



## מתוק כמו... חלבון? הרפתקאות בעולם המתיקות

Eleonora Asia Motti<sup>1</sup>, Piero A. Temussi<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> תיכון א. אמאלדי, ברצלונה, ספרד

<sup>2</sup> המחלקה למדעי הכימיה, אוניברסיטת נאפולי פרדריקו השני, נאפולי, איטליה

<sup>3</sup> המחלקה למדעי מוח בסיסיים וקליניים, קינגס קולג' לונדון, לונדון, בריטניה

### סוקרים צעירים



טעם הוא אחד מחמשת החושים, לצד חושי הראייה, השמיעה, הריח והמישוש. במזון יש חלקיקים קטנים – מולקולות – הנכנסים לפה ונלכדים בקולטנים על הלשון. הקולטנים מדווחים למוח על טעם מתוק, מר, חמוץ, מלוח, או אומאמי (טעם "בשרי", שקיים גם בעולם הצומח). לבני אדם יש העדפה ניכרת למתוק על פני שאר הטעמים. יש אלפי חומרים מתוקים – לא רק סוכר, אלא עוד כימיקלים רבים אחרים, ביניהם כמה חלבונים מתוקים טבעיים. כאשר קולטן "בולע" מולקולה מתוקה, הוא משנה צורה ושולח איתות אל תוך התא. יש מולקולות גדולות מאוד של חלבונים מתוקים שאינן יכולות להיכנס לפתח הקולטן, אבל הן מסוגלות להתחבר אליו על-ידי כך שהן "מחבקות" אותו מבחוץ.

### כשאתם אוכלים, אתם גם טועמים את המזון וגם מריחים אותו

בני אדם אוהבים אוכל, ויש לכך סיבה טובה. אנחנו הרי לא יכולים לשרוד בלי מזון, שממנו אנחנו מקבלים קלוריות וחומרים מועילים רבים ששומרים על בריאותנו. את המזון אנחנו בוחרים בדרך כלל לפי הטעם. טעם הוא אחד מחמשת החושים – בנוסף לראייה, שמיעה, מישוש וריח – המאפשרים לגופנו לתקשר עם העולם החיצון.

כמה טעמים שונים קיימים, לדעתכם? היות שיש מגוון עצום של סוגי מזון, מתבקש לחשוב שיש גם המוני טעמים. קחו למשל פירות: כמה שונה טעמם של דובדבנים מטעמם של תפוחים, אגסים, אפרסקים, ענבים, אבטיחים או תותים? ובענייני ממתקים: האם לכל העוגות יש טעם זהה? סוכריות, עוגיות ג'ינג'ר, עוגיות שוקולד, טופי, ביסקוויטים, סופגניות, קאפקייקס, שוקולד: האם כולם פשוט מתוקים ולא יותר מזה? האם לכולם יש טעם של סוכר? ברור שלא.

### אומאמי (Umami)

הטעם המאפיין מרק או בשר, ומאכלים רבים מהמזרח הרחוק; בשפה היפנית, פירוש המילה הוא "טעים". ייתכן שאתם מכירים אותו מחטיפים מסויימים.

### אות (Signal)

פעולה הגורמת להתחלה של פעולה אחרת.

### מולקולה (Molecule)

החלק הקטן ביותר של חומר, שמורכב משני אטומים לפחות שיש ביניהם קשרים חזקים.

### קולטן/רצפטור (Receptor)

חלבון הנמצא על גבי תא ו"קולט" מולקולה אחרת – כלומר, קושר אותה אליו ושולח אות חשמלי למוח.

### חלבון (Protein)

מולקולת ענק המורכבת ממספר גדול של חומצות אמינו.

על סמך ניסיונכם האישי אתם מן הסתם חושבים שיש טעמים רבים – אולי כמספר המאכלים השונים. אבל מתברר למרבה ההפתעה שיש רק חמישה טעמים: מתוק, מר, חמוץ, מלוח, ואומאמי (מזכיר בשר או מרק). טעמים הם מורכבים, בין השאר כי לא קל לנו להבדיל בין ריח לטעם, ומלבד חמשת הטעמים המוח מבחין גם במאות ריחות שונים. הוא מפרש את האותות המשולבים של ריח וטעם כאילו היו מגוון עצום של טעמים.

## איך מצליח המוח לזהות מולקולות טעם שונות?

איך אפשר להיות בטוחים שיש רק חמישה טעמים שונים? עד כה גילו המדענים רק חמש דרכים לשלוח למוח אותות הקשורים לטעם, בהתאם לחמשת סוגי המולקולות שהזכרנו.

בשפה מדעית אפשר לומר שהחוקרים מצאו עד כה על תאי הטעם של הלשון רק חמישה סוגים שונים של **קולטנים**, המתאימים לחמשת הטעמים האלה – מתוק, מר, מלוח, חמוץ, ואומאמי [1]. קולטנים הם **חלבונים** הנמצאים בצד החיצוני של התאים, ומולקולות מן הסביבה יכולות להיקשר אליהם. רוב האנשים, גם מבוגרים וגם ילדים, אוהבים את הטעם המתוק הרבה יותר מאשר את האחרים. מתי אנחנו חשים בטעם מתוק? כאשר מולקולה מתוקה נכנסת לפה היא מגיעה לתאי הטעם, הנמצאים על הלשון בקבוצות היוצרות צורה של ניצני פרחים (נקראים גם פקעיות טעם). פקעיות הטעם ממוקמות על גבי גבשושיות טעם (פטמיות הלשון), המקנות ללשון את הספוסה האופייני. על חלק מתאי הטעם יש קולטנים לטעם מתוק בלבד. כשמולקולה מתוקה באה במגע עם הקולטן, צורתו משתנה והוא שולח אות כימי אחר לתוך תא הטעם. באיור 1, הנקודות האדומות מייצגות מולקולות מתוקות, והקולטנים מופיעים כצורות ירוקות עם שתי "זרועות", צמודות לפני השטח של תא טעם (מופיע בצבע סגול). כשהמולקולה נוחתת על הקולטן הוא משנה את צורתו, הזרועות מתקפלות, ואות חשמלי נשלח ממנו למוח. המוח הוא שמפרש אות מסוים בתור "מתוק" כשאנחנו אוכלים ממתק, או "מר" כשאנחנו בולעים תרופה.

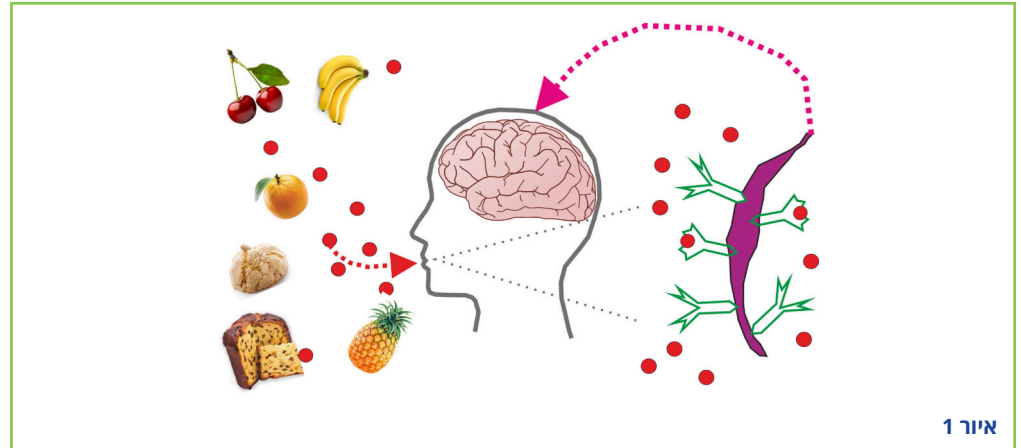
## מדוע מולקולות מתוקות הן מתוקות?

מה גורם למאכלים מתוקים להיות מתוקים? כל המזונות מורכבים מחלקיקים זעירים הנקראים מולקולות. מולקולות מסוימות במאכלים מתוקים מפעילים את הקולטנים שראיתם באיור 1, והם שולחים למוח את המסר "מתוק".

אלה מולקולות הן מתוקות? כשאנחנו חושבים על מאכלים מתוקים, הדוגמה הראשונה שעולה במוחנו היא בדרך כלל סוכר. ואכן, מולקולות סוכר הן מתוקות, אבל לא רק הן: יש אלפי חומרים בעלי טעם מתוק, ולא כולם מורכבים מאותן מולקולות.

## איור 1

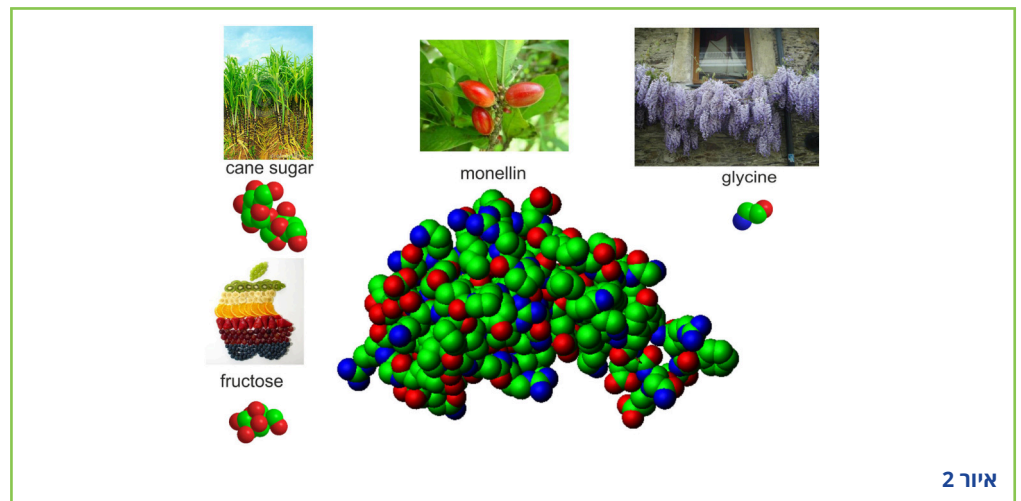
גירוי מתוק נוצר בתא טעם ממולקולות הנקשרות לקולטנים. כשקולטן הטעם (בירוק) על התא שמימין (סגול) נקשר למולקולה המתוקה (אדום), צורתו משתנה, והוא שולח מולקולות נסגרות, והוא שולח מולקולות אחרות אל תוך התא. לבסוף שולח התא אות חשמלי למוח כדי להודיע שנמצאה מולקולה מתוקה.



איור 1

## איור 2

מודלים אטומיים של כמה מולקולות מתוקות טבעיות. באיור מופיעים דגמי מולקולות של קנים, פרוקטוז, גליצין, וחלבון מתוק בשם מונליין. אטומי היסודות פחמן, חמצן וחנקן, שמהם מורכבים רוב החומרים הקיימים בטבע, מופיעים כדורים ירוקים, אדומים וכחולים, לפי אותו סדר. ליד כל דגם מופיעה תמונת הצמח או הפרי שממנו מופק החומר: קנה סוכר – לפרוקטוז, גרגרי הצמח *Dioscoreophyllum cumminsii* למונליין, ופרחי ויסטריה לגליצין. Cane sugar = קנה סוכר  
Monellin = מונליין  
Glycine = גליצין.



איור 2

רבות מהמולקולות המתוקות הן אמנם מולקולות סוכר מסוגים שונים: סוכר הקנים שכולנו מכירים, פרוקטוז הנמצא בפירות רבים, ועוד. במולקולות מתוקות אחרות יש כימיקלים אחרים, וגם הצורות שלהן אחרות. דוגמה אחת היא גליצין – חומצת האמינו הפשוטה ביותר (חומצות האמינו הן אבני הבניין של החלבונים). השם "גליצין" בא מהמילה היוונית העתיקה "גליקוס", שפירושו "מתוק". באיור 2 מופיעים דגמים של מולקולות מתוקות נפוצות שצורתיהן שונות מאוד. הם מצוירים בצורה שבה נהגו הכימאים לצייר פעם מולקולות – כקבוצות של כדורים צמודים. ליד כל מולקולה מופיע המקור שממנו מפיקים אותה: קנה סוכר לסוכר, פרחי ויסטריה לגליצין, פירות שונים לפרוקטוז, וגרגרי הצמח *Dioscoreophyllum cumminsii* לחלבון המתוק מונליין (הנקרא כך על שם מרכז מונל בפילדלפיה, שם התגלה).

בנוסף למולקולות מתוקות טבעיות ממקור צמחי, יש גם מולקולות רבות שנוצרו במעבדה ומשמשות להמתקת מזון, כמו **סכרין**, הממתיק המלאכותי הראשון, ו**אספרטיים**. המתקות של רובן התגלתה במקרה, כשכימאי זה או אחר שכח לרוחץ ידיים לפני האוכל – אבל גם מפני שכימאים במאה ה-19 היו אמורים לטעום כל חומר חדש שיצרו! זה היה נוהג מסוכן ביותר, ובימינו כימאים כבר אינם טועמים כימיקלים.

המדענים אמנם שיערו במשך שנים רבות שיש בפה קולטנים מיוחדים לטעם, אבל רק לפני שנים ספורות הצליחו לגלות אותם, וכעת אנחנו גם מבינים איך הם בנויים. קולטן הטעם

## סכרין

(Saccharin)

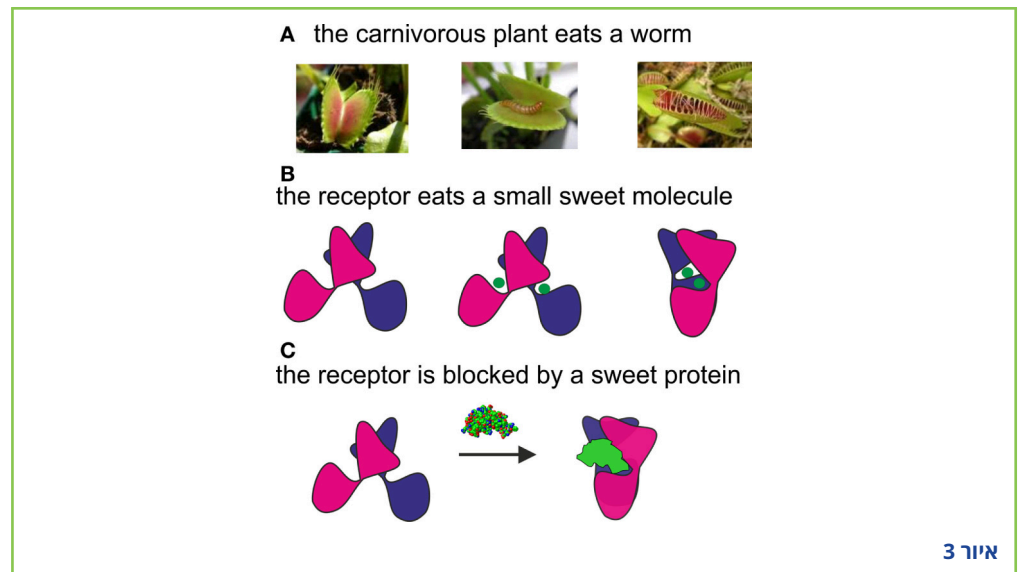
הממתיק המלאכותי הראשון.

**אספרטיים**  
(Aspartame)

אחד הממתיקים המלאכותיים הנפוצים ביותר.

### איור 3

השוואה בין קולטן טעם מתוק לבין צמח "מלכודת ונוס" – הצמח הטורף מחכה ב"פה" פעור, ואחרי שנכנסת פנימה תולעת, הוא נסגר. **B.** הקולטן נמצא במצב פתוח, והמולקולה המתוקה נכנסת לפתח כמו התולעת לפתח הצמח. הקולטן נסגר על המולקולה וצורתו משתנה. **C.** מנגנון אחר מאפשר למולקולה להיקשר לקולטן מבחוץ. כאן נראה חלבון מתוק, המסומן בצורת טריז ירוק, כשהוא חוסם את הקולטן וגורם לו להישאר במצבו הסגור והפעיל. חלבונים מתוקים כאלה נמצאים בצמחים טרופיים מסוימים.



המתוק מורכב משני חלבונים דומים מאוד הצמודים זה לזה (הם צבועים בכחול ובוורוד באיור 3). אופן הפעולה שלו מזכיר קצת את זה של הצמח הטורף "מלכודת ונוס". כפי שאתם רואים באיור 3A, החלק העליון של הצמח דומה לפה גדול, וכשנכנס אליו חרק, הוא נסגר וצורת הצמח משתנה.

בדומה לכך, גם החלק העליון של קולטן המולקולות המתוקות יכול "לאכול" מולקולה מתוקה קטנה, כמו מולקולת סוכר או אספרטיים (מופיעה באיור כנקודה ירוקה). כפי שתראו באיור 3B, כשהמולקולה נקשרת לקולטן, הוא משנה את צורתו. במצבו הסגור, הנראה בצד ימין, הוא יכול לשלוח אות כימי אל תוך התא. האות הכימי הופך לאות חשמלי ומועבר למוח, כפי שראינו באיור 1.

## חלבונים מתוקים חוסמים את הקולטן

במזון יש מרכיבים רבים, והנפוצים ביניהם הם סוכרים, שומנים וחלבונים. אנחנו יודעים מה הטעם של כל אחד מאלה: סוכרים הם מתוקים, שומנים – שמנוניים, ולחלבונים יש טעם "בשרי" (אומאמי). לא היינו מצפים שלסוכר יהיה טעם של בשר או דגים, או לחלבון – טעם של סוכר. לכן היה זה מפתיע ביותר כשהתגלו בצמחים טרופיים מסוימים חלבונים מתוקים [2]. רוב המולקולות המתוקות הן קטנות, כמו אלה המופיעות באיור 3B. לעומת זאת, חלבונים – ביניהם כמה מהחלבונים המתוקים – הם גדולים הרבה יותר. מולקולות ענקיות כאלה נקראות מקרו־מולקולות.

שני החלבונים המתוקים הראשונים שהתגלו, תאומיטין ומו־נלין, הם לא סתם מתקתקים אלא הרבה יותר מתוקים מסוכר רגיל – במקרים מסוימים פי 100,000 יותר! לחלבונים אלה יש תכונות מסקרנות רבות. לדוגמה, הם מתוקים רק לטעמם של בני אדם ושל קופים, ותפלים לחיות אחרות. יש השערה שגררי פירות של צמחים מסוימים מכילים חלבונים מתוקים כדי למשוך קופים שיעזרו להפיץ אותם: הקופים אוכלים את הגרגרים ופולטים את הזרעים, שמהם צומחים צמחים חדשים במקומות אחרים.

בתחילה שיערו המדענים שהחלבונים המתוקים ייקשרו לקולטן מסוג שונה ולא לאותו סוג הקושר מולקולות מתוקות קטנות. הם חשבו כך משום שחלבונים מתוקים מסוימים הם כמעט בגודל של הקולטן עצמו, ואינם יכולים לחדור לפתחיו הקטנים כמו המולקולות הקטנות (איור 3). כיום כבר ידוע לנו שיש רק סוג אחד של קולטן טעם מתוק, ושהוא מסוגל לזהות את כל סוגי המולקולות המתוקות, קטנות וגדולות.

איך מצליחים חלבוני הענק האלה להפעיל את הקולטן, אם הם גדולים מכדי להיכנס לפתח ולגרום לקולטן לשנות צורה (איור 3B)? הסבר אפשרי אחד הוא שחלבונים מתוקים גדולים נקשרים לצד החיצוני של הקולטן כאשר הוא במצב סגור. על תאי הטעם יש קומץ קולטנים שהם סגורים גם כשאין בסביבה חומר מתוק. איור 3C מראה כיצד חלבונים מתוקים יכולים לחסום את הקולטן כמו טריז העוצר דלת [1]. במקום "להאכיל" את הקולטן כמו המולקולות הקטנות, הם "מחבקים" אותו (איור 3C).

## האם חלבונים מתוקים יכולים להועיל לנו?

מדוע המדענים חוקרים את המולקולות המוזרות הללו? בין השאר מתוך סקרנות מדעית טהורה, אבל יש גם סיבה מעשית. בימי קדם, הצורה היחידה להמתיק אוכל הייתה להוסיף לו דבש. במאה ה-18 ניטעו מטעי סוכר רבים מאוד ביבשת אמריקה, והסוכר נעשה זמין וזול, לשמחתם של הילדים. אבל יש לזה גם חסרונות, משום ששימוש יתר בסוכר תורם לבעיות בריאות רבות: עששת וחורים בשיניים, **סוכרת** (רמה גבוהה של סוכר בדם), **השמנה** ובעיות לב. רבים משתמשים בתחליפי סוכר מלאכותיים כדי לצמצם את צריכת הסוכר שלהם; אבל ממתקים רבים כאלה מסוכנים לבריאות. לכן ממשיכים המדענים לחפש ממתקים חדשים ובטוחים. ייתכן שחלבונים מתוקים יענו על הצורך הזה: לא רק שאינם מסוכנים אלא שהמתיקות שלהם גם עולה בהרבה על זו של סוכר רגיל, כך שכדי להמתיק אוכל מספיקה כמות זעירה של חלבון כזה. אנחנו מקווים שבעתיד תעזרו לנו אתם לגלות מולקולות חדשות שיתרמו לצמצום צריכת הסוכר והסיכונים הכרוכים בה.

## תודות

אנחנו מודים ל-Annalisa Pastore (קינגס קולג', לונדון) ול-Lucia Leoni (תיכון א. אמאלדי) על הצעותיהן הרבות והמועילות מאוד.

## מקורות

1. Temussi, P. A. 2009. Sweet, bitter and umami receptors: a complex relationship. *Trends Biochem. Sci.* 34(6):296–302. doi: 10.1016/j.tibs.2009.02.005
2. Cagan, R. H. 1973. Chemostimulatory protein: a new type of taste stimulus. *Science* 181(4094):32–5. doi: 10.1126/science.181.4094.32

פורסם אונליין: 31 בינואר 2019

נערך על ידי: Fulvio D'Acquisto, Queen Mary University of London, United Kingdom

### סוכרת

#### (Diabetes)

מחלה העלולה לגרום למצב רפואי קבוע שבו רמות הסוכר של החולה נעשות גבוהות מדי. ללא טיפול מתאים, היא עלולה לגרום לסימפטומים חמורים.

### השמנה

#### (Obesity)

מצב שבו קיימים אצל אדם עודפי שומן גבוהים ושרירים מעטים יחסית.

**ציטוט:** Motti EA and Temussi PA (2019) מתוק כמו... חלבון? הרפתקאות בעולם המתקנות. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2017.00044-he

#### תורגם והותאם:

Motti EA and Temussi PA (2017) Treats and Tricks: The Magic World of Sweetness. Front. Young Minds 5:44. doi: 10.3389/frym.2017.00044

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

**COPYRIGHT** © Motti and Temussi 2017. 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

### BRIAN, גיל: 10

שמי בריאן ואני בכיתה ד'. אני בן 10. אני אוהב כלבים, לשחק 2K17, פיפא 17, Battlefront, NHL16 ובייסבול 17 RBI באקס-בוקס שלי. אני אוהב ספורט ומתמטיקה. אני גם אוהב נעלי כדורסל של נייק ושל ג'ורדן. אני משחק כדורגל, כדורסל ובייסבול, ומנגן בצ'לו, בתופים ובפסנתר. אני אוהב ספרים על ספורט, וקומיקס.

### ELSA, גיל: 10

שמי אלזה, אני בת 10, ואני מתעניינת בשפות, היסטוריה טודורית וימי-ביניים, דת, גנטיקה, איי סבאלבארד, גרינלנד, וכתובה. בין הספרים האהובים עליי: "כל האור שאיננו רואים" מאת אנתוני דואר, "החיים חלקי 7" מאת הולי גולדברג סלואן, The Girl Who Drank The Moon מאת Kelly Barnhill, ו"איפה את, ברנדט" מאת מריה סמפל. החלטתי להתחיל לסקור מאמרים כשהחברים שלי יונסה ובריאן הציעו לי לקחת חלק בתהליך ביקורת העמיתים. הסכמתי מפני שלדעתי מדע יכול להיות מרתק, ונשמע לי מעניין להיות חלק מתהליך ההכנה לפרסום של מאמר מדעי.

### YOONSA, גיל: 10

שמי יונסה. אני בכיתה ד' ואני בת תשע. אני גרה עם ההורים שלי ועם אחי הקטן. שני ההורים שלי הם ביולוגים. בבית שלנו יש הרבה דגים. אנחנו מגדלים דגיני נקאי (פלוקסטומוס) שבקעו מביצים שגיליתי. רציתי לקרוא עוד על מדע, ולכן רציתי להצטרף לכתב העת. Frontiers for Young Minds בשעות הפנאי אני אוהבת לקרוא ולנגן בכינור.

## הכותבים

### ELEONORA ASIA MOTTI

אסיה היא תלמידה בשכבה הבוגרת של LiceoScientifico E. Amaldi, תיכון המיועד לתלמידים אשר מעוניינים ללמוד בהמשך מדעים באוניברסיטה. זהו תיכון איטלקי הממוקם בברצלונה שבספרד, ובו משולבת תכנית הלימודים הרגילה עם שפות זרות (קטלאנית, ספרדית ואנגלית). אסיה נולדה בנאפולי שבאיטליה. כבר בחטיבת הביניים פיתחה עניין רב בבעיות מדעיות, בייחוד בתחום החושים ויחסי הגומלין המורכבים



של בני האדם עם סביבתם. סקרנותה התעוררה בעקבות הרצאה על חוש הטעם ששמעה בכיתה ט'. המאמר שלפניכם נכתב בעקבות ביקורה באוניברסיטת נאפולי, שבו הייתה לה הזדמנות לדון עם פרופ' טמוסי, השותף לכתיבת מאמר זה, בכמה סוגיות מסקרנות הקשורות לטעם, ובייחוד לטעם המתוק. אסיה ציינה שרוב התלמידים ששמעו את ההרצאה בבית ספרה הופתעו מהתוכן, ובעקבות זאת החליטו הכותבים להאיר את הצדדים המעניינים ביותר של נושא הטעם. אסיה הציעה להתמקד בטעם המתוק, בעיקר מפני שהוא אהוב במיוחד על ילדים ובני נוער. אחרי שהכינה את הטיוטה הראשונה נפגשו הכותבים שוב כדי להחליט אם להתמקד במולקולות מתוקות קטנות או בנושא האקזוטי יותר של חלבונים מתוקים. אסיה צידדה חד-משמעית בכתיבה על חלבונים מתוקים. היא דנה בטיטה עם חבריה ללימודים בכל שלב בהכנת המאמר. התרומה שלה למאמר נגעה לא רק להחלטות מבניות אסטרטגיות אלא גם לעצם הכתיבה ועיצוב כל האיורים.

### PIERO A. TEMUSSI

במקור למדתי כימיה אורגנית, אבל במהלך השנים התחלתי להתעניין יותר ויותר בסוגיות של מדעי החיים, בייחוד אלה הקשורות לפפטידים פעילים ביולוגית – למשל אנקפלין, משכך הכאבים הטבעי שגופנו מייצר. קצת אחרי שהתגלה הממתיק אספרטיים נתן לי יזיד, כימאי פפטידים מעולה, דוגמה של אספרטיים, כדי שאוכל לחקור את המבנה שלו. מאותו רגע התמכרתי לעיסוק בשאלה מדוע חומרים מתוקים הם מתוקים.

\*temussi@unina.it



Hebrew version  
provided by

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

