

חלון הצצה למוחכם: כיצד fMRI מסייעת לנו להבין מה קורה בתוך ראשנו

Udochukwu Amanamba*, Andrew Sojka*, Savion Harris*, Marisa Bucknam, Jay Hegdé

המחלקה למדעי המוח ורפואה רגנרטיבית, הקולג' הרפואי של ג'ורג'יה, אוניברסיטת אוגוסטה, אוגוסטה, ג'ורג'יה, ארצות הברית

סוקרים צעירים

ISABELLA

גיל: 13



ALINE

גיל: 13



LUCAS

גיל: 15



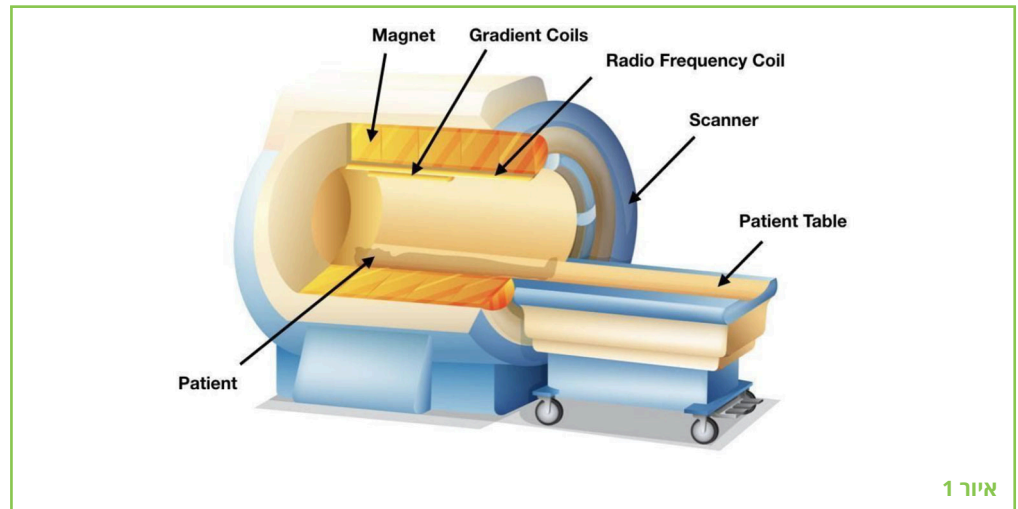
המוח – החזית האחרונה של המדע המודרני. חרף פיתוחים טכנולוגיים רבים, אנו עדיין יודעים מעט על האופן שבו המוח פועל. למרבה המזל, פיתוח שיטה שנקראת דימות תהודה מגנטית תפקודי (fMRI) מסייע לנו לשנות זאת בהדרגה. fMRI יכולה למדוד פעילות מוחית בלי לפתוח את הגולגולת או לחשוף את תאי המוח לקרינה מזיקה. באמצעות שימוש בתכונות המגנטיות של הדם, fMRI יכולה לאתר שינויים בזרימת הדם שקשורים לפעילות המוחית, מה שמאפשר למדענים ולרופאים לומר אלו אזורים במוח פעילים יותר מאחרים. כיום, חוקרים משתמשים ב-fMRI כדי לחקור היבטים שונים בפעילות מוחית בבריאות ובחולי. מדענים ממשיכים להרחיב את הגבולות של שיטת fMRI ולשלב אותה עם שיטות אחרות, כדי לפתח הבנה טובה עוד יותר של תפקוד המוח וחוסר תפקודו.

מהי fMRI וכיצד היא פועלת?

האם אי פעם הסתכלתם על מישהו ותהיתם, 'מה קורה בתוך הראש שלהם? זוהי שאלה מפורסמת שנשאלה על ידי הדמות ג'יי מסרט דיסני פיקסר בשם הקול בראש, והיא חידה

איור 1

רכיבים של סורק MRI [1].
 סריקות MRI ו-fMRI מתבצעות בתוך אותו סורק ה-MRI.



איור 1

שרופאים ומדענים מנסים לפתור באופן יומיומי, בסיועו של דימות מוחי. דימות מוחי מאפשר לרופאים ולמדענים להסתכל במבנים הפנימיים של המוח בלי לפתוח את הגולגולת. ישנן כמה שיטות לדימות מוחי. אחת מהן נקראת דימות תהודה מגנטית (MRI), והיא מתבוננת במבנה של המוח, ושיטה נוספת היא דימות תהודה מגנטית תפקודי (fMRI), שמסתכלת על תפקודו של המוח.

fMRI מודדת פעילות מוחית על ידי איתור שינויים בזרימת הדם אל המוח. fMRI היא תוצר של MRI. למעשה, שתייהן משמשות באותו המכשיר, שנקרא סורק תהודה מגנטית (איור 1). טכנולוגיית MRI משמשת ליצירת תמונות תלת-ממדיות מפורטות של המבנה הפנימי של אובייקט, באמצעות **שדות מגנטיים** וגלי רדיו [2]. ניתן להשתמש ב-MR כדי לחקור איברי גוף נוספים פרט למוח, ואפילו אובייקטים שאינם חיים. לדוגמה, MRI יכולה לשמש ארכיאולוגים לצילום תמונות של החלק הפנימי של מאובנים. fMRI יכולה לשמש גם לדימות איברי גוף שאינם המוח. ברפואה, MRI ו-fMRI של המוח מסייעות לזהות מחלות, לתכנן טיפולים ולחקור את הגורמים שמובילים למחלות וללקויות.

סורקי MR פועלים באמצעות צילום תמונות של המוח, שכבה אחת בכל פעם. לאחר מכן, התמונות נערמות כמו פנקהיים כדי ליצור תמונה שלמה של האזור שמצלמים. כיצד זה אפשרי, אתם שואלים? הגוף האנושי מורכב ממיליארדי מולקולות, כולל מולקולות מים, שניתן לאתרן באמצעות מכונת MRI. אטומים בכל המולקולות לרבות מולקולות מים (H₂O), מכילים פרוטונים [2]. פרוטונים הם כמו מגנטים זעירים [2]. בהיעדר שדה מגנטי חזק (כלומר, כשאנו מחוץ לסורק ה-MR), פרוטונים בגופנו מכוונים בכיוונים אקראיים (איור 2A). כשאנו שוכבים בתוך הסורק, השדה המגנטי החזק שלו, שהוא בדרך כלל חזק פי עשרות אלפים מהשדה המגנטי של כדור הארץ, מכריח את הפרוטונים האלה להסתדר בכיוון השדה, אף על פי שאיננו יכולים להרגיש זאת כלל (איור 2B). סליל הגרדיאנט (ראו gradient coil, איור 1) מסייע למפעילי הסורק לקבוע היכן בדיוק הגוף שלנו נמצא בתוך הסורק.

לאחר מכן, סלילי תדר הרדיו (RF) מעבירים גלים של **תדרי רדיו** דרך אזורים בגוף שעוברים דימות, כדי לסדר מחדש את הפרוטונים פעם נוספת, אולם באופן זמני (איור 2C). סלילי RF יכולים להיות חלק ממכשיר MRI עבור סריקת הגוף כולו, או להיחשב כקסדה מיוחדת

שדה מגנטי

(Magnetic Field)

שדה שמתרחש סביב מגנט, אשר מפעיל כוח שמושך אובייקטים מגנטיים אחרים, או דוחה אותם.

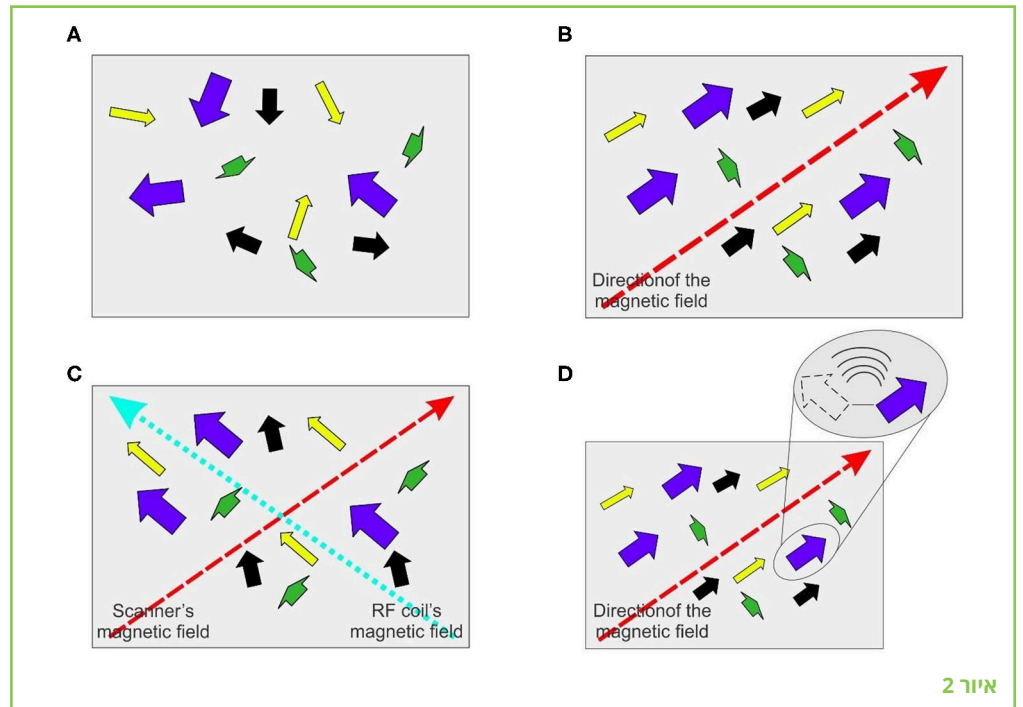
תדירות גלי רדיו

(Radio Frequency Waves)

אותות אלקטרומגנטיים מיוחדים שנוצרו על ידי סלילים של תדרי רדיו במטרה לכונן מחדש פרוטונים מהשדה המגנטי של המגנט של סורק MRI.

איור 2

מולקולות בגוף במהלך סריקת MRI. (A) מולקולות בגוף, שמתנהגות כמו מגנטים זעירים, מכוונות בכיוונים אקראיים בהיעדרו של שדה מגנטי חזק. (B) סורקי MR מייצרים שדה מגנטי חזק (חץ אדום מקווקו) שמכריח את המולקולות בגוף להסתדר בכיוון השדה. (C) סלילי RF מעבירים תדרי רדיו (חץ צהוב) כחול-ירוק) דרך אזורים בגוף שעוברים דימות. המולקולות מסתדרות מחדש בין הכיוונים של השדות המגנטיים של סליל ה-RF והסורק. (D) כאשר תדרי הרדיו כבר לא מועברים, המולקולות מתהפכות, או "נרגעות", לכיוון המקורי שלהן בכיוון השדה המגנטי של הסורק, ומשחררות אנרגיה בצורת גלים אלקטרומגנטיים (חלק מוגדל מצד ימין למעלה). האנרגיה המשוחררת יכולה להיות מנותחת במטרה ליצור תמונה של איבר הגוף.



איור 2

אותות אלקטרומגנטיים (Electromagnetic Signals)

אותות שנוצרים דרך הוויברציות של שדות מגנטיים ושדות חשמליים.

כשמצלמים את המוח. כאשר גלי הרדיו כבר לא משודרים, הפרוטונים "נרגעים" למצבם המקורי עם השדה המגנטי של הסורק. כשהם עושים זאת, הפרוטונים משחררים את האנרגיה שמשכה אותם בכיוון של סליל ה-RF (כמו שחרור של מקלעת), בצורה של **אותות אלקטרומגנטיים** (איור 2D).

באותו האופן שמיליוני טיפות מים יכולות ליצור שלולית, כשהאותות ממיליוני פרוטונים מנותחים בתשומת לב, הם יכולים להתחבר וליצור תמונה מפורטת של הגוף [2]. בעוד ש-MRI רק מצלם תמונות של מבנה המוח, fMRI מראה את הפעילות (או התפקוד) של המוח, על ידי השוואת זרימת הדם בתנאים שונים.

ניורונים - אבני הבניין של מוחנו

המוח מסייע לנו להבין את העולם שסביבנו, ולהגיב כלפיו. הוא מאפשר לנו לפרש דברים שאנו רואים אותם, נוגעים בהם, שומעים אותם וטועמים מהם, ומווסת את תגובות גופנו לסביבה החיצונית. הוא עושה כל זאת דרך רשת של תאים זעירים שנקראים **ניורונים**, אשר מעבדים מידע ומעבירים אותו בין המוח לשאר הגוף [3]. כאשר המוח מתמודד עם מטלה, כמו למשל זכירת רעיון, ניורונים שאחראים על הפעילות הזו נעשים פעילים יותר מניורונים אחרים שסביבם. הם עושים זאת על ידי יצירת אותות כימיים וחשמליים, והעברתם מניורון אחד לאחר. התהליך הזה נקרא פעילות ניורונית, או פעילות מוחית.

כיצד fMRI מודדת פעילות מוחית?

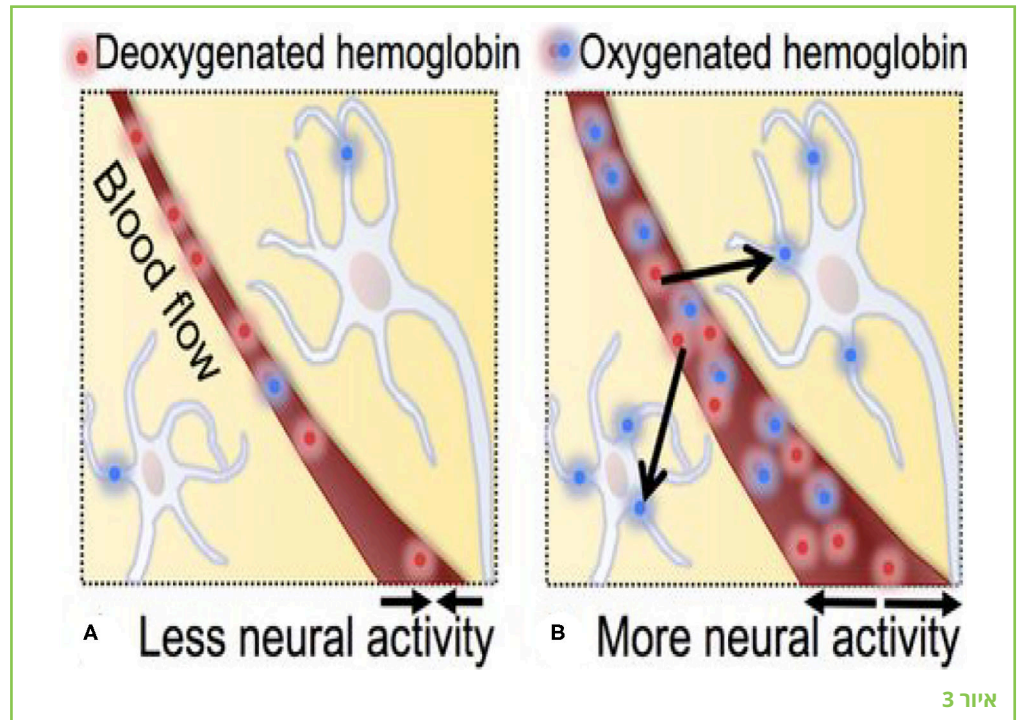
פעילות ניורונית דורשת אנרגיה. כמו תאים אחרים בגוף, ניורונים מייצרים אנרגיה על ידי שימוש בחמצן, כדי לפרק סוכר. כאשר פעילות ניורונית מתגברת באזור מסוים במוח, נדרשת

ניורונים (Neurons)

תאי עצב ששולחים ומקבלים אותות חשמליים וכימיים על פני מרחקים ארוכים, במיוחד במוח.

איור 3

תנועה של המוגלובין מחומצן ולא מחומצן במהלך פעילות נוירולית. (A) כאשר פעילות נוירולית מוגברת באזור מסוים במוח, נדרשת יותר אנרגיה באותו האזור, וההמוגלובין הופך ללא מחומצן מאחר שהוא מספק חמצן לתאים שזקוקים לו. (B) כדי למלא מחדש את האנרגיה הזו, יותר דם מחומצן מועבר לאותו האזור במוח.



המוגלובין (Hemoglobin)

חלבון מכיל ברזל בתוך תאי דם אדומים, שתופס חמצן ונושא אותו לרקמות הגוף.

יותר אנרגיה. כדי לחדש את מלאי האנרגיה הזו, מועבר עוד דם שנושא חמצן אל אותו האזור במוח. הדם נושא חמצן באמצעות מולקולה שנקראת **המוגלובין**. המוגלובין מכיל ברזל, שמקנה לו את תכונותיו המגנטיות, כמו מיליוני זעיר של ברזל. כתלות באם ההמוגלובין נושא חמצן או לא (כלומר, אם הוא מחומצן או לא), יש לו תכונות מגנטיות מעט שונות. לכן, פעילות עצבית רבה יותר מובילה לזרימה גדולה יותר של דם מחומצן (איור 3), כך שאזורי מוח פעילים יותר הם גם מעט יותר מגנטיים. זה גורם לתבניות מעט שונות של גלים אלקטרומגנטיים.

fMRI מאתרת פעילות מוחית על ידי מדידת שינויים בכמות החמצן בדם ובכמות זרימת הדם [5, 4]. הממד הזה ידוע כפעילות BOLD (קיצור של blood-oxygen-level-dependent activity). במילים אחרות, פעילות BOLD היא ממלאת מקום נוחה של פעילות מוחית: fMRI מודדת פעילות מוחית בעקיפין על ידי מדידת פעילות BOLD. זה קצת דומה ללהבין היכן ומתי מתרחשים ברקים, באמצעות הקשבה לרעמים.

תבנות BOLD לגבי פעילות מוחית

במהלך שלושת העשורים האחרונים פחות או יותר, חוקרים השתמשו בשיטות BOLD MR במטרה להתחיל לענות על שאלתה של ג'וי מהסרט "הקול בראש" לגבי מה קורה בתוך ראשיהם של אנשים. כוחה של fMRI לחדור לעומקים שאחרת היו בלתי חזירים בתפקוד מוחי, בבני אדם ובחיות, מומחש באופן יפהפה בעבודתו של דוקטור גרגורי ברנס ועמיתיו. הם השוו את פעילות BOLD במוחות של כלבים, בתגובה לשני אותות יד שונים: אחד שאמר לכלבים שהם עומדים לקבל תגמול של מזון טעים, ואחר שאמר להם שהם לא יקבלו תגמול (איור 4A).

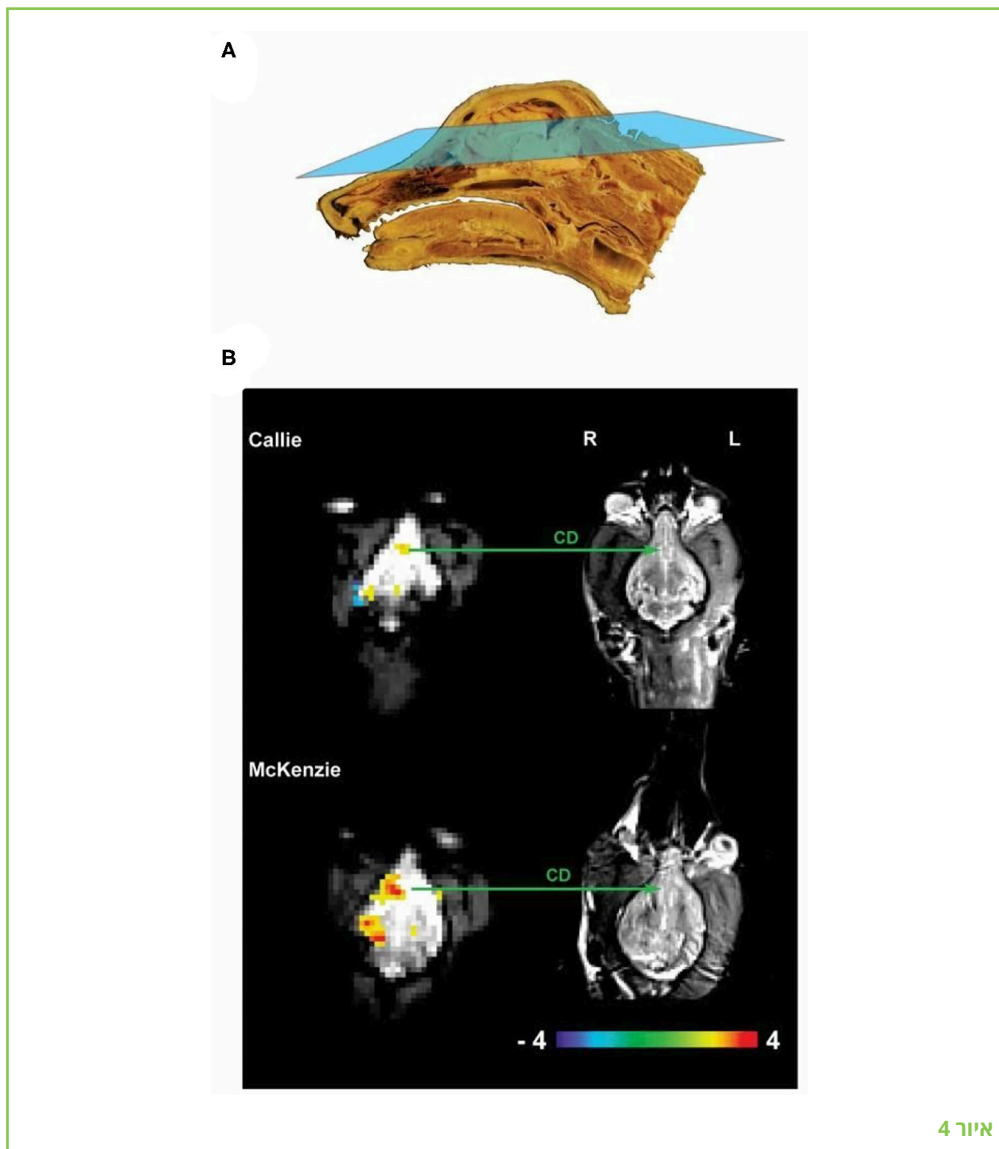
הם מצאו שאזור עמוק בתוך המוח, שנקרא **הגרעין הזנבי**, היה פעיל יותר כשהכלבים ראו אות תגמול מאשר כשהן ראו אות של חוסר בתגמול (איור 4B). מחקרים קודמים בבני אדם

הגרעין הזנבי (Caudate Nucleus)

אזור במוח אשר, בין השאר, מגיב לתגמולים.

איור 4

פעילות מוחית אצל כלבים, כשהם מצפים לתגמול [6].
(A) מבט צד על ראשו של כלב. המישור הכחול מראה את המישור שבו צולמו תמונות המוח. **(B)** פעילות ה-BOLD של שתי כלבות שנקראות קלי ומקנזי נמדדה בזמן שהן צפו בידיו של מטפן מאותת לתגמול או לחוסר תגמול. תמונות fMRI מוצגות מצד שמאל, ותמונות MRI מבני מוצגות מימין. התמונות הן מבט מלמעלה-למטה של המוח, שצולמו במישור שמוצג ב-**(A)**. האזור הזנבי (CD) מואר בתמונות fMRI, כלומר הוא פעיל, והחיצים הירוקים מראים את מיקומי האזור הזנבי בתמונות ה-MRI התואמות. R ו-L מייצגים את הצדדים הימני והשמאלי של הכלבות. תיבת הצבע מצביעה על מידת הפעילות, כאשר אדום מצביע על פעילות מרבית וכחול על פעילות מינימלית.



איור 4

ובמינים אחרים הראו שאותו אזור במוח פעיל בבני אדם כשאנו מצפים לתגמול. אם כן, בדוגמה הזו ישנה תשובה לשאלה של ג'וי מהסרט: מה שקורה בראשיהם של כלבים דומה מאוד למה שקורה בראשינו שלנו בנסיבות דומות, ויכול להיות מצולם באמצעות fMRI בשני המקרים [6]. זוהי תובנה מדהימה שלא הייתה מתאפשרת אלמלא היינו מסוגלים "לקרוא" את מוחותיהם של כלבים באמצעות fMRI!

פריצת דרך בתחומים שונים, כולל רפואה

הפיתוח של MRI ושל fMRI אפשר לנו לבצע צעדים גדולים בהבנת תפקוד המוח. חלק מזה נובע מכך ש-MRI ו-fMRI, בניגוד למשל לקרני רנטגן, לא פוגעות בתאי מוח באמצעות קרינה מזיקה, ויכולות לקבוע את המיקום של פעילות מוחית ביתר דיוק. יתרה מזו, MRI יכולה לשמש לחקור מגוון רחב של דברים נוסף על בני אדם לרבות חיות, צמחים, אורגניזמים אחרים, ואפילו מאובנים, שאין להם דם.

אולם ההשפעה הגדולה ביותר של MRI ושל fMRI, מחוץ לגבולותיו של מחקר טהור, הייתה בהבנת מחלות מוח. לדוגמה, לפני כמה שנים, היינו מסוגלים לאתר את מחלת האלצהיימר רק בשלבים מאוחרים, כאשר מרבית הנזק למוח היה בלתי הפיך. עם הפיתוח של fMRI, איתור מוקדם של אלצהיימר נעשה אפשרי יותר ויותר. אנשים עם אלצהיימר נוטים להראות פחות פעילות באזורים מסוימים במוחם, בהשוואה לאנשים בריאים. לכן, רופאים יכולים להשתמש ב-fMRI כדי לאבחן אלצהיימר בשלב מוקדם, באמצעות איתור רמות אבנורמליות או נמוכות של פעילות באזורים האלה במוח, לפני שהמחלה מחריפה.

כמו כן סורקי fMRI מסוגלים כיום להבחין בין מוח עם אוטיזם וללא אוטיזם, בדיוק של 97% [7]. במוחות עם אוטיזם, מחקרי fMRI הראו תבניות של פעילות מופחתת באזור במוח שחשוב לתכנון, לפתרון בעיות ולפירוש אינטראקציות חברתיות. יתרה מזו, סריקות של מטופלים עם אוטיזם הראו קשרים מעטים יותר בין שני חצאי המוח. לכן, על ידי השוואה שיטתית בין תפקוד מוחי במטופלים עם מחלות מסוימות שקשורות למוח, לבין תפקוד המוח של מטופלים בריאים, מתרחשת התקדמות מהירה בהבנת המחלות האלה.

מה הלאה?

חרף ההתקדמות הרבה, נותרו כמה אתגרים. לדוגמה, אנו עדיין יודעים מעט מאוד על האופן שבו המוח מתפתח בילדות המוקדמת. כיום, מכשירי fMRI הם חשוכים, רועשים ומפחידים, מה שגורם להם להיות בלתי מתאימים עבור פעוטות ואנשים שפוחדים ממקומות צפופים. נדרש למכשירים אלה גם זמן רבליצור תמונות, וה"מצלמות" שלהם רגישות במיוחד לתנועה, מה שגורם לתמונות להיות מטושטשות. יתרה מזו, שיטת fMRI היא יקרה, לא ניידת ודורשת אימון רב של רופאים ושל מדענים. חוקרים עובדים על פתרון הבעיות האלה. אתגר עיקרי נוסף הוא לשפר את מהירות תהליך דימות ה-MR, ולשפר את איכות התמונות. האתגרים האלה, וכמה אתגרים נוספים, יכולים להיראות מאיימים, אולם הם למעשה הזדמנויות עתידיות למוחות הצעירים והשאפתניים של היום.

מקורות

1. Vecteezy. 2019. *Vector Graphics for Everyone*. Available online at: www.vecteezy.com/ (accessed October 7, 2020).
2. Khan Academy. *Magnetic Resonance Imaging (MRI)*. Available online at: <https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/physical-processes/proton-nuclear-magnetic-resonance/a/magnetic-resonance-imaging-mri> (accessed October 7, 2020).
3. BrainFacts/sfn. 2012. *The Neuron*. Available online at: <http://www.brainfacts.org/brain-anatomy-and-function/anatomy/2012/the-neuron> (accessed October 7, 2020).
4. Kids Encyclopedia Facts. *Functional Magnetic Resonance Imaging Facts for Kids*. Available online at: https://kids.kiddle.co/Functional_magnetic_resonance_imaging (accessed October 7, 2020).
5. Neuroscience of Attention & Perception Laboratory (NAPL), Princeton University. *NAPL Kids Project*. Available online at: <https://scholar.princeton.edu/kidsrock> (accessed October 7, 2020).

6. Berns, G. S., Brooks, A. M., and Spivak, M. 2012. Functional MRI in awake unrestrained dogs. *PLoS ONE*. 7:e38027. doi: 10.1371/journal.pone.0038027
7. Oaklander, M. 2014. *Autism: fMRI Brain Scans Can Predict Autism With 97% Accuracy*. Available online at: <https://time.com/3614487/fmri-autism-diagnosis/> (accessed October 7, 2020).

פורסם אונליין: 23 ביוני 2022

נערך על ידי: Sabine Kastner

מנחות מדעיות: Carmen Flores Nakandakare and Alexandra Latini

ציטוט: Amanamba U, Sojka A, Harris S, Bucknam M and Hegdé J (2022) חלון הצצה למוחכם: כיצד fMRI מסייעת לנו להבין מה קורה בתוך ראשנו. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.484603-he

תורגם והותאם: Amanamba U, Sojka A, Harris S, Bucknam M and Hegdé J (2020) Window Into Your Brain: How fMRI Helps Us Understand What Is Going on Inside Our Heads. *Front. Young Minds* 8:484603. doi: 10.3389/frym.2020.484603

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

COPYRIGHT © 2020 © Amanamba, Sojka, Harris, Bucknam and Hegdé 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.

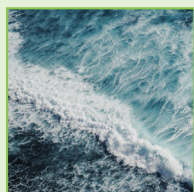
סוקרים צעירים

ISABELLA, גיל: 13

קוראים לי Isabella ואני בת 13. נולדתי בניו יורק ואני גרה בשווייץ. אני אוהבת אומנות, קריאת ספרים, שירה, ריקוד ונגינה על פסנתר. הספורט האהוב עליי הוא שחייה. יש לי גם עניין גדול במתמטיקה, בטבע ובמדע, במיוחד בכל מה שקשור לחלל, לזמן ולחומר. בעתיד, ארצה להיות מהנדסת אווירונאוטיקה או ארכיטקטית. אני תמיד סקרנית מאוד ללמוד עוד על העולם שסביבנו.

ALINE, גיל: 13

קוראים לי Aline, אני בת 13. התחביבים האהובים עליי הם תיאטרון, נגינה על קלרינט, ציור וקריאה. אני מרותקת ממיתולוגיה יוונית; הספרים האהובים עליי כוללים את הסדרות של הארי פוטר ושל פרסי ג'קסון. בבית הספר, אני נהנית מאוד ממתמטיקה וממדע.



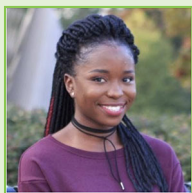
**LUCAS, גיל: 15**

קוראים לִי Lucas, אני תלמיד כיתה י בבית ספר תיכון ברוקלין. אני מדבר אנגלית וספרדית, ולומד סינית מאז כיתה ב. אני אוהב לשחק כדורגל ולצפות בכדורגל, וגם לשחק באקס בוקס.

הכותבים**UDOCHUKWU AMANAMBA**

אני סטודנטית לתואר ראשון באוניברסיטת אוגוסטה, אוגוסטה, ג'ורג'יה (ארצות הברית) שחוקרת פסיכולוגיה וביולוגיה עם מיקוד בקדם-רפואה. אני נהנית ללמוד על המוח ועל לקויות נוירולוגיות, ומקווה לספק בקרוב שירותים רפואיים לאנשים שסובלים מלקויות נוירולוגיות. כיום אני חוקרת מתמחה במעבדתו של דוקטור Jay Hedge ומשתתפת בתוכנית הנגשת חינוך צבאי (AEOP): תוכנית חניכות מחקרית לתואר ראשון (URAP). בזמני הפנוי, אני נהנית לשיר, לטייל ולחגוג בטבע, לבלות עם משפחתי ולעשות תעלולים לחברי.

*uamanamba@augusta.edu

**ANDREW SOJKA**

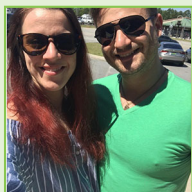
אני עולה לכיתה יא בבית ספר פולסביל בפולסביל, מרילנד (ארצות הברית), שמתעניין בלמידת מדעי המוח, רפואה ועיתונות. כמשתתף בתוכנית החניכות במדע ובהנדסה דרך המשרד להנגשת חינוך צבאי, חקרתי תחת דוקטור Jay Hegde באוניברסיטת אוגוסטה. דרך החניכות שלי, רכשתי הבנה טובה יותר של מחקר מדעי, מדעי המוח הראייתיים ודימויות מוחי באופן כללי. *andrewsojka2021@gmail.com

**SAVION HARRIS**

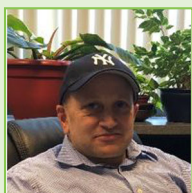
אני תלמיד כיתה יא בבית ספר AR ג'ונסון מגנט למדעי הבריאות ולהנדסה (אוגוסטה, ג'ורג'יה). בזמן שלקחתי חלק בתוכנית ההנגשה של חינוך צבאי (AEOP), חקרתי במעבדתו של דוקטור Jay Hegde בהנחייתו של דוקטור Hegde לא רק למדתי על המוח, אלא גם על שיטות שמשמשות לצפות בו. בזמני הפנוי, אני נהנה לשחק כדורגל ולרוץ למרחקים ארוכים. *saviondharris@gmail.com

**MARISA BUCKNAM**

אני סטודנטית למדעי המחשב באוניברסיטת אוגוסטה, ג'ורג'יה. אני מתעניינת בחקירת תכנות מחשב והאופן שבו אנו יכולים להשתמש בו כדי לעצב פרוטוזות (תותבות) לגוף האדם. כשאני לומדת, אני עסוקה בלהיות אימא לשני כלבלבים מקסימים, להשתתף ברולר דרבי, או למצוא מסעדות מגניבות חדשות ברחבי העיר.

**JAY HEGDÉ**

דוקטור Jay Hegde הוא מומחה במדעי המוח הראייתיים בקולג' הרפואי של ג'ורג'יה באוניברסיטת אוגוסטה (ארצות הברית). המחקר שלו מתמקד באופן שבו המוח פועל בתנאים אמיתיים בעולם. הוא גם עורך שותף בפרונטירז בתחום מדעי המוח החישוביים, ולאחרונה הוא ערך במשותף מהדורה בנושא של למידה עמוקה עבור כמה עיתוני פרונטירז. הוא מבלה הרבה מזמנו החופשי בניסיון לסייע לאנשים פחות ברי מזל, כמו



למשל למעריצים של הבוסטון רד סוקס. לדוגמה, הוא מארגן נסיעה למעריצי הרד סוקס ביום הראשון של עונת הבייסבול בכל שנה, כשהקבוצה שלהם פסולה מתמטית מהפלייאוף.

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



הוצאת פרונטיירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK