



הבנת נפלאות המוח באמצעות ממשק ישיר בין מוח האדם למחשב

Eilon Vaadia *

ELSC (אלסק): מרכז אדמונד ולילי ספרא למדעי המוח, האוניברסיטה העברית בירושלים, ירושלים, ישראל

סוקרים צעירים

TOBY

גיל: 13



הייתם רוצים לשחק במשחק הווידאו האהוב עליכם באמצעות המחשבה בלבד? אולי זה נשמע כמו מדע בדיוני, אבל יש טכנולוגיה מדהימה שהופכת בימים אלו את האפשרות הזאת למציאות – ממשק מוח-מחשב (BCI). ממשק מוח-מחשב יוצר חיבור ישיר בין פעילות המוח לבין התנהגות. כך למשל, ה-BCI מאפשר לחבר בין מוח של אדם משותק לזרוע רובוטית: המוח מחשב את רצון האדם ע"י אותות חשמליים. האותות נשלחים למחשב שמפענח אותם ומפעיל זרוע תותבת ("זרוע רובוטית") שמבצעת את מה שתכנן האדם במוחו. הצטרפו אלינו למסע אל עולם שבו המוח והמכונה נפגשים, והגבול היחיד הוא הדמיון!

תא עצב (Neuron)

בלועזית: נוירון. תא שמעביר מידע במערכת העצבים באמצעות אותות חשמליים וכימיים.

סינפסה (Synapses)

מבנה בין שני תאי-עצב שבו התקשרות מתרחשת באמצעות העברת אותות כימיים או חשמליים.

איור 1

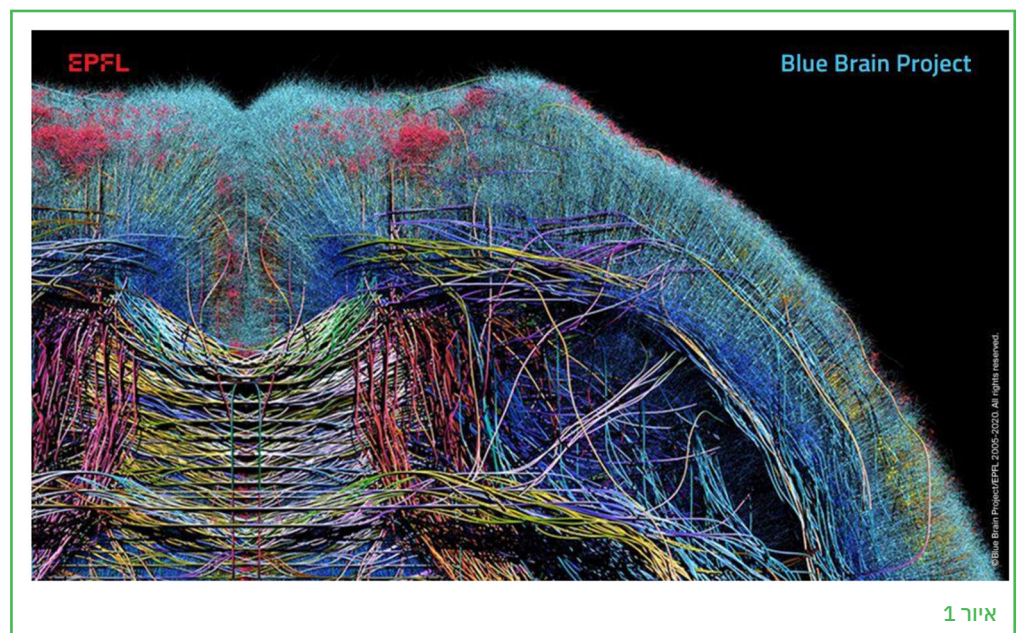
רשתות תאי-עצב. דמויות של רשת תאי-עצב אמיתית במוח של עכבר. הדפוסים האדומים-כחולים שמאורגנים בטורים הם תאי העצב של המוח (נוירונים), והקווים הצבעוניים הם "הקבלים" (סיבים).

תפיסה חושית (Perception)

תהליך שבו המוח מפרש המידע החושי, מעבד את ההקשר בין פעולה לתחושה, ומכאן עד יצירת הבנה וייצוג של הקשר בין המוח והסביבה.

הרשתות העצביות במוח

המוח הוא האיבר המשוכלל ביותר בגוף שלנו. במהלך האבולוציה הוא התפתח כך שיוכל לערוך חישובים מורכבים, שבזכותם מתאפשרות כל דרכי ההתנהגות שלנו. בעידן החדש של מדעי המוח גילינו שהוא בנוי מרשתות עצביות עצומות (איור 1), המורכבות ממיליארדי תאי-עצב. נסו לדמיין שאתם תא-עצב אחד קטן, שמסוגל לתקשר עם 10,000 תאי-עצב אחרים – כולם מדברים ומקשיבים זה לזה בו-זמנית. התאים מתקשרים באמצעות מבנים קטנטנים הקרויים סינפסות, וחוזק הקשרים בין תאים יכול להשתנות בתהליכי למידה. המדע עדיין לא פתר את התעלומה של איך בדיוק פועלות הרשתות האלה, אבל אנחנו יודעים שהתפקוד שלהן מבוסס על פעילות חשמלית מתואמת, כמו מחשב ביולוגי ענק.



אמנם המדע התקדם בצורה משמעותית בהבנת המוח, אך עדיין יש שאלות רבות ללא מענה. יש גם תהליכים פשוטים שאנחנו עדיין לא מבינים לגמרי, למשל איך אנחנו שולטים בתנועות שלנו כך שהן חלקות ומדויקות? נוסף על כך, הדרך המדהימה שבה המוח יוצר מחשבות, שפה ואמנות נותרה בגדר תעלומה. לצד המחקרים על ממשק מוח-מחשב, מתפתחת בימים אלה תיאוריה מסקרנת שמנסה להסביר את התופעות הללו. לפי התיאוריה, רשתות עצביות לומדות לחזות איך פעולות מסוימות (למשל: הזזת עין) משפיעות על תחושות (חיזוי השינוי של תמונת העולם כשהעין תזיז את המבט). יכולת זו היא שאחריה לייצר "תפיסה חושית". יכולת זו מאפשרת לנו גם לדמיין חוויות שמעולם לא חוונו. חשוב, לדוגמה, איך הייתם מרגישים אם יכולתם לעוף כמו ציפור. האם אי פעם חלמתם שאתם עפים? היכולת הזו לדמיין היא המקור לאמנות ולמדע.

איך המוח שולט בהנעת הזרועות

ממשק המוח-מחשב הראשון שנדון בו הוא "תותבת עצבית" – ממשק שקורא את פעילות הרשתות העצביות ומייצר תנועות בזרוע רובוטית. כדי להבין כיצד הממשק הזה פועל,

נבחן איך המוח שולט בתנועת הזרועות שלנו. נניח, לדוגמה, שאני רוצה לשתות שוקו טעים בארוחת הבוקר. איך המוח עוזר לי לבצע את הפעולה הזו? המשימה שלכאורה נראית פשוטה, דורשת סדרה של חישובים מורכבים, שמאפשרים קישורים בין פעולות לתחושות. כדי לשתות שוקו, המוח צריך להבין איך לבצע פעולות ולנבא איך הפעולות ישנו את התחושות. בדוגמה שלנו, המוח צריך להעריך את מרחק הכוס מהפה שלי, לבחור איך להפעיל שרירים כדי לייצר סדרת תנועות מתאימה: להביא את היד אל הכוס, להביאה לקרבת הפה, ולשתות את שוקו מבלי שישפך (וגם לבדוק (לחוש) שהשוקו טעים ולא מקולקל. מסובך למדי!

מיומנויות אלה נרכשות באמצעות תרגול מגיל צעיר. כדי לפתח קואורדינציה חישתית-תנועתית מדויקת צריך בהתחלה להשקיע מאמץ, אך עם הזמן המיומנות הזאת הופכת טבעית וקלה לביצוע. נדמה לנו שזו פעולה פשוטה כי תרגלנו אותה כל כך הרבה פעמים שהמוח שלנו הפך למיומן מאוד. באופן כללי, ההתקשרויות שלנו עם העולם שבחוץ – כמו הושטת יד, ראייה, כתיבה, ציור ודיבור – הן מיומנויות שעם הזמן הופכות למומחיות שלנו, גם כשהתנאים משתנים. זה מרגיש פשוט כי למדנו לעשות זאת לעיתים קרובות כל כך, עד שהמוח הפך ל"מומחה". באופן כללי, ההתקשרויות שלנו עם העולם החיצוני – כמו להושיט יד, לראות, לכתוב, לצייר ולדבר – כולן מיומנויות שבהן אנו מתמחים, מה שמאפשר לנו לבצע פעולות מורכבות בצורה חלקה. למשל, אנחנו מסוגלים להרים קרטון חלב מבלי לדעת מראש אם הוא מלא או חצי ריק. אנחנו גם יכולים לכתוב על דף נייר (תנועות קטנות ומדויקות, בעיקר של כף היד והאצבעות) ועל לוח גדול (תנועות רחבות בעיקר של הזרוע). נסו זאת בעצמכם – שימו לב שכתב היד שלכם נשאר דומה, למרות השינוי בגודל התנועה.

עקרונות ממשק מוח-מחשב (BCI)

ממשק מוח-מחשב ששולט בזרוע רובוטית

עכשיו חישבו לרגע על אדם משותק שאינו יכול להזיז את ידיו. המוח שלו עדיין "יודע" איך להרים את הכוס, אבל מה קורה עכשיו? אפילו שהמוח מכיר את הפעולה, הוא לא יכול לגרום לשרירים לנוע כי הקשר עם הזרועות מנותק. במילים אחרות, האדם לא יכול לתרגם את המחשבות למעשים!

אחת הדרכים לפתור את המגבלה המאתגרת הזאת היא לחבר את המוח למכשירים שיחליפו את השרירים. הרעיון של "אדם ביוני" הופיע לפני שנים רבות במדע הבדיוני (רובנו שמענו על "האיש השווה מיליונים"), אבל נדרשו עשרות שנים של מחקר כדי להפוך את הרעיון למציאות. כיום, בזכות ההתקדמות המדעית, פותחו ממשקי מוח-מחשב שיאפשרו גם יישומים קליניים למען אנשים עם מוגבלויות.

בקטעים הבאים נתאר כיצד התקדמנו מרעיונות של "מדע בדיוני" עד למכשירים אלה.

לפני כ-30 שנה, מדענים ומהנדסים הצליחו להבין את פעילות המוח ברמה שאפשרה לנו לפתח טכנולוגיית ממשק מוח-מחשב שבאמצעותה המוח יכול לתקשר עם זרוע תותבת (איור 2) [1–3]. באופן כללי, ממשקי מוח-מחשב משלבים גישות ומושגים מתחומי מדעי המחשב, נוירופיזיולוגיה, הנדסה ורפואה, כדי ליצור חיבור דו-כיווני בזמן אמת בין המוח לבין מכשירים (כמו זרועות רובוטיות, למשל). כבר בשנות ה-60 בוצעו ניסויים ראשוניים

איור 2

האיור מתאר רעיון לממשק מוח-מחשב: נבדק משותק רואה מטרה חזותית (כדור כחול).

מקבצי מיקרו-אלקטרודות המושתלים במוחו קולטים את אותות המגיעים מתאי-עצב רבים. המקבצים משדרים את האותות למחשב, שם רשת עצבית מלאכותית (המיוצגת על ידי ריבועים צבעוניים) ותאי-עצב מלאכותיים מפרשים את האותות העצביים כתנועה רצויה בתוך חלל תלת-ממדי. המחשב שולח את מסלול התנועה (הקו הכחול בגרף X-Y-Z) כפקודה לזרוע הרובוטית. לבסוף, התנועה האמיתית של הזרוע הרובוטית מועברת חזרה לנבדק כמשוב חושי, המשקף את תוצאות הפעולה שהנבדק התכוון לבצע. (האיור הוטאם מ-Nicolelis M.)

מקרא (מתחיל מהמלל עם החץ לכיוון המוח):

- מקבצי מיקרו-אלקטרודות מושתלים – עיבוד רב-ערוצי של אותות תאי-עצב: שבב ניורולוגי למקשור ואנליזה – שידור של פעילות עצבית באמצעות טלמטריה – חישוב של מסלול תנועה תלת-ממדי – מסלול תנועה תלת-ממדי של הזרוע – ממשק בזמן-אמת לשליטה בזרוע הרובוטית התותבת – משוב של חושי ומגע.

תותבת עצבית

(Neuronal prosthesis)

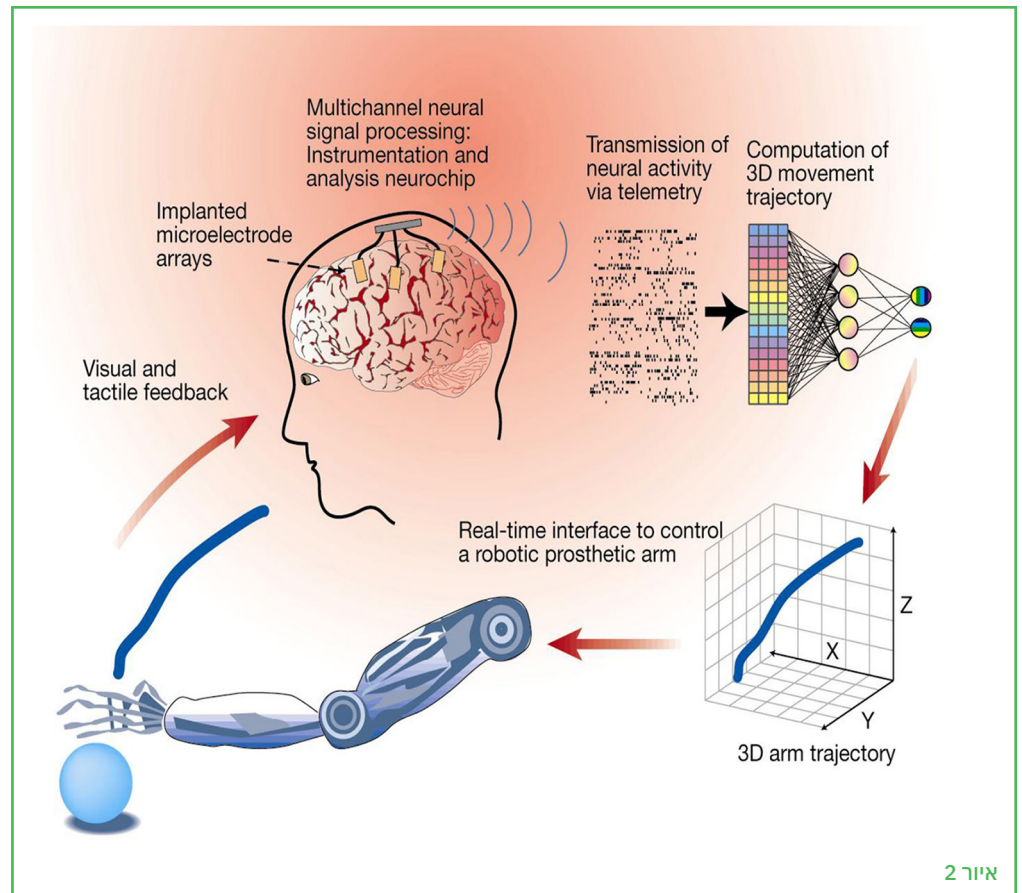
מכשיר שנועד לשחזר תפקוד על ידי החלפת מבנים עצביים פגומים במערכת העצבים, או תמיכה בהם. מכשירים אלה מתממשקים עם מערכת העצבים כדי להחליף או לסייע בהפעלה של תפקוד לקוי. במאמר זה, הכוונה למכשיר המשחזר יכולות תנועה שאבדו עקב פגיעה או מחלה.

גליום

(Embodiment)

ייחוס אופי אישי או מאפיינים אנושיים למשהו לא אנושי (לדוגמה, לזרוע תותבת).

להוכחת היתכנות, אך הפריצה האמיתית במחקר ממשק מוח-מחשב התרחשה רק בסוף שנות ה-90, כאשר נוצר קשר הדוק בין הגישה הזו לבין שיטות אלקטרו-פיזיולוגיות שאפשרו למדוד בו-זמנית פעילות חשמלית ממספר רב של תאי-עצב ברשתות העצבים המוחיות.



איור 2

בתותבת העצבית, המחשב מתרגם את הפעילות החשמלית ברשתות העצביות לתנועה של זרוע רובוטית. בעזרת ממשק מוח-מחשב מסוג זה, המדענים הראו [3] שבנבדקת משותקת יכולה לחשוב: "אני רוצה לאכול את חפיסת השוקולד שאני רואה מולי", והמחשב (שקולט את האותות מהמוח) שולח פקודות לזרוע תותבת רובוטית עם יד שתביא את חפיסת השוקולד לפה שלה (ראו כאן).

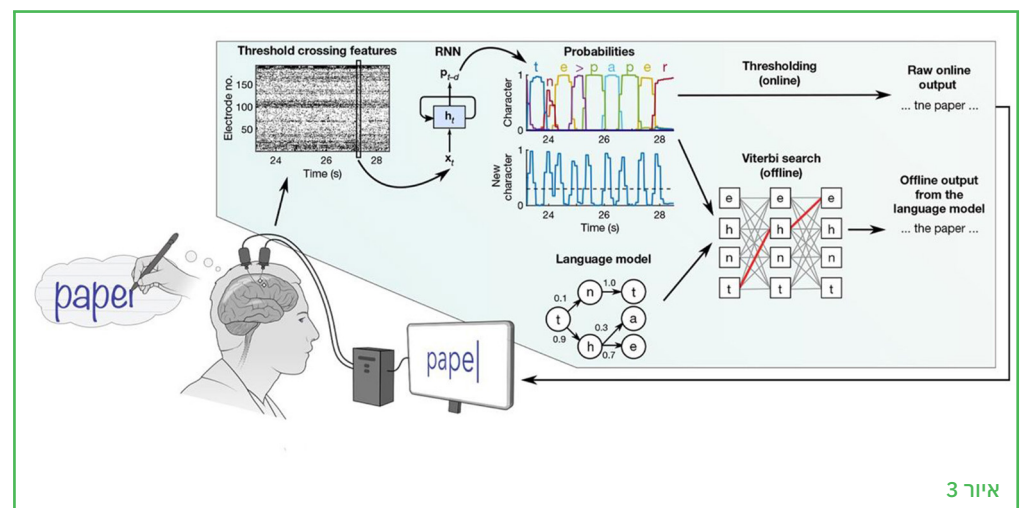
ההתקדמות המרגשת הזו של ממשק מוח-מחשב עזרה לנו גם להבין כיצד המוח מנהל התנהגות מורכבת, כולל יכולות תפיסה, מחשבות ודמיון, באמצעות פעילות של תאי-עצב. כולנו יודעים שהמוח לומד, אבל ההבנה שלנו בנושא עדיין מוגבלת. ממשקי מוח-מחשב הובילו לפיתוח מחקר למידה חדשני. כיום, אנחנו יודעים שניתן ליצור תוכנות מחשב שילמדו בהדרגה מהמוח. יש לנו גם ראיות משמעותיות לכך שהמוח לומד בהדרגה לאמץ את "המכשיר החדש", בכך שהוא מתאים את רשתות תאי-העצב שלו. אנחנו יכולים לראות זאת כהחליף מתמשך של למידה הדדית בין המוח לבין המכונה. תופעה זו עוררה דיון חדש אודות **גליום** – תופעה שבמסגרתה המוח לומד לאמץ מכונה כחלק מהגוף. דוגמה טובה לכך מגיעה מראיון עם אישה שמשתמשת בממשק מוח-מחשב כדי להזיז את הזרוע התותבת שלה. היא אמרה: "היה קשה להגיע לנקודה הזו, אבל עכשיו אני לא צריכה לחשוב על זה –

זה פשוט קורה אוטומטית!". רעיון דומה לתופעת הגלום עשוי לקרות בחלומות שבהם אתם מרגישים שאתם עפים ("הרגשתי שיש לי כנפיים").

ממשקי מוח-מחשב שמתרגמים מחשבות לכתיבה ולדיבור

בשנת 2021, ממשקי מוח-מחשב מסוג חדש תרגמו מחשבות לפעולות בדרכים חדשות ומופלאות [4]. הממשקים הללו קראו את פעילות תאי-העצב בזמן שהנבדקים חשבו על משפטים, והצליחו להציג את המשפטים על מסך, כך שהנבדקים ואנשים אחרים יוכלו לראותם (איור 3).

זוהי התקדמות מרגשת כי ממשקי מוח-מחשב כזה מאפשר למשוחזרים לתקשר את המחשבות שלהם עם הסביבה (ראו כאן). לאחרונה, אותם מדענים פיתחו ממשקי מוח-מחשב שאומר בקול רם את מה שהנבדקים חושבים במקום להציג זאת על מסך! קבוצת מדענים נוספת לקחה את הרעיון צעד קדימה והוסיפה לו אלמנט מעניין: על מסך המחשב הופיעה דמות וירטואלית [5] של אישה שמדברת את המשפטים שהמחשב זיהה (ראו כאן).



איור 3

סיכום

ממשקי מוח-מחשב (BCI) מביאים תקווה גדולה לפתרונות קליניים, במיוחד עבור אנשים משותקים. למרות ההתקדמות המשמעותית שהושגה ב-30 השנים האחרונות, יש עוד מקום לשיפור.

הפיתוח של **רשתות למידה עמוקה** (Deep Learning) חדשות מבוססות **בינה מלאכותית** (AI) תרם ויתרום רבות לפריצות דרך בתחום, וקצב ההתקדמות של הבינה מלאכותית ממשיך לעלות. היבטים חשובים נוספים הם פיתוח מכשירים שאינם מזיקים למוח, ודוגמים אלפי תאי-עצב במטרה לשפר את יכולת הפרשנות של פעילות המוח ולשמור על בריאות המטופלים למשך שנים רבות.

איור 3

ממשקי מוח-מחשב להפקת "דיבור מפעילות עצבית".

באיור רואים מערכי אלקטרודות שמושתלים במוחו של אדם. המידע שהאלקטרודות רושמות – אותות עצביים (דחפים עצביים, המסומנים כאן כ"חציות סף") שמתועדים במוח – מועבר למודלים חישוביים במחשב המפרשים את הפעילות: המחשב מבצע מספר שלבי חישוב ומפיק טקסט שמופיע על מסך המחשב. (האיור הותאם ממקור 4).

מקרא:

Threshold crossing •

features: שיטה המתרגמת פעילות חשמלית של תאי עצב לאותות חשמליים שמחשב יכול לקרוא

• **RNN:** קיצור לשם של רשת נוירונים מלאכותית (במחשב) שמחשבת את ההסתברויות (Probabilities) שמילים מסוימות מיוצגות במוח בכל רגע

Thresholding •

תהליך שבוחר מה המילה "הכי סבירה" מבין האפשרויות שרשת הנוירונים הציעה

Language model •

מודל שפה – שמסייע, בתום החישוב של ה-RNN, בחיפוש ובדיקה של רצף מילים שמתאים לחוקי השפה.

למידה עמוקה

(Deep learning)

סוג מערכת מחשב לומדת, שעוסק באימון של רשתות עצביות מלאכותיות בעלות מספר רב של שכבות (ולכן קרויה "עמוקה"). התוצרת של למידה עמוקה מכונה בד"כ "בינה מלאכותית".

בינה מלאכותית (Artificial intelligence)

תבונה הנוצרת ע"י תוכנות מחשב שיכולות לעשות דברים כמו ללמוד, להבין שפות, להכיר פרצופים, לפתור בעיות, לכתוב סיפורים, לצייר וליצור תפיסה חושית.

ממשקי מוח-מחשב כבר משנים חיים על ידי שיקום יכולות פגועות. ככל שהטכנולוגיה משתפרת, ממשקי מוח-מחשב עשויים גם לסייע לנו להבין פריצות דרך בהבנת המוח, וקידום שיטות חדשות לריפוי מפגעי מוח, האטת הזדקנות ושיפור איכות החיים של בני האדם.

הצהרת כלי בינה מלאכותית

טקסט חלופי הנלווה לאיורים במאמר זה נוצר על ידי פרונטירז בסיוע כלי בינה מלאכותית, ונעשו מאמצים על מנת להבטיח את דיוקו, כולל בדיקה על ידי כותבי המאמר כאשר הדבר התאפשר. אם ברצונכם לדווח על בעיה, אנו צרו איתנו קשר.

מקורות

1. Vaadia, E., and Birbaumer, N. 2009. Grand challenges of brain computer interfaces in the years to come. *Front. Neurosci.* 3:2009. doi: 10.3389/neuro.01.015.2009
2. Nicolelis, M. A. L. 2001. Actions from thoughts. *Nature* 409:403–7. doi: 10.1038/35053191
3. Collinger, J. N., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D.-J., et al. 2013. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *Lancet* 381:557–64. doi: 10.1016/S0140-6736(12)61816-9
4. Willett, F. R., Avansino, D. T., Hochberg, L. R., Henderson, J. M., and Shenoy, K. V. 2021. High-performance brain-to-text communication via handwriting. *Nature* 593:249–54. doi: 10.1038/s41586-021-03506-2
5. Metzger, S. L., Littlejohn, K. T., Silva, A. B., Moses, D. A., Seaton, M. P., Wang, R., et al. 2023. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature* 20:1037–46. doi: 10.1038/s41586-023-06443-4

פורסם אונליין: 22 בספטמבר 2025

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Tamara Reinhardt

ציטוט: Vaadia E (2025) הבנת נפלאות המוח באמצעות ממשק ישיר בין מוח האדם למחשב. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2025.1577785-he

תורגם והותאם מ: Vaadia E (2025) Exploring the Wonders of the Brain by Directly Connecting it to a Computer. *Front. Young Minds* 13:1577785. doi: 10.3389/frym.2025.1577785

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

זכויות יוצרים © 2025 Vaadia 2025. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

TOBY, גיל: 13

אני ילד בן 13 - במקור מאוסטרליה. אני אוהב ספורט, שחמט וטכנולוגיה.



הכותבים

EILON VAADIA

אילון ועדיה נולד בשנת 1945, והצטרף לאוניברסיטה העברית בשנת 1966. משנת 2009 עסק בהקמת מרכז אדמונד ולילי ספרא למדעי המוח (ELSC) באוניברסיטה העברית, ועמד בראשו עד שנת 2016. כיום הוא פרופסור אמריטוס, אב לשלוש בנות וסב לשבעה נכדים. המעבדה של ועדיה פיתחה וחקרה ממשקי מוח-מכונה (BMI) במטרה להבין כיצד המוח לומד, זוכר ושולט בהתנהגות. ההתקדמות האחרונה בממשקי מוח-מכונה תרמה להבנה חדשה של פעילות המוח במצבי בריאות וחולי, שסללה את הדרך לפתרונות קליניים חדשניים להפרעות נוירולוגיות. *eilon.vaadia@mail.huji.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



קרן משפחת
שעשוע
Shashua
Family Foundation