



חומרים שלא נרטבים

Valeri Frumikin^{1,2*}, Moran Bercovici²

¹המחלקה למתמטיקה, המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT), קיימברידג', MA, ארצות הברית
²הפקולטה להנדסת מכונות, הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, ישראל

טיפת גשם אשר נופלת על משטח כגון חלון הרכב, או כף היד שלנו, נוטה להתפרש על גבי המשטח ואף להיאחז בו. אולם ישנם חומרים כגון עלה של פרח הלוטוס אשר טיפת מים תתגלגל מהם לקרקע ככדור כמעט מושלם, תוך שהיא מנקה אותם מחלקיקי אבק ומזיהומים שונים. במאמר זה נבחן, מה משפיע על הנטייה של חומרים שונים להירטב במידה שונה, ואיך אפשר לתכנן חומרים אלה במעבדה ולבנותם?

מים הם חומר מיוחד

כל החומרים מורכבים מאטומים, שהם היחידה הקטנה ביותר של כל יסוד. אטומים מתחברים למבנים מורכבים יותר שנקראים מולקולות. מולקולות מים מורכבת מאטום חמצן אחד ושני אטומי מימן, ויש למולקולות המים מבנה מיוחד שגורם למטען החשמלי שבה להתפלג בצורה בלתי אחידה כך שצד אחד שלה טעון במטען חיובי, והצד השני טעון במטען שלילי (איור 1). מולקולות בעלות התפלגות מטען בלתי אחידה נקראות מולקולות **קוטביות** (כיוון שיש להן קוטב חשמלי חיובי וקוטב חשמלי שלילי), והן נוטות להימשך חזק זו לזו. כיוון שמים הם חומר **קוטבי** מאוד, מולקולות מים נמשכות חזק זו לזו, אך הן גם נמשכות לחומרים קוטביים אחרים, ולא נמשכות לחומרים שאינם קוטביים. כוחות המשיכה בין מולקולות המים לבין עצמן

סוקרים צעירים

ORT EBIN,
SCIENCE
AND
TECHNOLOGY
RESERVE
CLASS
גיל: 14-15

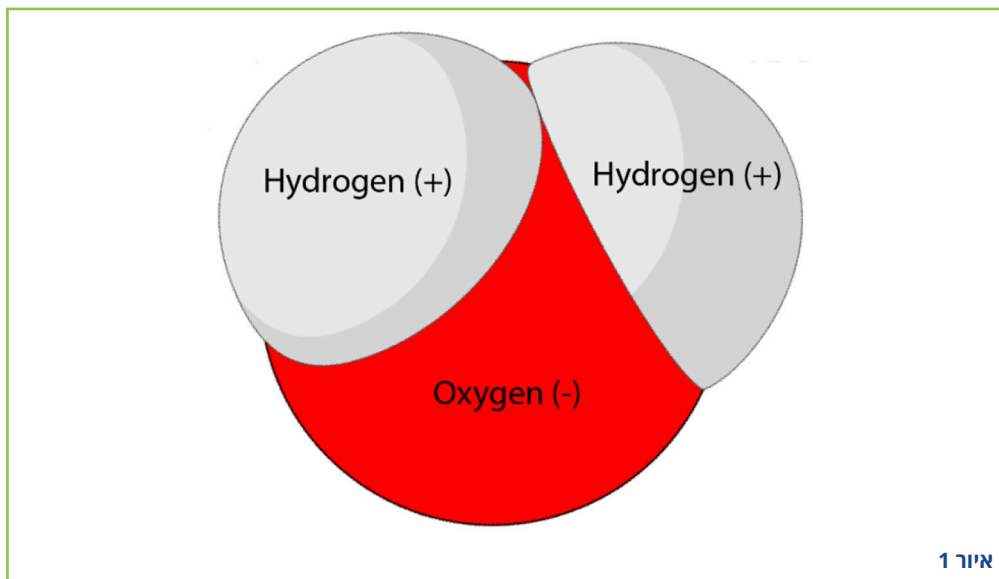


קוטבי (polar)

בעל שני קטבים, למשל קוטב אחד בעל מטען חיובי ואחר בעל מטען שלילי.

איור 1

מבנה של מולקולת מים. מולקולת המים היא קוטבית מכיוון שלצד עם שני אטומי המימן (בלבן) יש מטען חיובי ואילו לאטום החמצן (באדום) יש מטען שלילי.



איור 1

קוהזיה (cohesion)

נטייתם של חלקיקים או משטחים דומים או זהים להיצמד זה לזה.

אדהזיה (adhesion)

נטייתם של חלקיקים או משטחים שונים להיצמד זה לזה.

זווית המגע (contact angle)

הזווית שנוצרת בקו המגע בין טיפה למשטח מוצק, מוקפת בנוזל (בדרך כלל אוויר).

הידרופילי (hydrophilic)

'אוהב' מים.

הידרופובי (hydrophobic)

'מפחד' ממים.

נקראים כוחות **קוהזיה**, וכוחות המשיכה בין מולקולות המים לבין חומרים אחרים נקראים כוחות **אדהזיה**.

בואו נעשה ניסוי: טפטפו מעט שמן לתוך כוס מים והתבוננו בשני הנוזלים. לאחר כמה שניות, תגלו שבמקום להתערבב עם המים, השמן יצור טיפות קטנות ועגולות בתוך המים, ואם תחכו מספיק זמן, כל השמן יתאחד לשכבה אחת רציפה שצפה על פני המים. מדוע זה קורה? ובכן, כיוון ששמן הוא חומר לא קוטבי, ומים הם חומר קוטבי מאוד, מולקולות המים לא יימשכו למולקולות השמן, אבל יימשכו חזק זו לזו, ולכן הן ידחקו את מולקולות השמן עד שמתקבלת הפרדה מלאה בין השמן ובין המים. כמו כן, כיוון ששמן פחות צפוף ממים, השמן יצוף על פני המים.

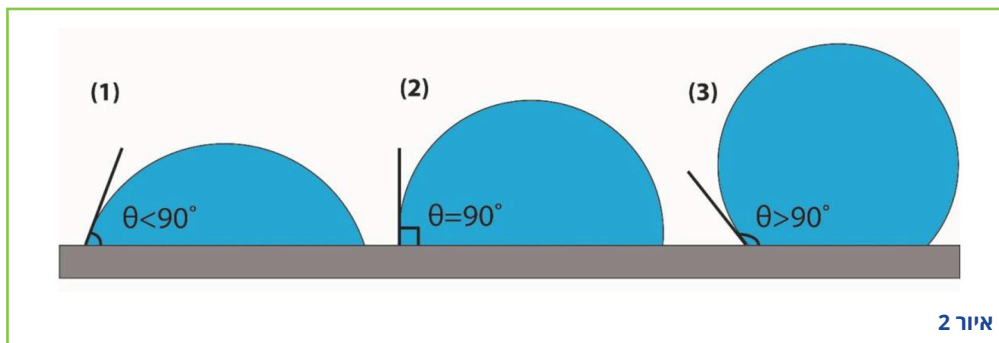
מה לדעתכם יקרה אם יניחו מים על פיסת זכוכית, שהיא חומר קוטבי אחר? תוכלו כנראה להסיק, שמולקולות המים יימשכו אל מולקולות הזכוכית ולכן טיפת מים תתפרש על פני הזכוכית. לעומת זאת, עבור חומרים לא קוטביים, כמו למשל משטחי פלסטיק, מולקולות המים יימשכו זו לזו חזק יותר מאשר אל מולקולות הפלסטיק, ולכן טיפת מים שמונחת על משטח כזה תקבל צורה של חצי כדור ולא תתפרש היטב. כדי לכמת את מידת ההרטבה של משטח מסוים מדענים מודדים את **זווית המגע** שנוצרת בין המשטח לבין הטיפה המונחת עליו [1] (איור 2). אם כוחות האדהזיה (כוחות משיכה בין מולקולות המים לבין חומרים אחרים) חזקים בהרבה מכוחות הקוהזיה (כוחות משיכה בין מולקולות המים לבין עצמן), תתקבל זווית מגע הקטנה מ-90 מעלות, ואז נאמר שהחומר של המשטח הוא **הידרופילי** (פילי = אוהב, הידרו = מים). אם, לעומת זאת, כוחות הקוהזיה יהיו חזקים לעומת כוחות האדהזיה, תתקבל זווית מגע הגדולה מ-90 מעלות, ואז נאמר שהחומר הוא **הידרופובי** (פובי = פוחד).

מדוע טיפות הן עגולות?

נדמיין לנו מולקולת מים בודדת שצפה לה בתוך טיפת מים גדולה, מוקפת במולקולות מים אחרות רבות מכל הצדדים. למרות שהמולקולה תרגיש משיכה מכל חברותיה, סך הכוח על

איור 2

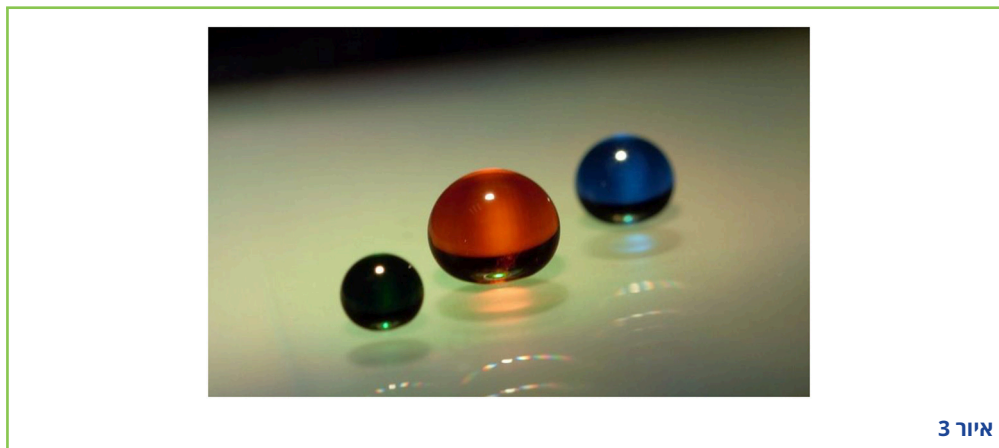
שלוש טיפות שמדגימות שלוש זוויות מגע. (1) זווית המגע בין הטיפה למשטח קטנה מ-90 מעלות, מה שהופך את המשטח להידרופילי. (2) זווית המגע בין המשטח לטיפה שווה ל-90 מעלות. (3) זווית המגע בין המשטח לטיפה גדולה מ-90 מעלות, מה שהופך את המשטח להידרופובי.



איור 2

איור 3

שלוש טיפות מונחות על משטח סופר-הידרופובי (דוחה מים). אפשר לראות שהטיפה הגדולה ביותר נמחצת קצת על ידי כוח הכבידה, בזמן שהטיפה הקטנה ביותר שומרת על צורתה העגולה. צילום: רן אשל.



איור 3

מתח פנים

(surface tension)

הנטייה של משטחים נוזליים לפעול כמו יריעה אלסטית.

המולקולה יהיה אפס, בדומה לכך שאם נמשוך חבל בכוח שווה בשני קצותיו החבל לא יזוז. כעת, נדמיין מולקולת מים שנמצאת בדיוק על שפת הטיפה – מעליה יש אוויר ומתחתיה מים. מולקולה כזו תרגיש כוח משיכה רק כלפי המים שנמצאים תחתיה, אך לא תרגיש משיכה אל האוויר. דמיינו טור של מולקולות שמושכות זו את זו, אשר מוביל משפת הטיפה, דרך מרכזה, ועד לשפה השנייה. כיוון שכל המולקולות מושכות זו את זו, טור המולקולות מתנהג כגומייה מתוחה אשר מנסה להתכווץ. כיוון שאפשר לחשוב על 'גומיות' כאלה אשר פועלות בכל הכיוונים, כל מולקולות המים שנמצאות על שפה בין מים לאוויר ירגישו כוח חזק שפועל כלפי פנים, והכוח הזה (ליחידת אורך של השפה) יוצר את **מתח הפנים** של מים. זו בדיוק הסיבה לכך שטיפות מים קטנות מקבלות צורה של כדור – כל המולקולות על שפת הטיפה נמשכות כלפי פנים הטיפה, ולכן הן יוצרות לחץ אחיד מכל הכיוונים שמעצב את הטיפה לכדור (איור 3). תופעה זו אינה ייחודית למים, ולמעשה לכל נוזל יש מתח פנים אחר, אך לרוב חלש הרבה יותר מזה של מים.

מתח הפנים החזק של המים גורם לפני השטח של המים להתנהג כמו שכבת גומי גמישה, ואף מאפשר לחרקים מסוימים ללכת על פני המים בלי לשקוע. יתר על כן, אם ננסה לעוות טיפת מים קטנה, מתח הפנים של המים יתנגד לכך, וינסה להחזיר את הטיפה לצורתה הכדורית. אם כן, מדוע מים בקנקן שעל השולחן במטבח לא מקבלים צורה כדורית? חשוב לזכור שעל המים פועל כוח נוסף שרוצה לשטח אותם, והוא כוח הכבידה של כדור הארץ. עבור טיפות קטנות מאוד (כמו טיפות גשם) השפעתו של כוח הכבידה הוא קטן מאוד, ולכן הטיפות נשארות כדוריות. אולם, עבור גופי מים הגדולים מכמה מילימטרים, שבהם מספר המולקולות שבנפח הטיפה גדול משמעותית ממספר המולקולות על השפה, כוח הכבידה הופך חשוב מאוד, והמים מאבדים את צורתם הכדורית.

איך עובדים חומרים סופר-הידרופוביים?

כתבנו שאפשר לאפיין את מידת ההרטבה של משטח כלשהו על ידי מדידה של זווית המגע בין טיפת מים לבין המשטח, וזווית זו נקבעת לפי היחס בין כוחות הקוהזיה לכוחות האדהזיה. בפועל, זה נכון רק עבור משטחים חלקים לגמרי, בזמן שרוב המשטחים האמיתיים הם מחוספסים.

בשנת 1936 חוקר בשם רוברט וונזל הראה כי חספוס של משטח מחזק את נטיית ההרטבה הטבעית של החומר [2], זה אומר שאם זווית המגע בין טיפת המים ומשטח חלק קטנה במעט מ-90 מעלות (משטח הידרופילי) אז אותו סוג חומר בתוספת חספוס יהיה בעל זווית מגע קטנה אף יותר. כלומר, יהיה עוד יותר הידרופילי. באופן דומה, אם זווית המגע בין טיפת המים והמשטח החלק גדולה במעט מ-90 מעלות (משטח הידרופובי), חספוס פני המשטח יצור זווית מגע גדולה בהרבה (בדרך כלל מעל 140 מעלות), כלומר, המשטח יהיה עוד יותר הידרופובי. הסיבה לתופעה נעוצה בכך שלמשטח מחוספס יש יותר שטח פנים, ולכן על הנוזל לעבוד "קשה יותר" כדי להרטיב משטח שהוא לא אוהב, ו"פחות קשה" כדי להרטיב משטח שהוא כן אוהב.

בשנת 1944 שני חוקרים בשם קאסי ובקסטר התבוננו בבעיה מעניינת של טיפת מים המונחת על משטח נקבובי (כמו ספוג) [3]. הם הראו שאם החומר הנקבובי הוא הידרופובי (זווית מגע גדולה מ-90 מעלות) והנקבוביות קטנות מאוד, אז המים אינם יכולים לחדור אל תוך הנקבוביות, והטיפה נשארת מונחת על כיסים של אוויר שכלוא בתוך הנקבוביות. מתברר שטיפות כאלה יוצרות בקלות זווית מגע גדולות מאוד, לכן אם נכין משטח נקבובי מחומר הידרופובי נקבל

חומר סופר-הידרופובי!

חומר סופר-הידרופובי (super-hydrophobic material)

חומר בעל זווית מגע גבוהה מאוד כאשר הוא בא במגע עם מים (בדרך כלל מעל 135°).

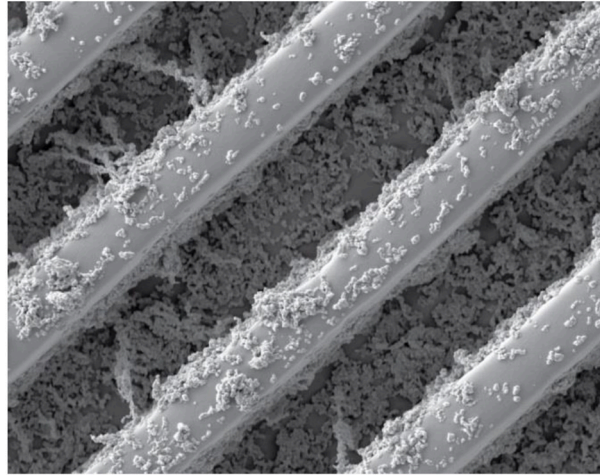
חומרים סופר-הידרופוביים קיימים בטבע כבר מיליוני שנים, והמפורסם שבהם הוא עלה של פרח הלוטוס. אם נתבונן בעלה זה דרך מיקרוסקופ, נראה שהוא מכוסה בגבשושיות קטנטנות בגודל עשירית מקוטר של שערה. גבשושיות אלה, מתפקדות כנקבוביות שיכולות לכלוא אוויר בין לבין המים. נוסף על כך הגבשושיות עצמן מכוסות בשערות שעווה קטנות אף יותר (כאלפית מעובי של שערה!) שעוזרות למנוע מהמים לחדור אל תוך כיסי האוויר הכלואים. במשך זמן רב לא ידענו איך לייצר בעצמנו חומרים עם מבנים קטנים כל כך, ורק בסוף שנות התשעים של המאה הקודמת הצלחנו לייצר חומרים סופר-הידרופוביים אמיתיים במעבדות.

עמיד החומרים הסופר-הידרופוביים

מתברר שלחומרים סופר-הידרופוביים יש המון שימושים פוטנציאליים מעניינים. למשל, אפשר להשתמש בספריי סופר-הידרופובי כדי לצפות שמשות לרכב ולהיפטר מהצורך במגבים, כיוון שטיפות גשם פשוט יתגלגלו מהשמשה המצופה. הספריי מכסה את השמשות בחלקיקים מיקרוסקופיים שקופים והידרופוביים אשר מעניקים לשמשה חספוס והופכים אותה לסופר-הידרופובית. תכונה חשובה נוספת של חומרים סופר-הידרופוביים היא שחלק מהם מאפשרים למים להחליק על פניהם בקלות רבה וזה מוריד את החיכוך בין המים למשטח. ספינות וצוללות עם ציפוי סופר-הידרופובי יוכלו לנוע במים בקלות יתרה, ויצרכו רק חלקיק

איור 4

תמונה של משטח סופר-הידרופובי שצולמה בעזרת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק. משטח זה יוצר במעבדה של פרופ' מורן ברקוביץ' בטכניון. התמונה מראה מבנים של תעלות ברוב 10 מיקרון (כעשירית מעובי של שיערה) המשמשים ללכידת כיסי אוויר. אפשר להבחין בחלקיקים קטנים שמפוזרים על פני מבנה התעלות. אלה הם חלקיקים בגודל של כ-100 ננומטר (כאלפית מעובי של שיערה) העשויים מחומר פלסטי מיוחד, ותפקידם הוא למנוע מהמים להיכנס אל תוך התעלות.



איור 4

מהאנרגיה הנדרשת כיום להניע אותן. הבעיה היא שכיס האוויר הכלואים בין המשטח הסופר-הידרופובי למים יכולים לקרוס מסיבות כמו לחץ גבוה, חימום או זרימת מים חזקה. לכן, אחד האתגרים המשמעותיים בתחום הוא ליצור משטחים אשר יהיו עמידים לגורמים אלה וישמרו על תכונות הסופר-הידרופוביות שלהם לאורך זמן.

בקבוצת המחקר שלנו חוקרים איך אפשר להשתמש בחומרים סופר-הידרופוביים לצורך הנעה של נוזלים בתעלות מיקרוסקופיות. זה חשוב מאוד לפיתוח התקנים זעירים, שניתן להשתמש בהם כדי לבצע אבחון רפואי מהיר, זול וזמין לכולם כולל בדיקות של זיהומים ויראליים וחיידקיים, חיפוש סימנים מוקדמים להתקפי לב, או בדיקת יעילות של תרופות נגד סרטן. באיור 4 מוצגת תמונה ממיקרוסקופ אלקטרוני סורק, של משטח סופר-הידרופובי שיוצר במעבדה שלנו.

לסיכום, מספר השימושים הפוטנציאליים בחומרים סופר-הידרופוביים הוא רב וממשיך לגדול! השוק לחומרים אלה סייע לתחום מחקר זה לפרוח בקצב מסחרר ותגליות חדשות רבות מתגלות. היום אפשר לומר בביטחון שאנו עומדים לראות שימוש בחומרים סופר-הידרופוביים במספר הולך וגדל של טכנולוגיות חדשניות, שככל הנראה יהיו חלק מכל תחומי חיינו בעתיד.

מקורות

1. Young, T. 1805. An essay on the cohesion of fluids. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 95:65–87.
2. Wenzel, R. 1936. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.* 28:988–94.
3. Cassie, A. B., and Baxter, S. 1944. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.* 40:546–51.

פורסם אונליין: 22 ביוני 2021

נערך על ידי: Idan Segev, Hebrew University of Jerusalem, Israel

Front. Young Minds. חומרים שלא נרטבים. (2021) Frumikin V and Bercovici M **ציטוט:** doi: 10.3389/frym.2020.621808-he

תורגם והותאם:

Frumkin V and Bercovici M (2020) Non-wetting Materials. Front. Young Minds 8:621808. doi: 10.3389/frym.2020.621808

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © Frumikin and Bercovici 2021. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

15-14 גיל: ORT EBIN, SCIENCE AND TECHNOLOGY RESERVE CLASS

אנו כיתת עתודה מדעית טכנולוגית בבית ספר אורט אבין ברמת גן. אורט אבין הוא בית ספר תיכון למדעים ואומנויות. בית הספר מקדם מקצועות טכנולוגיים מובילים: ביוטכנולוגיה, רובוטיקה ומדעי המחשב - סייבר.

הכותבים

VALERI FRUMKIN

אני חוקר בפוסט-דוקטורט בפקולטה למתמטיקה של המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס, בעברי מהטכניון. אני מתעניין מאוד בתופעות שפה, שזה כל הדברים המוזרים והמפתיעים שקורים בגבולות בין זורמים שונים. אני גם אוהב מאוד להנגיש מדע לקהל הרחב, ולחלוק את כל הדברים היפים שיוצא לנו לראות ולגלות. [*valerafr@gmail.com](mailto:valerafr@gmail.com)

MORAN BERCOVICI

אני פרופסור חבר להנדסת מכונות והנדסה ביו-רפואית בטכניון. במעבדה שלי, אנו חוקרים איך נוזלים מתנהגים בקנה מידה קטן, כשהם מושפעים על ידי שדות תרמיים וחשמליים, תגובות כימיות ותהליכים ביולוגיים. אנו מתעניינים בהבנת התהליכים הבסיסיים וביכולת ליישם אותם ליצירת כלים וטכנולוגיות חדשות עבור מגוון רחב של תחומים.



Hebrew version provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (נ.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

