה מערכות ביולוגיות

על הגלוי מבחינת הסידור המבני של המערכות הביולוגיות. לכן ההבנה הפיזיקלית של חיכוך ביולוגי היא מורכבת ומסובכת יותר. לאחרונה חלה התקדמות מחקרית והבנתית ביחס למערכות חיכוך של חומר רך. נציג כאן כמה מחקרים חלוציים.

יונים (Ions) כמסבים

לאחרונה נמדדו כוחות חיכוך בין משטחים טעונים בנוכחות תמיסות מימיות ואלקטרוליטיות (תמיסות המכילות מים ומלח). שימוש במכשיר ה-SFB העלה שיונים הכלואים בין משטחים טעונים יכולים להתנהג כמסבים מולקולריים כאשר המשטחים נתונים בלחץ ונעים ככוונים מנוגדים (Raviv et al., 2002). הסיבה לכך נעוצה בנוזליות שכבת המים המקיפה את הוין, ולמעשה בשל השחלוף המהיר של מולקולות המים המקיפות את היונים הקרובים למשטח, תוך כדי חיכוך, היונים מתנהגים כמסבים מולקולריים. כך נמנע המגע בין המשטחים ונשמר החיכוך הנמוך ביניהם. כיום ממצאים אלו נושאים חשיבות טכנולוגית וביולוגית ממדרגה ראשונה. במערכות ביולוגיות ריכוז המלחים הוא כ-0.1M, וכאשר ישנה קרבה בין משטחים ביולוגיים טעונים יכול להיווצר חיכוך. הממצאים המוזכרים יכולים להסביר מנגנוני הורדת חיכוך טבעיים כגון ביו-לובריקציה, תנועת מולקולות על ממברנות ובתוכן והובלה חוץ-תאית ותוך-תאית.

למעשה, אפשר לומר שמים לבדם אינם חומר סיכה טוב, אולם חומרים הקושרים אליהם הרבה מולקולות מים (ממוימים) מסככים בעילות בזכות המים הקושרים אליהם. כאמור, יוני מלח מומסים במים מסככים טוב. ישנם חומרים אחרים שנמצאו יעילים בהורדת חיכוך, למשל במערכות ביולוגיות.

פוספוליפידים כחומרי סיכה

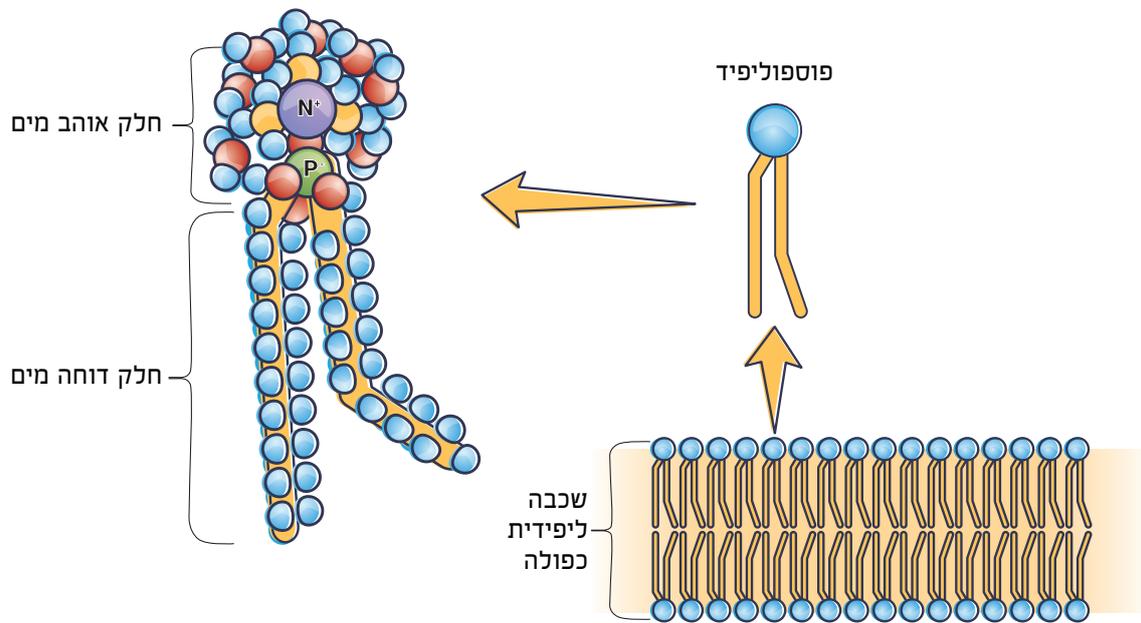
פוספוליפידים הם קבוצת חומרים המכילים (1) חומצות שומן (שרשראות פחמימניות דוחות מים); (2) גליצרוֹל; ו- (3) פוספט ואמין (כולין, אוהב מים) (ראו איור 1-א). הם נפוצים מאוד במגוון רחב של אורגניזמים ומרכיבים את ממברנת התאים. סוגים שונים של פוספוליפידים נמצאים גם בנוזל המקיף את הסחוסים של מפרקי הגוף ובנוזל הדמעות. הפוספוליפידים יכולים לקשור עד כעשרים (!) מולקולות מים, ולכן כחומרים פעילי שטח (היכולים להיקשר למשטחים), הם חומרי סיכוך מצוינים הודות לשכבת המים הגורמת למשטחי הסחוסים להחליק זה כלפי זה. במחקר מקיף המבוצע במכון ויצמן נלמדת ההשפעה של פוספוליפידים שונים הקיימים בצורה טבעית על החיכוך בין משטחים בכלל ובמפרקי הגוף בפרט. נמצא שציפוי משטח בפוספוליפידים יכול להוריד את החיכוך בשלושה עד ארבעה סדרי גודל! כך אפשר לקשר את הסוג והמבנה של הפוספוליפידים לחיכוך הנמוך המתקיים בין שכבות סחוס שבמפרקים (ראו איור 1-ב). הבנת פעולת הפוספוליפידים במערכות ביולוגיות יכולה לעזור במציאת פתרונות לריפוי

הבנה טובה יותר של פעולת חומרי הסיכה התאפשרה תוך כדי התקדמות המחקר והטכנולוגיה בתחומי מדעי פני השטח ב-30 השנים האחרונות. מדע הטרביולוגיה הוא התחום המדעי העוסק בחיכוך (Friction), בשימון (Lubrication) ובבלאי (Wear). התפתחות מדע הנו-טרביולוגיה תרמה רבות להבנת מנגנוני החיכוך המתרחשים על פני משטחים ברמה המולקולרית ומעריכים בתוכם תופעות פיזיקליות וכימיות. הידע וההבנה בנוגע לתופעות אלו נרכשו בזכות ההתקדמות הטכנולוגית, שאפשרה לבצע מדידות ברמה המולקולרית במכשירים כמו מיקרוסקופ מנהור סורק (Scanning Tunneling Microscope או STM) ומיקרוסקופ כוח אטומי (Atomic Force Microscope או AFM). שיטות אלו מאפשרות מדידת כוחות ושרטוט המבנה, הסידור וההרכב המולקולרי של משטחים (טופוגרפיה), תוך כדי שימוש בתכונת החיכוך המולקולרי. המאפיין העיקרי בשיטות אלו הוא השימוש במחט מולקולרית מול משטח נבחן.

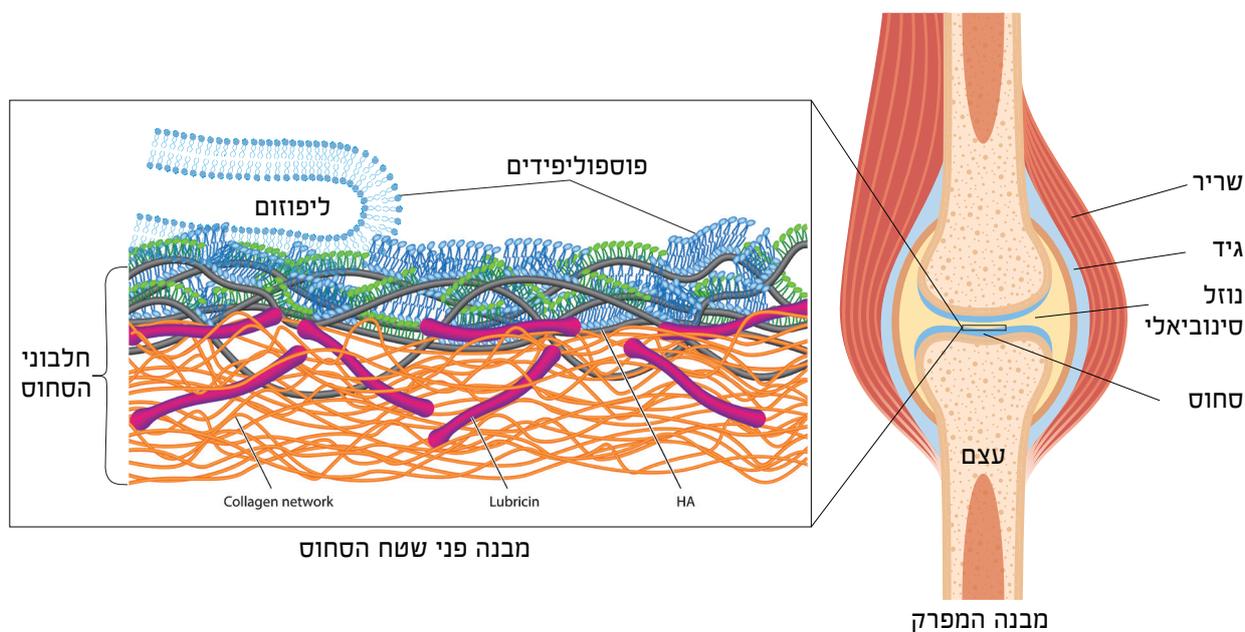
מכשיר נוסף למדידת כוחות נורמליים וחיכוך הוא SFB (Surface Force Balance apparatus). מכשיר זה משתמש בשיטה אינטרפרומטרית למדידת כוחות נורמליים, והמבנה המיוחד שלו מאפשר הזזת משטח אחד כנגד השני, תוך מדידת כוח הגזירה (חיכוך) בין שני משטחים, בדומה למתרחש בין מערכות חיכוך רבות. שיטה רגישה זו מאפשרת מדידה מדויקת של המרחק בין המשטחים, ברזולוציה של חלקי ננו-מטרים וכוחות של ננו-ניוטונים בודדים. מדידות כאלו אפשר לבצע כאשר התווך בין המשטחים הוא גז או נוזל. מלבד רגישותה הרבה, יתרון משמעותי של שיטה זו על פני שיטות אחרות למדידת כוחות (כגון AFM) הוא היכולת לקבוע את המרחק האמיתי בין המשטחים הנמדדים. מכאן שהשימוש בשיטה זו מאפשר ללמוד גם על השינוי במקדם השבירה של התווך, ובתוך כך גם על כמות החומר הספוח על פני המשטח הנבדק.

חיכוך בחומר רך

בעולם הסובב אותנו מקובל לחשוב על חיכוך המתרחש בין שני מוצקים. אך קיימות מערכות רבות שמעורב בהן חיכוך בין חומרים רכים (Soft materials). תחום החומרים הרכים כולל מספר רב של סוגי חומרים, כגון נוזלים, פולימרים, ג'לים, קצפים, תרחיפים, ולמעשה רוב החומרים הביולוגיים. בשונה ממערכות סינטטיות, שבהן אפשר לבדוד את השפעת מרכיביהן, מערכות ביולוגיות מורכבות ממספר רב של חומרים ומולקולות. גם אם מגלים את הרכב החומרים במערכות הביולוגיות, עדיין רב הנסתר



א.



ב.

איור 1: א. מבנה פוספוליפיד. ב. מבנה של מפרק ומבנה פני שטח הסחוס.

Jahn et al, (2016) Annual Review of Biomedical Engineering, 18, 235. מתוך 8 איור של איור 8

פוליאלקטרוליטים חצי-סינטטיים. פוליאלקטרוליטים סינטטיים הם פולימרים המיוצרים בכמה שיטות כימיות, והעיקרית שבהן היא הארכת השרשרת הפולימרית תוך כדי הוספת יחידות לשרשרת הקיימת. ההתנהגות הייחודית של הפוליאלקטרוליטים **בסביבה מימית** היא זו שמבדילה את הקבוצה הזו מהפולימרים הבלתי-מיוננים. בתמיסה מימית טהורה, מבנה הסליל הפולימרי האקראי של הפוליאלקטרוליטים נוטה לתפוח בזכות הקישור למולקולות המים שבסביבתו. כאשר פוליאלקטרוליטים נקשרים למשטחים טעונים, משתנים גם המבנה המרחבי של הפולימר וגם תכונות המשטח.

מצבים רפואיים שונים, כגון שחיקת סחוסים (Osteoarthritis) ופציעות מפרקים.

פולימרים טעונים כמפחיתי חיכוך

פוליאלקטרוליטים הם פולימרים המכילים קבוצות טעונות ויכולים להיות ממקור טבעי, מלאכותי וחצי-מלאכותי. רוב המערכות הטבעיות מבוססות על מים, לכן אפשר למצוא בתוכן מגוון רחב של פוליאלקטרוליטים כמו DNA. אפשר להפיק פוליאלקטרוליטים מאצות, מרקמות מהחי ומצמחים, וכן אפשר לשנות את ההרכב והמבנה של הפולימרים הטבעיים ליצירת

פוסטפוליפיידים הם חומרי סיכוך מצוינים הודות לשכבת המים הגורמת למשטחי הסחוסים להחליק זה כלפי זה

במפרקים מלאכותיים אינם משביעי רצון ועומדים כיום על $\mu_{\text{eff}} = 0.05$, שהוא פי 50 גבוה יותר ממקדם החיכוך במפרק תקין.

"מברשות" פוליאלקטרוליטיות

למדנו שאפשר לשלוט בחיכוך על ידי ספיחה של פולימרים למשטחים, אך מבנה כזה אינו בהכרח מסודר. האם גם הסידור והארגון המולקולרי שלהם יכול להשפיע על החיכוך? ספיחה מבוקרת של פולימרים למשטחים יכולה ליצור סידור שכבתי או אנכי צפוף כמו מברשת. שכבות פולימריות מסודרות וצפופות כמו מברשות על משטחים בסביבה מימית נבחנו כבר בעבר (Klein et al., 1994). מבנים אלו מבוססים על מולקולות טעונות (פוליאלקטרוליטיות) ספוחות לפני השטח וארוזות בצפיפות גבוהה. אפקטים של דחייה מונעים את חדירת המברשות, הספוחות על שני משטחים, זו לתוך זו אפילו תוך כדי הפעלת לחצים גבוהים (של מספר אטמוספרות). נמצא שכאשר לוחצים שתי שכבות של "מברשות" זו מול זו - נשארת בין שני המשטחים שכבה נוזלית דקה שיכולה להפחית את החיכוך בצורה משמעותית (Klein et al., 1994). מטרת מערכת זו היא ליצור מבנה של שתי שכבות קשות הנעות זו על גבי זו בלחצים האופייניים שקיימים באופן טבעי במפרקים, ולמדוד את החיכוך שנוצר. מחקרים אלו בוצעו במעבדה לחקר פני-שטח שבמכון ויצמן ופורסמו בכתב העת Nature (Raviv et al., 2003). המרחק והכוחות בין שתי שכבות כאלו הבאות במגע הדוק נמדדו במכשיר ה-SFB שהוזכר קודם לכן (Kampf, et al., 2004). הכנת המשטח לקראת יצירת המברשת הטעונה כללה ציפוי ראשוני בחומר הידרופובי. הציפוי יוצר על המשטח שכבה הידרופובית אחידה ודקה בעובי של כ-1 ננומטר. יצירת המברשת הטעונה התבצעה באמצעות תצמיד פולימרי (Diblock) המורכב משתי יחידות: האחת, פולימר הידרופובי בשם Poly (methyl methacrylate); (PMMA) והשנייה, פולימר הידרופילי טעון בשם (PSGMA) Poly(sodium sulfonated glycidyl methacrylate). כאשר המשטח ההידרופובי בא במגע עם תמיסת התצמיד, התחברו החלקים ההידרופוביים (PMMA) של המולקולה למשטח ההידרופובי, והחלק ההידרופילי (PSGMA) התארך והתרחק מהמשטח. מספר רב של מולקולות כאלה שנספחו על המשטחים יצרו לבסוף מברשת פוליאלקטרוליטית צפופה על פני המשטח (ראו איור 2).

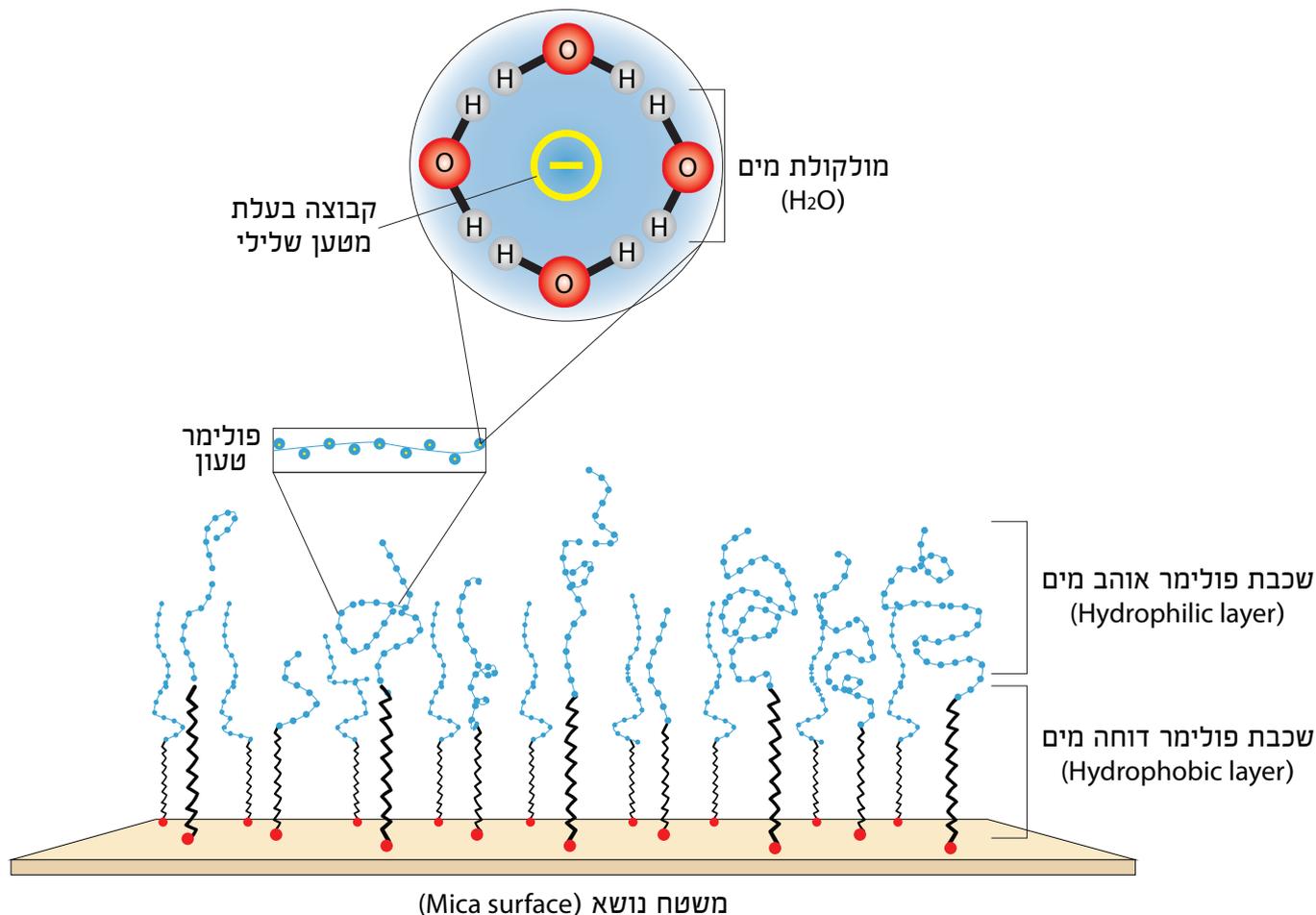
הכוח הניצב בין שני משטחים מצופים במברשות פוליאלקטרוליטיות בתווך מימי הראה דחייה, שהתחזקה תוך כדי לחיצת המשטחים עד ננו-מטרים בודדים. מדידת החיכוך בין משטחי המברשת הפוליאלקטרוליטית או בין מברשת לבין משטח חשוף בוצעה כאשר המשטחים היו נתונים בלחץ הדומה ללחצים הקיימים במערכות ביולוגיות (כגון במפרקים), תוך כדי

המגוון הגדול של שימושים מעשיים בפוליאלקטרוליטים נובע מסיבות מספר: (1) הפולימרים הם מסיסי מים; (2) הם יכולים לגרום לשינוי בתכונותיהם של נוזלים ושל תרחיפים; (3) הקבוצות הטעונות מסוגלות להגיב עם יונים, עם חלקיקים קולואידליים ועם משטחים בעלי מטען הפוך; (4) יכולים להיקשר למשטחים ובתוך כך לשנות את תכונות פני השטח; (5) חומרים אלה יכולים להתאים גם כחומרים הרגישים או בלתי-רגישים לפירוק כימי או ביולוגי. הם משמשים כיום בין השאר כחומרי עיבוי, ייצוב, פיזור, ציפוי, טיפול במי שפכים וקרעק, בתעשיית הסבון והדטרגנטים, כשרפים לשחלוף יונים וכן בתעשיית הדלקים והבטון.

השילוב של הסיכוך היוני ופוליאלקטרוליטים טעונים קיים גם במערכות טבעיות. אחת הדוגמאות למערכת כזו היא מנגנון פעולתם של פוליאלקטרוליטים במפרקים. המפרק, שהוא אזור המפגש בין שתי עצמות, מורכב מנוזל המפרק (סינוביאלי), המשתתף בהפחתת החיכוך ומשמש בולם זעזועים, ומרקמת סחוס, העוטפת את העצמות (ראו איור 1-ב). רקמת הסחוס מכוסה בחומצה היאלורונית (HA), שהיא פולימר טעון השייך למשפחת הגליקופרוטאינים. השילוב בין הסינוביה והחומצה היאלורונית מונע את המגע הישיר בין עצמות המפרק ומאפשר תנועה חלקה של העצמות בכיוונים מנוגדים תחת לחצים ומאמצים גבוהים (של מספר אטמוספרות). המנגנון הביולוגי המשוכלל שתואר כאן מפחית את החיכוך בין שתי העצמות בצורה יעילה ביותר. מקדם החיכוך הדינמי במפרק אדם נמדד ונמצא כי הוא שווה ל-0.001. זהו מקדם חיכוך נמוך מאוד בהשוואה למקדמי חיכוך אחרים, לדוגמה, בין ברזל וקרח ($\mu_{\text{eff}} = 0.03$).

בעקבות שינויים פיזיולוגיים, הרכב רקמת הסחוס משתנה, והיא נעשית פחות אלסטית ושבירה יותר. תופעה זו ואחרות קשורות ככל הנראה בירידה ברמות החומצה היאלורונית הן בנוזל הסינוביאלי והן ברקמה הסחוסית. שחיקת הסחוס (ארתריטיס) מלווה בתופעות קליניות כגון כאבי פרקים, דלקות פרקים ושברים ברקמת הסחוס (אוסטאוארתריטיס). לצורך טיפול במחלה זו פותחו בשנים האחרונות חומרים הדומים במבנה הכימי שלהם לנוזל הסינוביאלי (כגון גלוקוזאמין גליקן) שתפקידו להפחית את החיכוך. הטיפול אומנם מפחית את הכאבים ומקל את התסמינים, אך אינו מונע את תהליך השחיקה. במקרים קשים יותר נדרש ניתוח להחלפת המפרק - תהליך יקר המצריך תקופת החלמה ארוכה, ולעיתים גם החלפה מחודשת לאחר 12-15 שנים. מקדמי החיכוך האופייניים לאחר החלפת המפרק

מונומר שבקצהו קבוצה בעלת מטען שלילי, מוקף מולקולות מים



איור 2: מברשות פוליאלקטרוליטיות הבנויות מפוליאלקטרוליטים ספוחים בצפיפות גבוהה על פני משטח נושא הידרופובי

תנועה בכיוונים מנוגדים ובמהירויות משתנות. מקדם החיכוך שנמדד ($\mu_{eff} = 0.001-0.0006$) היה בשניים עד שלושה סדרי גודל נמוך יותר מזה שנמדד, לדוגמה, בין פוליאלקטרוליטים ספוחים לא מסודרים. בגלל המטען שלהן, המבנה המיוחד על פני השטח והדחייה שנוצרת, המברשות אינן חודרות זו לתוך זו גם תוך כדי הפעלת לחץ. הנוזליות של שכבת המים סביב המטענים שעל "המברשת", כפי שתואר לעיל, יכולה להסביר גם את החיכוך הנמוך שנמדד בין המברשות השטוחות. ההבנה של יעילות מולקולרית בהפחתת חיכוך יכולה לשמש בפיתוח ותכנון שתלי מפרקים מלאכותיים יעילים יותר.

מקורות

לצפייה ברשימת המקורות למאמר זה יש להכנס [לקישור](#).

רפואה, מיקרו-מתקנים ועוד.

אפשר לסכם ולומר שמדע הטריבולוגיה בכלל והננו-טריבולוגיה בפרט נעשה בשנים האחרונות נפוץ לא רק בהקשר של