

## מקרומולקולות זה כל הסיפור: מפלסטיק לדנ"א

Alexander B. Cook<sup>1\*</sup>, Lucka Bibic<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>המעבדה לננו-טכנולוגיה לרפואה מותאמת אישית, המכון הטכנולוגי של איטליה, גנואה, איטליה  
<sup>2</sup>בית הספר לרוקחות, אוניברסיטת מזרח אנגליה, נורוויץ', בריטניה

### סוקרים צעירים

ANJISHNU

גיל: 12



JEANINE

גיל: 15



### מקרומולקולה (Macromolecule)

מולקולה גדולה מאוד שמכילה אלפי אטומים, או יותר.

### פולימר (Polymer)

מולקולה גדולה, או מקרומולקולה, שמורכבת מהרבה יחידות חוזרות שנקראות מונומרים.

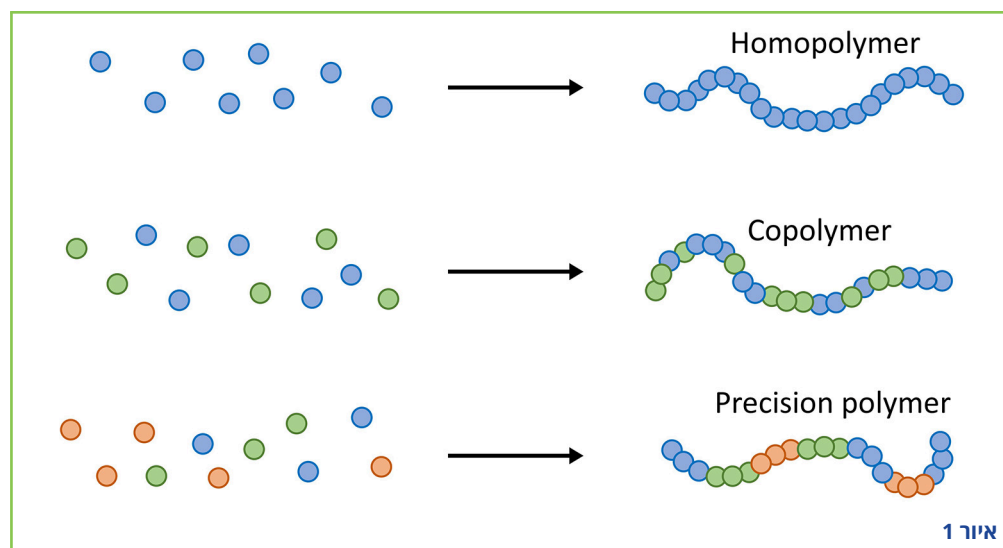
"אני מרגיש את זה באצבעות הידיים שלי, אני מרגיש את זה באצבעות הרגליים שלי, האהבה שנמצאת בכל מקום סביבי". אלה אולי מילים משיר פופולרי של חג המולד מהסרט "אהבה זה כל הסיפור", אולם זה יכול להיות באותה המידה שיר על מקרומולקולות – מולקולות גדולות שנמצאות סביבנו. מהציפורניים והשיער, עד לקצה הגומי של האוזניות שלכם, מקרומולקולות נמצאות בכל מקום. אתם בנויים ממקרומולקולות, וכך גם העצים ובקבוקי פלסטיק! אנו קוראים להם פולימרים – שרשראות ארוכות של מולקולות זהות עם מגוון של תכונות מועילות, כמו קשיחות או מתיחות. מתברר שאנו פשוט לא יכולים לחיות בלעדיהם. פולימרים מופיעים באופן טבעי (הדנ"א בתאים שלנו הוא פולימר) ובאופן סינתטי (מיוצר ע"י האדם), כמו פלסטיק, סליים או קלקר. מאמר זה חושף את מסתרי הפולימרים, ומסביר כיצד החומרים המרתקים האלה מעצבים את חיינו כפי שאנו מכירים אותם.

### מקרומולקולות – אבני הבניין של החיים

המילה המדעית למולקולה גדולה מאוד היא **מקרומולקולה**, מאחר ש"מקרו" משמעותו גדול. **פולימרים** הם חומרים שבנויים ממקרומולקולות אשר נוגעים כמעט לכל היבט בחיינו. מרבית

**איור 1**

בעולם של מקרומולקולות, פולימרים הם מולקולות שמורכבות מהרבה יחידות חוזרות של מולקולות קטנות יותר שנקראות מונומרים (מוצגות משמאל). ביונית, "פולי" משמעותו הרבה, ו"מר" משמעותו חלק. בעוד שהומופולימרים (Homopolymer) מסוג אחד של מונומר (נקודות כחולות), קופולימרים (copolymer) מכילים יותר מסוג מונומר אחד (נקודות כחולות וירוקות). ל"פולימרים מדויקים" (precision polymer) יש סדר מדויק שמקנה לפולימר מבנה מסוים (נקודות כחולות, ירוקות וכתומות).



איור 1

**מונומר (Monomer)**

אבן בניין, או יחידה חוזרת של פולימר.

**סינתטי (Synthetic)**

מיוצר על-ידי האדם מכימיקלים.

הסיכויים שרובנו היינו במגע עם לפחות אחד שמכיל פולימרים – מבקבוקי מים ועד לצמיגים ולגאדג'טים – בחמש הדקות האחרונות. המונח פולימר עצמו נותן לנו מושג על האופן שבו החומרים האלה מעוצבים. ביונית, "פולי" משמעותו "הרבה", ו-"מר" משמעותו חלק. כדי לראות זאת טוב יותר, דמיינו שאתם עונדים שרשרת שמורכבת מחרוזים. כל חרוז מייצג אטום. אתם יכולים להשחיל את החרוזים יחד על חוט בשורה אחת, או שאתם יכולים ליצור צְבִירִים של סוג חרוזים אחד עם סוגים אחרים, ואז להשחיל אותם יחד. בפולימר, החרוזים הבודדים נקראים **מונומרים**. ברגע ששמים אותם יחד, המונומרים מרכיבים את הפולימר. איור 1 מציג באופן מופשט כיצד מונומרים בונים סוגים שונים של פולימרים.

כדי להבין פולימרים טוב יותר, עלינו לבחון כל סוג של מונומרים שמהם הם מורכבים. פולימרים מגיעים בצורות ובגדלים שונים, והם נוצרים על-ידי בני אדם או על-ידי הטבע בצמחים וחיות. לדוגמה, חלבונים הם סוג אחד של פולימרים, והם בנויים ממונומרים שנקראים חומצות אַמינו. סוג החלבון תלוי בהרכב חומצות האמינו ובכמות החומצות שמחוברות יחד, והחלבון שמתקבל יכול להימצא בשיער או בציפורניים, בשרירים, בעור, או במנגנון תאי חשוב. פולימר אחר שמופיע באופן טבעי הוא עמילן, המשמש כמקור לאחסון מזון עבור צמחים כמו תפוחי אדמה, תירס וחיטה. עמילן הוא פולימר טעים שאפשר למצוא בלחם ובפסטה! ב-150 השנים האחרונות, בני אדם למדו כיצד לייצר פולימרים **סינתטיים** (כלומר שנוצרו על-ידי האדם). כיום, אנו יכולים "לשחק" עם פולימרים טבעיים כמו תאית (צָלוּלוֹז) – פולימר שמורכב מְגֵלֶקוֹז (סוג של סוכר) – או פולימרים סינתטיים כמו טֶפְלוֹן, שמתקבל מנפט.

**סיפורן של מקרומולקולות**

אף על פי שפולימרים עשויים להיות עתיקים כמו החיים עצמם, אנו מכירים אותם רק משנת 1830 בערך כשמדענים תיארו אותם לראשונה. הפולימר הסינתטי הראשון, שידוע בשם בְּקָלִיט, שהיה הפלסטיק הראשון, נוצר בשנת 1907 באמצעות תגובה כימית פשוטה ולא יקרה. לאחר מכן, בקליט סייע למהנדסים לייצר הרבה סוגים של צעצועי ילדים וציוד מטבח. אולם רק באזור שנת 1920 הרמן סטאוּדִינְגֶר, מדען גרמני שעבד על הפולימרים הסינתטיים האלה, טבע את המונח מקרומולקולה. לרוע המזל, מדענים רבים לא האמינו לו שמקרומולקולות

קיימות, מאחר שבאותו הזמן הרבה כימאים סירבו להכיר בקיומן של "מולקולות ענק אורגניות". במקום זאת, הם העדיפו את הרעיון שהרבה חומרים טבעיים – כמו למשל תאית, משי וגומי – הכילו יחידות קטנות שמוחזקות יחד על-ידי כוחות חזקים במיוחד. אחרי שסטאודינגר הכריז על המונח של מקרומולקולה, כימאי אחד ידוע אמר "אתה יכול באותה המידה לטעון שאיפשהו באפריקה יש פיל שאורכו 500 מטרים וגובהו 100 מטרים" [1, 2]. באופן משעשע, בעוד שהפיל לא קיים באמת, הפולימר כן, וגילוי הפולימרים יצר מהפכה במדע.

בשנות 1940-1950 חוקרים גילו חלק מהפולימרים שקיימים בטבע בגוף האדם, כולל חלבונים, שכבר תיארונו קודם לכן כפולימרים המורכבים ממונומרים של חומצות אמינו, ודנ"א. דנ"א מורכב ממונומרים שנקראים נוקלאוטידים. כשמדענים בנו את המודל הראשון של פולימר דנ"א טבעי, הם הבינו שהמבנה של מולקולת הדנ"א סייע להם להסביר את האופן שבו דנ"א מתפקד בקידוד כל המידע הדרוש ליצירת אורגניזם.

## המבנה של מקרומולקולות

כשהזמן עבר, מדענים התחילו לחקור את המבנה של מקרומולקולות. הם מצאו שפולימרים טבעיים לעיתים קרובות קטנים הרבה יותר מהגרסאות הסינתטיות שלהם. הם גם גילו שהאורך של הפולימרים הסינתטיים האלה, והתבניות שבהן המונומרים מסודרים, הם מה שגורם לפולימרים סינתטיים להיות חזקים, קלים, שקופים וגמישים. אולם לפולימרים גם יש כוח-על אחר – יש להם הרבה צורות שונות! באיור 2A, אתם יכולים לראות שלוש צורות עיקריות של פולימרים: ליניארי, מסועף וקשר-צולב. פולימרים ליניאריים ארוכים נראים כמו ספגטי מבושל. שלא כמו פולימרים מסועפים, פולימרים ליניאריים נוטים להסתבך זה בזה ולהפוך לדביקים ואלסטיים. מצד אחר לפולימרים עם מבנה קשר-צולב יש הרבה ענפים, כך ששרשראות הפולימר לא יכולות לנוע זו על פני זו. התכונה הזו גורמת להם להיות קשים, קשיחים ופריכים, ולכן שימושיים ליצירת חומרים קשים כמו גומי בצורת קשר-צולב שמשמש במרבית צמיגי המכוניות והמשאיות. מבנה הקשר הצולב של פולימר הוא הסיבה לכך שצמיגי מכוניות לא נמסים כשאתם נוסעים מהר מאוד, אף על פי שהם מתחממים מאוד מהחיכוך עם הכביש.

מאז שלמדנו כיצד ליצור ולעבוד איתם, פולימרים כמו פוליאמיד, פוליאסטר ופוליאטילן, הציפו את עולמנו. פולימרים הם חומרים חזקים כגון חומרים שמשמשים להגנה מפני קליעים – כמו באפודים צבאיים. פוליאסטר מכילים קשרים חלשים יותר, ואנו משתמשים בהם ליצור דברים כמו תפרים נמסים לטיפול בפצעים. אתם יכולים לראות מבני פולימרים אחרים באיור 2B, כולל חלק מהפולימרים הטבעיים המורכבים שבנויים מסוכרים, מחומצות אמינו ומנוקלאוטידים.

## מדוע מקרומולקולות חשובות לבריאות שלנו?

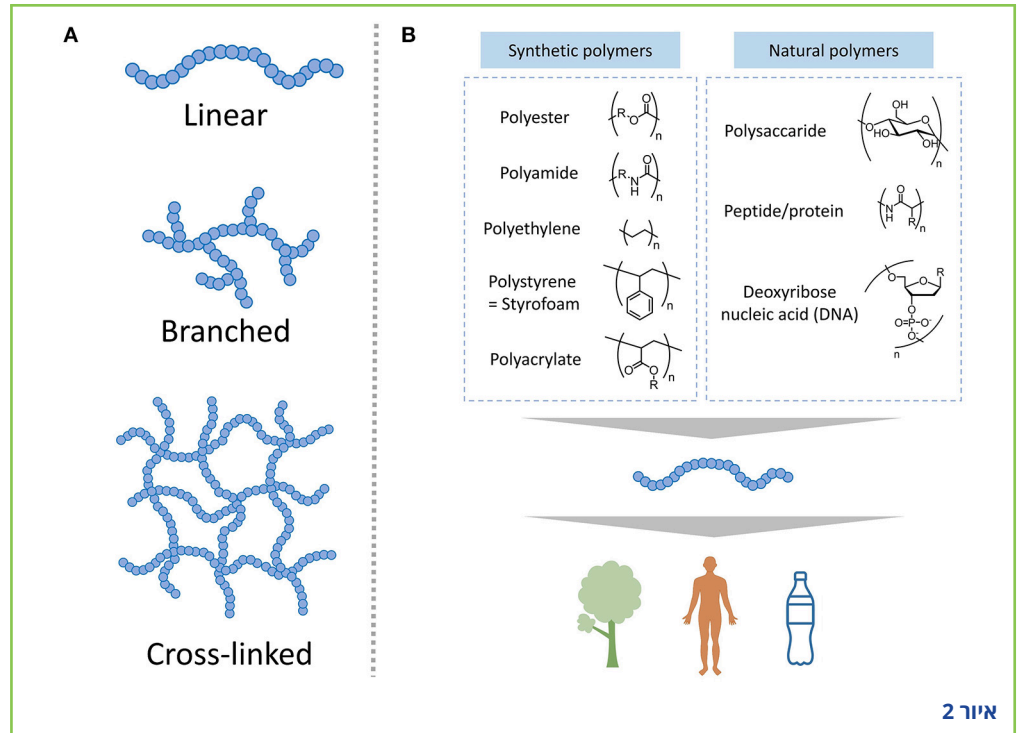
למקרומולקולות יש תפקידים חשובים ביותר בתפקוד היומיומי של התאים שלנו. לדוגמה, כשפולימרים סינתטיים, שמשמשים להשתלות רפואיות במקרים של שברים בעצמות, מתקשרים עם הגוף שלנו, אנו צריכים לוודא שהם לא יישארו בתוכנו זמן רב מדי, מאחר שהם עלולים להצטבר לכמויות רעילות ולהפוך מסוכנים לבריאות הגוף שלנו! אז, הפולימרים הסינתטיים האלה מעוצבים כך שאחרי שהם יסיימו את משימתם, הם יתפרקו לחלקים קטנים יותר שהתאים שלנו יכולים לעבד באופן טבעי. כתוצאה מההתפרקות שלהם בתוך הגוף שלנו,

### דנ"א (DNA)

חומר שנושא מידע גנטי על האופן שבו יצור חי נראה ומתפקד.

**איור 2**

(A) פולימרים יכולים להיות בעלי שלושה מבנים שונים: ליניארי (למעלה), מסועף (באמצע) וקשר-צולב (למטה). (B) מבנים של מונומרים שיוצרים חלק מהפולימרים הטבעיים והסינתטיים השכיחים. כאן, הקווים הישרים מייצגים קשרים בין אטומים, והאותיות השונות מייצגות סוגי אטומים שונים (O הוא חמצן, N הוא חנקן, H הוא מימן, ומחסור באות משמעותו לרוב אטום פחמן), בעוד ש R הוא כל אטום או קבוצת אטומים אחרים, ו n הוא כל מספר של יחידות חוזרות של פולימרים.



**איור 2**

אנו קוראים לחומרים האלה פולימרים מתכלים. דוגמה אחת לקבוצה של פולימרים מתכלים הם פוליאסטרם שמשמשים לאינספור יישומים ביו-רפואיים כמו למשל תפרים נמסים, וגם ברגים, צלחות ופינים, שתומכים בעצמות שבורות ומחזיקים אותן יחד. חשוב גם שפולימרים סינתטיים יתאימו לגוף שלנו, מה שנקרא **תאימות ביולוגית**. תאימות ביולוגית מאפשרת לגוף שלנו לתפקד באופן נורמלי בנוכחות של פולימר, בלי שיהיו תגובות אלרגיות או תופעות לוואי לא נעימות מהפולימר.

ברור שהשימוש בפולימרים השפיע על הבריאות שלנו, לעיתים בלי שנהיה כלל מודעים לכך [3]. הנה דוגמה: כשאנו חולים, אנו לפעמים בולעים כדורים שמסייעים לנו להרגיש טוב יותר במהרה. הכדורים האלה נמסים בקיבה שלנו כך שהתרופה תיכנס למחזור הדם. אולם לרוע המזל, לעיתים התרופה נהרסת בקיבה או במעיין לפני שהיא מגיעה למחזור הדם ולאיברים שזקוקים לטיפול, או שלעיתים התרופה לא נמסה בקיבה. תפקיד הקיבה הוא להמיס דברים במהרה, אז האטת התהליך הזה יכולה להיות מאתגרת. פתרון אחד? ליצור תרופה עם פולימרים שמעוצבים בדיוק לכך!

לדוגמה, תרופה שנקראת ניפדיפין משמשת לטיפול בלחץ דם גבוה, שאֵלה חדשות טובות לכמעט מיליארד בני אדם שסובלים מהבעיה הזו ברחבי העולם. אולם החדשות הרעות הן שלניפדיפין בדרך כלל אין מספיק זמן להימס בקיבה. למרבה המזל, מגיע פולימר להציל את המצב. פולימר שנקרא פוליונילפירולידון, והוא משמש לחיזוק יכולתה של הניפדיפין להימס בקיבה. מדענים מערבבים את הניפדיפין, שה**מסיסות** שלה נמוכה, עם פוליונילפירולידון כדי ליצור גלולה. באמצעות ציפוי הניפדיפין בכיסוי שבנוי מהפולימר הזה, התרופה מסוגלת להגיע באופן בטוח אל מחזור הדם (איור 3) [4]. זו רק דוגמה אחת מבין דרכים רבות שהמקרומולקולות יכולות להשפיע באופן חיובי על הבריאות שלנו. לכן, הסוד הבא לבריאות לא בהכרח יכול שירה לבית לצלילי שיר חג מולד מהסרט "אהבה זה כל הסיפור", אלא למעשה יכול מקרומולקולות.

**תאימות ביולוגית (Biocompatibility)**

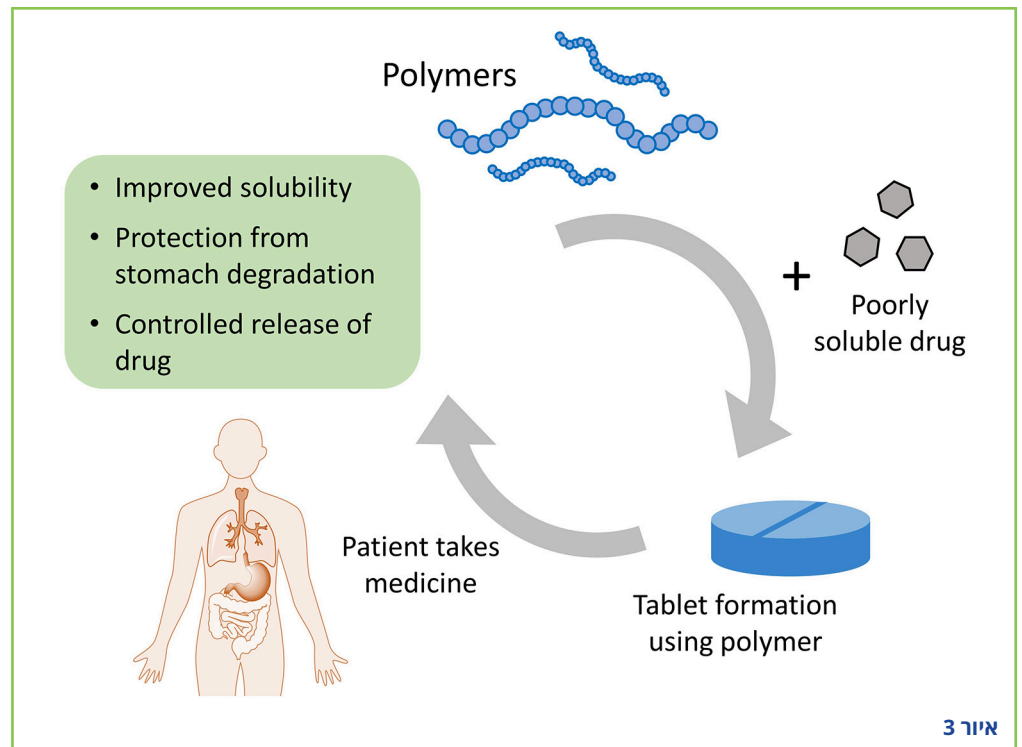
היכולת של חומר להתקיים בגוף בלי לפגוע ברקמה החיה.

**מסיסות (Solubility)**

יכולת של חומר להתערב בתוך נוזל.

### איור 3

פולימרים יכולים לסייע לתרופות להיכנס לגופנו ביעילות רבה יותר. תרופות שלא מתמוססות בקלות יכולות להיות מצופות על-ידי פולימרים ליצירה של גלולה. הפולימרים מסייעים לתרופה להימס בגופו של המטופל, כך שכאשר המטופל לוקח את הגלולה התרופה לא מפורקת בקיבה אלא מגיעה בקצב הנכון אל תוך מחזור הדם.



### תודות

אנו רוצים להודות למנטורים וליועצים שלנו, דוקטור פאולו דקוצי, דוקטור ליאן סטוקס ופרופסור מארק סירסי. העבודה הזו נתמכה על-ידי Biosciences Doctoral Training Partnership (BB/M011216/1, 1794654) ותוכנית המחקר והחדשנות Horizon 2020 של האיחוד האירופי תחת הסכם מענק מרי סקולדובסקה קירי מספר 754490.

### מקורות

1. Mülhaupt, R. 2014. Hermann Staudinger and the origin of macromolecular chemistry. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 43:1054–63. doi: 10.1002/anie.200330070
2. Vandenberg, E. J. 2012. *Contemporary Topics in Polymer Science*. Vol. 5. New York, NY: Springer Science & Business Media.
3. Langer, R., and Tirrell, D. A. 2004. Designing materials for biology and medicine. *Nature* 428:487. doi: 10.1038/nature02388
4. Marsac, P. J., Konno, H., and Taylor, L. S. 2006. A comparison of the physical stability of amorphous felodipine and nifedipine systems. *Pharm. Res.* 23:2306. doi: 10.1007/s11095-006-9047-9

פורסם אונליין: 27 באוגוסט 2020

**נערך על ידי:** Viduranga Y. Waisundara, Australian College of Business and Technology- Kandy Campus, Sri Lanka

**ציטוט:** Cook AB and Bibic L (2020) מקרומולקולות זה כל הסיפור: מפלסטיק לדנ"א. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2019.00126-he

#### תורגם והותאם:

Cook AB and Bibic L (2019) Macromolecules, Actually: From Plastics to DNA. Front. Young Minds 7:126. doi: 10.3389/frym.2019.00126

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

**COPYRIGHT** © 2019 © Cook and Bibic 2020. 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 למחברים (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

### ANJISHNU, גיל: 12

היי, קוראים לי Anjishnu ואני בכיתה ו. אני גר בסן דייגו ויש לי תשוקה לקריאה, לכתבה, למתמטיקה ולמדע. אני גם אוהב לקרוא על מכונות ורכבים אחרים. אני נהנה לשחק טניס ולנגן על גיטרה. אני רוצה להיות מהנדס אווירונאוטיקה כשאגדל, ואני רוצה לעצב מטוסים שיהפכו טיסות לבטוחות יותר.

### JEANINE, גיל: 15

אני תלמידה בכיתה ט בבית ספר תחרותי מאוד, מה שאומר שאני תמיד צריכה להיות מוכנה למה שעומד להגיע. המקצועות האהובים עליי הם ביולוגיה מולקולרית וכימיה, אף על פי שאני נהנית גם ממתמטיקה והיסטוריה של האומנות. נוסף על כך אני נהנית לשחות ולהיות חברה במועדון הסביבתי ובקבוצת אתלטיקה. כמו כן, אני מפנה זמן כדי לעשות הרבה כף. התחביבים שלי כוללים קריאת ספרי פנטזיה, צפייה בסדרות תיעודיות, בילוי עם חברים שלי ואכילת המזונות האהובים עליי.

## הכותבים

### ALEXANDER B. COOK

אלכסנדר הוא כימאי של פולימרים שעובד באיטליה תחת מלגת מרי סקלודובסקה קירי. הוא למד כימיה באימפריאל קולג', וקיבל דוקטורט מאוניברסיטת וורויק. באופן כללי, הוא מתעניין ביישום של מדע חומרים והנדסה במטרה לסייע בפתרון בעיות גלובליות. כיום, המחקר שלו מתייחס לדרכים חדשות לטפל במחלות שונות, כולל מחלות נוירולוגיות. לאחר שגר במדינות הירוקות היפות ניו-זילנד, איטליה ובריטניה, הוא נהנה מאוד מעשיית ספורט בחוץ ומהרים. \*alexander.cook@iit.it



**LUCKA BIBIC**

מדענית ביום, נינג'ה כותבת מדע בלילה וספיידרוומן בין לבין: לוקה בשלבי סיום הדוקטורט שלה באוניברסיטת מזרח אנגליה בבריטניה. תחומי העניין המחקריים של לוקה כוללים יצירת פפטידים חדשניים למגוון של מטרות מוחיות שמעורבות בסרטן, במחלות מוחיות ניווניות ובהפרעות פסיכיאטריות. כיום, לוקה בודקת את ההשפעות של ארס עכבישים על כאב כרוני. כשלוקה אינה במעבדה היא רצה, מטיילת, או מצייצת ב-luckabibic-@. \*l.bibic@uea.ac.uk

Hebrew version  
provided by

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

