

על תאי עצב, מערכת לוגית ובינה מלאכותית

Shimon Marom*

הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

עם התפתחות תחום הבינה המלאכותית והשפעתה על חיינו בפרט בעשור האחרון, היה המונח **רשת עצבית מלאכותית** נפוץ במיוחד. מהו הקשר בין אופן פעולת תא עצב ביולוגי, היחידה הבסיסית ברשתות העצבים שבמוחנו, ובין בינה מלאכותית המיושמת בתוכנה או בחומרה? באיזה מובן דומה פעולת הרשת העצבית המלאכותית לפעולתן של קבוצות תאי עצב במוחנו? נפתח את המאמר בהערה על האופן שבו אנו חושבים על מחשבה, נמשיך בתיאור קצר של פעולת תא עצב טיפוסי, נצביע על הדמיון בינו ובין היחידה הבסיסית של מערכת לוגית ונראה שחיבור כמה יחידות כאלה מקנה יכולת לחשב דברים. נסכם בהקבלה בין בינתה של רשת עצבית מלאכותית ובין פעולת מערכת העצבים הפיזיולוגית, ונציין את האתגרים המונחים לפתחנו בעת הזו.

תורת הסמיכות

משחר התרבות בני אנוש עוסקים בחקירת האופנים שבהם אנו חושבים, לומדים, מזהים, יוצרים קשרים בין חישה ותנועה, מקבלים החלטות ושאר נפלאות התבונה. ההנחה הרווחת היא כי יכולתנו התבונית נובעת מרשת של מושגי יסוד המתחברים ומתנתקים בצירופים שונים ובדרגות חוזק שמשנות תוך התנסות. שמה של גישה זו הוא **תורת הסמיכות**. דמיינו רשת

סוקרים צעירים

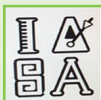
AVIV

גיל: 15



ISRAEL ARTS
AND SCIENCE
ACADEMY

גיל: 14-15



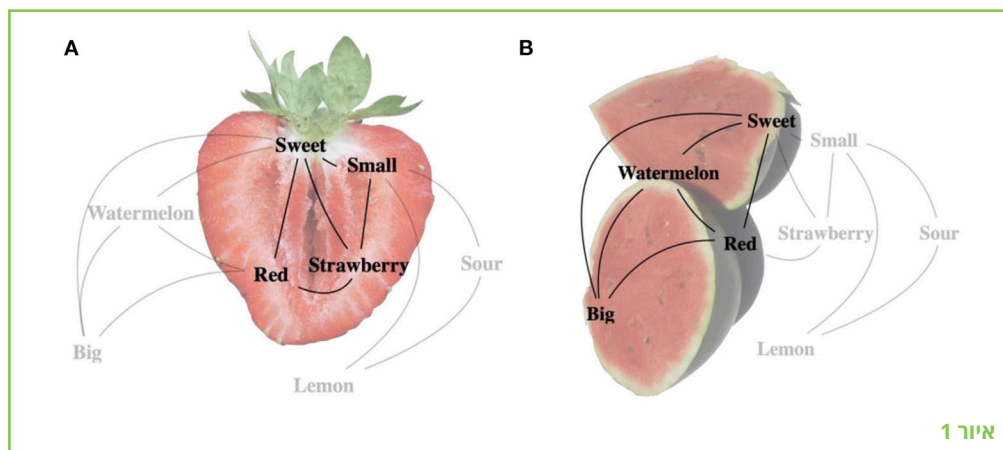
תורת הסמיכות

(Associationism)

גישה שלפיה יכולתנו התבונית נובעת מקשרים בין מושגי יסוד המתחברים ומתנתקים בצירופים שונים ובדרגות חוזק שמשנות תוך התנסות. לדוגמה: המושג "אדום" סמוך למושג "תות", קרוב אליו יותר מאשר המושג "כחול".

איור 1

תהליך החשיבה כרשת של מושגי יסוד המתחברים ומתנתקים בצירופים שונים ובדרגות חוזק שמשנות תוך התנסות. (A) הקווים השחורים מחברים מושגי יסוד שפעילותם יחד מייצגת את המושג "תות". הקווים האפורים מסמנים קשרים חלשים למושגי יסוד שאינם "שייכים" למושג "תות". (לדוגמה, "גדול" או "חמוץ"). (B) הקווים השחורים מחברים מושגי יסוד שפעילותם יחד מייצגת את המושג "אבטיח". הקווים האפורים מסמנים קשרים חלשים למושגי יסוד שאינם "שייכים" למושג "אבטיח" או "קטן" או "חמוץ". (Renee Comet, Public domain, via Wikimedia Commons)



איור 1

של מושגים, לדוגמה: פרי, חמוץ, מתוק ועוד (איור 1). כשעולה בדעתנו המושג *תות*, צפים ועולים עימו מושגים סמוכים, למשל: *אדום*, *קטן*, *מתוק*. לעומת זאת המושגים *לימון*, *גדול* או *אבטיח* אינם נוטים לצוף ולעלות בהכרתנו כשאנו חושבים על *תות*. על פי תורת הסמיכות, דעתנו נודדת – אם בשל מראָה, צליל, ריח או מגע, או בצורה חופשית כמו בחלום – בתוך ובין רשתות של מושגים המחוברים זה לזה בעוצמות שונות. עוצמת הקשר בין מושגים אינה מולדת אלא נרכשת תוך התנסות: ככל שנחווה פעמים רבות יותר טעם *מתוק* שמתלווה אליו מראה של פרי שהוא *אדום*, כך יתחזק הקשר בין שלושת המושגים האלה. אמונה זו ביצירת סמיכות בין מושגי יסוד שהופיעו בו בזמן, שולטת בשיח הפסיכולוגי ובחֶקֶר המוח קרוב ל-150 שנה, וקשורה לעמדה הפילוסופית הגורסת שהאדם אינו אלא סך התנסויותיו.

אסכולת העצב והדחף העצבי

תורת הסמיכות, אשר מנוסחת בשפת הפילוסופים והפסיכולוגים, מאתגרת את חוקרי המוח והפיזיולוגים שעניינם חֶקֶר המערכות והתהליכים בגופו של אדם. חוקרי המוח תוהים מהו החומר או התהליך הביולוגי שממנו עשוי מושג? המסע אל עֵבֶר תשובה לשאלה זו החל בפרסומן של כמה עבודות בסביבות 1835, עת פיתוח שיטות לסימון תאים אפשר בחינה מיקרוסקופית איכותית שהעידה כי המוח בנוי מיחידות בסיסיות (תאי עצב), המחוברות זו לזו באמצעות סיבים עדינים [1]. התגליות הללו הובילו ברבות הימים לניסוח **אסכולת העצב** – המקבילה הפיזיולוגית לתורת הסמיכות. נוח לחשוב על אסכולת העצב בצורה פשטנית: מושג (למשל, *אדום* או *קטן* או *מתוק*) מיוצג במוחנו על ידי הפעלת תא עצב כלשהו או כמה תאים כאלה. סמיכות בין מושגים נוצרת בזכות סיבים המקשרים בין תאי עצב ויוצרים קבוצת פעילות עצבית המופעלת כשאנו חושבים על מושג מורכב או רואים אותו לנגד עינינו (למשל *תות* או *אבטיח*, ראו איור 1). מהי המשמעות של הפעלת תא עצב? מהו הדבר שקורה בתא עצב שמסמן *אדום* כשהמושג הזה עולה בדעתנו?

מענה על שאלות אלה סיפקה סדרת עבודות שהתפרסמה בשנת 1926 בהובלתו של אדגר אדריאן מאוניברסיטת קיימברידג' שבאנגליה (שותפו למחקר היה אינגוואו זוטמן). אדריאן, לימים חתן פרס נובל לפיזיולוגיה ורפואה, יישם אלקטרוניקה מתקדמת לשעתו שאפשרה זיהוי ואפיון חד-משמעי של האות העצבי – הדבר שקורה כשתא עצב פועל [2]. מדובר בשינוי זעיר

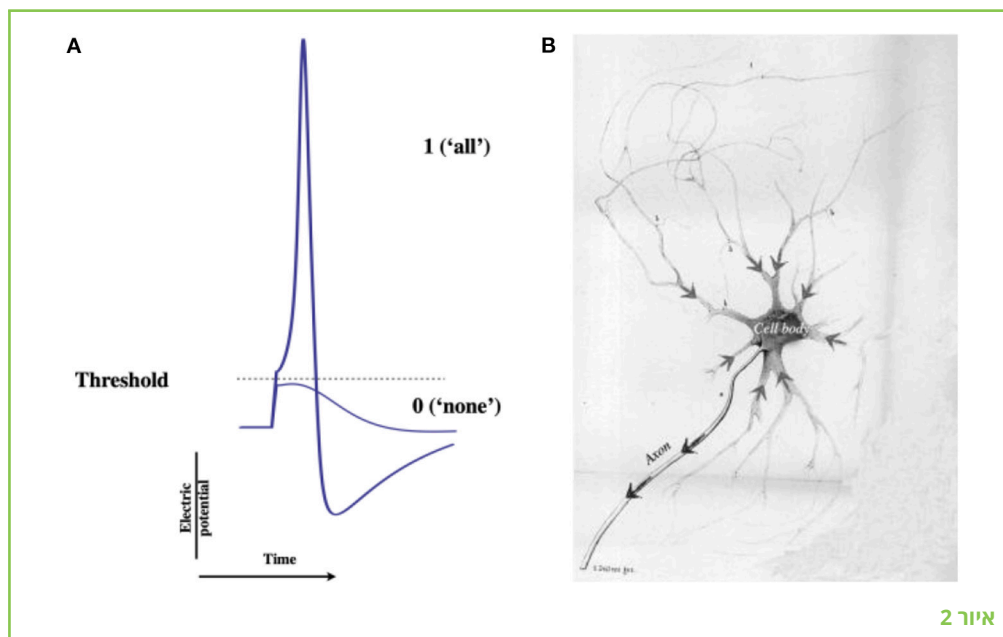
אסכולת העצב

(Neuron Doctrine)

כל רעיון, מושג או תנועה שלנו מיוצגים במוחנו בהפעלת תא עצב כלשהו, או כמה תאים כאלה. סיבים עדינים שנקראים אַקסונים מחברים בין תאי עצב המייצגים מושגי יסוד שסמוכים זה לזה.

איור 2

דחף עצבי ותא עצב. (A) **בחלק השמאלי** של האיור מודגמת צורתו של הדחף העצבי. כשגירויו עובר סף, נוצר דחף עצבי שצורתו ועוצמתו קבועים ('הכול', 1). אם הגירויו אינו עובר סף, לא ייווצר דחף עצבי ('כלום', 0). (B) **בחלק הימני** של האיור מופיע ציור של תא עצב (Karl Deiters, 1834-1863; נוספו חיציים ומלל באנגלית). הגירוים נקלטים ונאספים אל עבר גוף התא, שם, אם סכומם עובר את ערך הסף, נוצר הדחף העצבי שמועבר לתאים הבאים באמצעות האַקסון שמשמש סיב מוצָא ומתחבר לתאים אחרים.



איור 2

במתח חשמלי בין שני צידי הקרום המפריד את תוך התא מהסביבה החוץ־תאית. נסביר ביתר פירוט: הנוזל המצוי בתוך תאי עצב, כמו בכל תאי הגוף האחרים, עשיר באשלגן (K) – מינרל נפוץ, יון הנושא מטען חשמלי חיובי. הנוזל המצוי מחוץ לתאים דומה בהרכבו למי־ים ועשיר בנתרן (Na) – מינרל מסוג אחר, אף הוא יון הנושא מטען חשמלי חיובי. ההבדל בין הרכב התמיסות מוביל להפרש של פוטנציאל חשמלי בין תוך התא וחוף התא, ממש כמו הפרש בין שני קטבים של סוללה חשמלית. מדובר בהפרש קטן יחסית לסוללה רגילה, כעשירית הוולט. אדריאן זוטמן גילו במדידותיהם כי פעילות תא העצב אינה אלא שינוי רגעי קצרצר (אלפית השנייה), בפוטנציאל התוך־תאי. התופעה כונתה **דחף עצבי** (איור 2) וכיום אנו יודעים ששינוי רגעי זה נובע מזרימה של יוני נתרן ואשלגן דרך קרום התא. חוקרים אלה הראו כי צורתו של הדחף העצבי קבועה למדי. אם התא מקבל גירויו שעוצמתו מתחת לסף, לא נוצר דחף עצבי; אם התא מקבל גירויו שעוצמתו גבוהה מהסף אז, ורק אז, נוצר דחף עצבי. במילים אחרות, או שהדחף מתקיים או שלא: 'הכול־או־לא־כלום', בדומה למפסק דו־מצבי של הפעלת אור בחדר. אפשר לחשוב על כך במונחים מספריים: 1 ('הכול') או 0 ('לא כלום'). עוצמת הגירויו מתבטאת בהסתברות הופעת הדחפים העצביים ובקצב הופעתם, ולא בצורה של כל אחד ואחד מהם. הפעילות החשמלית במוחנו נובעת מהופעת הדחפים העצביים בתאי עצב רבים בו בזמן, והיא מאפשרת לנו להרגיש, לחשוב, לנוע ועוד. גילוי הדחף העצבי פתח חזית מחקר פורה ומפרה עד ימינו, שעניינה חשיפת המנגנונים הפיסיקליים והכימיים אשר עומדים בבסיס התופעה, חזית שהובילה לכתיבת אחד הפרקים המוצלחים בפיזיולוגיה של התא.

מצב הדברים בסוף שנות העשרים של המאה הקודמת היה כזה: מהפילוסופים למדנו שתהליך החשיבה ניתן לתיאור כרשת של "מושגי יסוד" המחוברים בצירופים שונים ובדרגות חוזק שיכולות להשתנות תוך התנסות. הפיזיולוגים הציעו שהמוח בנוי מרשת עֶגְפָּה של יחידות יסוד, תאי עצב, שפעילות כל אחד מהם דומה למפסק בינארי, כלומר הוא יכול להימצא אך ורק באחד משני מצבים: 0 (לא פעיל) או 1 (פעיל), 'הכול־או־לא־כלום'. קבוצות של תאי עצב פעילים מייצגות מושגים שונים. נותרה בעינה השאלה איך רשת של יחידות בינאריות יכולה לזהות מושגים שונים, לסווג אותם, לקבל החלטה, ללמוד וכיוצא באלו התנהגויות תבוניות?

בינה מלאכותית (Artificial Intelligence)

התנהגות של מחשב, או כל מכונה אחרת, המשקפת תבונה שבדרך כלל מיוחסת לאדם. לדוגמה, מחשב שיועד לשחק שחמט, להשלים משפט, או לסכם מאמר.

החיפוש אחר תשובה מקיפה לשאלה זו הצמיח תחום שמעסיק את הקהילה המדעית עד ימינו, ובתוכו ענף הבינה המלאכותית אשר מידת השפעתה על חיי היומיום שלנו רבה ומשמעותית. טכנולוגיות **בינה מלאכותית** משרתות את האדם ברפואה, מדע והנדסה, מזיהוי נתונים רפואיים ומדעיים וסיווגם, עבור בראיית מחשב, ועד בקרה של מכונות מורכבות כמו כלי רכב ללא נהג. את הזרע שממנו צמח ענף זה טמנו שניים מאוניברסיטת שיקגו שבארצות הברית – וורן מק'קולוך (רופא, פסיכולוג ונוירופיזיולוג) ווולטר (לוגיקן אוטוידקט). במאמר נודע פרי עטם שפורסם בשנת 1943, הוצע קיומו של קשר אפשרי בין שני תחומים שונים – לוגיקה מתמטית ונוירופיזיולוגיה – מערכת לוגית מזה ויחסים שבין פעילויות תאי עצב מזה [3]. נסביר כעת את הקשר המיוחד בין שני התחומים.

מערכות לוגיות ובינה מלאכותית

חלק משמעותי מתהליך החשיבה של בן אנוש ניתן לתיאור כשרשרת בדיקת הנכונות של היגדים. כל היגד נבחן בצורה בינארית: אמת או כזב, 'כן' או 'לא'. נדגים זאת בתהליך החשיבה שמפעילה רופאה כשמתייבב במרפאתה אדם מבוגר שמתלונן על כאבים בחזהו. כדי לאבחן אוטם בשריר הלב (נזק בעקבות חסימת זרימת דם אל האיבר) צריך שלפחות שניים משלושה היגדים יהיו תקפים: [א] כאבים בחזה – כן או לא? [ב] שינוי במדידה חשמלית של פעילות הלב – כן או לא? ו-[ג] שינוי בכמות חלבון כלשהו בדמו של הנבדק – כן או לא? לכן, לדוגמה, אין די בכך שאדם מתלונן על כאבים בחזהו (כלומר התשובה להיגד [א] היא 'כן'). כדי לאבחן אוטם בשריר הלב; הרופאה תקבע שהנבדק סובל מכך רק אם, מלבד כאב החזה, התשובה להיגדים [ב] ו/או [ג] היא 'כן'. הרופאה, אם כך, מבצעת פעולת חישוב: 'אם [א] וגם [ב] מתקיימים, או [א] וגם [ג] מתקיימים, או [א] וגם [ב] וגם [ג] מתקיימים, אז יש אוטם בשריר הלב.'

מק'קולוך ופיטס הראו שתחת הנחות סבירות, רשת של תאי עצב יכולה לחשב את אמיתותו של כל **ביטוי לוגי**: שרשרת של פעולות כגון "אם-אז", "וגם", "או", "אך לא". נקודת המוצא שלהם הייתה השיעור שלימדו אותנו הפיזיולוגים אדריאן זוטרמן, שעל פיו תא העצב נמצא באחד משני מצבים: 0 (לא פעיל) או 1 (פעיל), 'הכול-או-לא-כלום'. איור 3 מתאר רשת בת ארבעה יתאי עצב שיכולה לאבחן אוטם בשריר הלב. הרשת מסודרת בשתי שכבות. בראשונה (ישכבת הקלט, משמאל) שלושה תאים שפעילותם מסמלת את שלושת הסימנים לאירוע אוטם לבבי. תא מייצג כאבים בחזה, תא מייצג שינויים בהולכה חשמלית של הלב ותא מייצג שינוי בריכוז חלבונים בדם. בשכבה השנייה (ישכבת הפלט, מימין), המקבלת קלט משלושת התאים של השכבה הראשונה, יש תא אחד בלבד; הוא זה שפעילותו מסמלת כי מולאו התנאים לאבחנה של אוטם בשריר הלב.

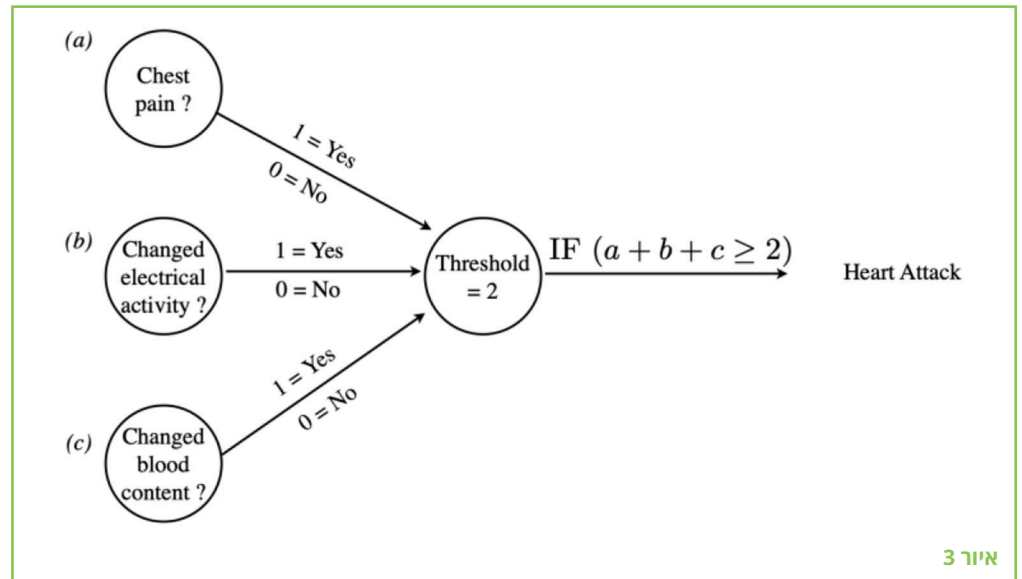
הניתוח של וורן מק'קולוך ווולטר פיטס הובילם אותם למסקנה שמשמעות הרשת, הדבר שהיא יכולה לחשב, נקבעת על פי אופי הקשרים בין השכבות ועוצמתם, ולפי ערך הסף להפעלת תא העצב. זאת ועוד, חוקרים אלה הראו שתחת הנחות מסוימות, כל ביטוי לוגי ניתן לתיאור במונחים של רשת עצבית. מהמצע האינטלקטואלי שהם הניחו התפתחה בינה מלאכותית שפועלת לצידו של האדם כמעט בכל תחומי החיים, בינה המבוססת על פעילות רשתות שבהן אלפי יתאים' והרבה מאוד 'שכבות'.

ביטוי לוגי (Logical expression)

שרשרת פעולות כגון "אם-אז", "וגם", "או", "אך לא", אשר מבוצעות על קלט; תוצאתן "אמת" (1) או "כזב" (0).

איור 3

רשת עצבית מלאכותית שיכולה לקבוע אבחנה של אוטם בשריר הלב. אם לפחות שניים מתוך שלושת התנאים (a, b, c) בשכבת הקלט שמשמאל מתקיימים, אז סכום פעולתם ($1 + 1 = 2$) מספיק כדי לייצר דחף עצבי בשכבת הפלט (התא הבודד שמימין), ובכך לסמל אבחנה.



חשוב לציין כי חלה התקדמות של ממש בפיתוח כלים שבאמצעותם אפשר "ללמד" את הרשת – תוך התנסות – לזהות עצמים בשכבת הקלט ולסווגם, ולקבל החלטה "נכונה" או "מותאמת" בשכבת הפלט. הלמידה מתבצעת על ידי שינוי בעוצמת הקשר בין תאים או שינוי בערך הסף. לדוגמה, אם ברשת המתוארת באיור 3 ערך הסף בתא השכבה השנייה יהיה 2.5 (במקום 2), אז הרשת תאבחן אוטם בשריר הלב אם-ורק-אם [א] וגם [ב] וגם [ג] מתקיימים; כלומר: גם כאבים בחזה, גם שינויים בהולכה חשמלית של הלב וגם שינויים בריכוז חלבונים בדם.

עם הפנים לעתיד

אתגרים רבים נותרו בפני חוקרים המתעניינים בהקבלה בין פעילות מערכת העצבים הפיזיולוגית ובין בינה מלאכותית – תוכנה וחומרה הבנויות מתאי עצב מלאכותיים בעלי שני מצבים ('0' ו-'1'); חלק מהאתגרים נובעים מהפער שבין ייצוג מופשט של תא עצב 'מתמטי' וזה של תא עצב פיזיולוגי, 'אמיתי'. אך האתגר הגדול מכולם ממשיך לנקר במוחנו – זהו אדם? האם אנו, על מחשבותינו ותשוקותינו, איננו אלא אוסף של מרכיבים חשמליים/ כימיים במוחנו?

את התשובה לשאלה זו לא נוכל ככל הנראה לקבל מבינה מלאכותית; ניאליץ להמשיך לחשוב עליה בעצמנו.

תודות

תודה לעידו מרום על שיחות והערות במהלך הכנת המאמר.

מקורות

1. Chvátal, A. 2015. Discovering the structure of nerve tissue Part 2: Gabriel Valentin, Robert Remak, and Jan Evangelista Purkyně. *J. Hist. Neurosci.* 24:326–51. doi: 10.1080/0964704X.2014.977677
2. Adrian, E. D., and Zotterman, Y. 1926. The impulses produced by sensory nerve endings: part 3. impulses set up by touch and pressure. *J. Physiol.* 61:465–83.
3. McCulloch, W. S., and Pitts, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.* 5:115–33.

פורסם אונליין: 10 ביוני 2022

נערך על ידי: Idan Segev

מנחה מדעי: Idan Segev

ציטוט: Marom S (2022) על תאי עצב, מערכת לוגית ובינה מלאכותית. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.767989-he

תורגם והותאם: Marom S (2022) How Are Nerve Cells And Artificial Intelligence Similar? *Front. Young Minds* 10:767989. doi: 10.3389/frym.2022.767989

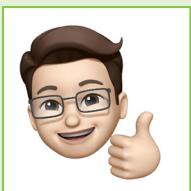
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2022 © Marom 2022. 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

AVIV, גיל: 15

אני אביב, אוהב לעשות הרבה דברים: לנגן בפסנתר – נסעתי לתחרויות בינלאומיות, ולהשתתף בדיבייט – דיבור מול קהל על נושאים מגוונים. כמו כן אני אוהב לשחק כדורסל, לטייל ולשחק פינג פונג.



ISRAEL ARTS AND SCIENCE ACADEMY, גיל: 14-15

התיכון הישראלי למדעים ולאומנויות הוא מקום לתלמידים סקרנים שאוהבים ללמוד. בכיתה ט', במסגרת שיעורי הבחירה, אנו 15 תלמידות ותלמידים אשר קוראים מאמרים מדעיים שבחרנו בהם. את הקורס הובילה ענת מעוז, מנהלת חטיבת הביניים שלנו, ובעלת תואר שני בביולוגיה ימית.

הכותב

**SHIMON MAROM**

אני פרופסור בטכניון, המוסד שבו רכשתי את השכלתי האקדמית כחוקר וכרופא. תחום המחקר שלי הוא מנגנונים פיזיקליים של תופעות חשמליות בגוף החי בכלל, ובמערכות עצביות בפרט.
*marom@technion.ac.il

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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK