



כיצד המוח לומד לחבר דברים זה לזה?

Leila Reddy^{1,2*}, Matthew W. Self³, Pieter R. Roelfsema^{3,4,5}

¹המרכז לחקר המוח והקוגניציה, אוניברסיטת טולוז, אוניברסיטת פול סבטייר, טולוז, צרפת

²UMR 5549, CNRS, הפקולטה לרפואה של פורפן, טולוז, צרפת

³המחלקה לראייה ולקוגניציה, המכון ההולנדי למדעי המוח (KNAW), אמסטרדם, הולנד

⁴המחלקה לניוירופיזיולוגיה אינטגרטיבית, המחקר לחקר נירוגנומיקה קוגניציה, אוניברסיטת וריז', אמסטרדם, הולנד

⁵המחלקה לפסיכיאטריה, מרכז רפואי אקדמי, אמסטרדם, הולנד

סוקרים צעירים

MT. ROSE
ELEMENTARY
גיל: 13-14



אנו כל הזמן מקשרים בין דברים שונים: בין ילדים חדשים שאנו פוגשים לבין השמות, הפרצופים והקולות שלהם, או בין ביצים ירוקות לבין נקניק. כיצד המוח שלנו עושה זאת? מטרת המחקר הזה הייתה להבין כיצד המוח יוצר את הקישורים האלה. מה קורה בתאים במוח כשאנו לומדים ששני דברים (כמו למשל ילדה חדשה והשם שלה) הולכים יחד? בניסוי ביקשנו ממשתתפים ללמוד לקשר בין פריטים שונים. כשהמשתתפים למדו לעשות את הקישורים האלה, ראינו שתאי העצב במוח שלהם גם קישרו בין הפריטים האלה. תאי העצב האלה נמצאים באזור במוח שנקרא ההיפוקמפוס. במאמר הזה ראשית נסביר כיצד אפשר להקשיב לתאי עצב במוח אנושי. לאחר מכן, נראה כמה דוגמאות לתגובות של תאי העצב האלה, ולבסוף, כיצד התאים יכולים לקשר בין פריטים שונים.

כיצד המוח מקשר בין פריטים דומים?

מטרת המחקר שלנו הייתה להבין כיצד המוח מקשר בין דברים שונים. דמיינו שחבר שלכם מקבל כלב חדש. המוח שלכם לומד במהרה את הקשר החדש הזה בין החבר שלכם לכלב.

בכל פעם שאתם רואים את הכלב, אתם יודעים שהוא שייך לחבר שלכם. אנו רצינו להבין כיצד תאי עצב במוח מאחסנים את הקשרים האלה. כפי שנסביר בהמשך, כשאתם מסתכלים על דברים שונים, חלק מתאי העצב במוח שלכם מופעלים. ההשערה שלנו הייתה שכשאתם לומדים לקשר בין החבר שלכם לבין הכלב שלו, אותם תאי העצב יופעלו גם כשמדובר בחבר שלכם וגם כשמדובר בכלב שלו.

כיצד אנו יכולים להקשיב לתאי עצב?

תאי עצב הם תאים מיוחדים במוח שלנו. ישנם מיליארדי תאי עצב במוח, והם אחראיים לכל הדברים שאנו חושבים ועושים. לדוגמה, בכל פעם שאתם מסתכלים על משהו, קבוצה של תאי עצב במוח שלכם מופעלת ומעבירה הודעות לתאי עצב אחרים לגבי הדבר שאתם מסתכלים עליו. לכן, אם אנו רוצים לדעת אם תא עצב הופעל על-ידי משהו (למשל, חבר שלכם או הכלב שלו), אנו צריכים להיות מסוגלים להקשיב להודעות האלה. כשתאי עצב מופעלים הם שולחים את ההודעות שלהם אחד לשני בצורה של אותות חשמליים קטנים. כדי להקשיב לתאי עצב, אנו צריכים להיות מסוגלים למדוד את הזרמים החשמליים הקטנים האלה. אפשר למדוד זרמים חשמליים באמצעות חוטים זעירים שנקראים **אלקטרודות**. לכל תא עצב יש קול קטן מאוד (הזרם החשמלי קטן מאוד). לכן, כדי להקשיב לתאי עצב פרטניים אנו צריכים לקרב את האלקטרודות שלנו ממש קרוב אליהם. משמעות הדבר היא שאנו צריכים להכניס את האלקטרודות לתוך המוח, קרוב לתאי העצב שאנו רוצים להקשיב להם.

כיצד אנו יכולים להכניס אלקטרודות למוח אנושי?

הכנסת אלקטרודות למוח אנושי אינה שגרתית. אולם במקרים מסוימים רופאים חייבים להכניס אלקטרודות למוחות של מטופלים כדי להקשיב לפעילות החשמלית במוח שלהם. לדוגמה, אצל מטופלים עם **אפילפסיה**, קבוצות של תאי עצב מתחילות לדבר זו עם זו באופן בלתי נורמלי, וההודעות שהן שולחות אחת לשנייה מתערבבות במשך כמה דקות. במקרים מסוימים, המטופלים מאבדים את הכרתם ונופלים על הרצפה. במצב הזה, רופאים לעיתים קרובות צריכים למצוא מהיכן מגיע ה"פּטפוט" הבלתי נורמלי. במקרים קיצוניים של אפילפסיה, רופאים מכניסים אלקטרודות למוחותיהם של מטופלים כדי להקשיב ל"פּטפוט" הזה. אזור אחד במוח שכמעט תמיד נחקר על-ידי אלקטרודות הוא ה**היפוקמפוס**. ההיפוקמפוס הוא מבנה שנמצא עמוק בתוך המוח, אשר נראה קצת כמו סוסון ים, והוא ממלא תפקיד חשוב בלמידה וביזכרון.

מרבית המטופלים שאלקטרודות הוכנסו לתוך מוחותיהם לא מתנגדים להשתתפות בכמה ניסויים שאינם למטרת ריפוי המחלה שלהם, אלא מטרתם לסייע למדענים כמונו להבין כיצד המוח פועל. בניסוי טיפוסי, מטופלים יושבים במיטת בית החולים שלהם, או על כיסא באחד מחדרי בית החולים. האלקטרודות במוח שלהם מחוברות למחשבים שרושמים את הפעילות החשמלית בתאי העצב שלהם.

תאי עצב במוח מופעלים כשאנו מסתכלים על דברים

לפני שנראה לכם מה תאי עצב עושים כשאתם לומדים לקשר בין פריטים, חשוב ראשית להבין מה תאי עצב עושים כשאתם מסתכלים על משהו. כפי שאמרנו קודם, תאי עצב שונים מופעלים במצבים שונים. כיצד מדענים מבינים את התגובה של תאי העצב האלה? פשוט מאוד, אנו

אלקטרודה

(Electrode)

חוט קטן שמוכנס למוח, אשר מאפשר לנו להקשיב לפעילות מוחית.

אפילפסיה

(Epilepsy)

הפרעה מוחית שיכולה להוביל להתקפים במטופלים. כדי ללמוד עוד על אפילפסיה, הנה מאמר מצוין: מהי אפילפסיה, וכיצד אתם יכולים לסייע לאדם עם אפילפסיה? [1].

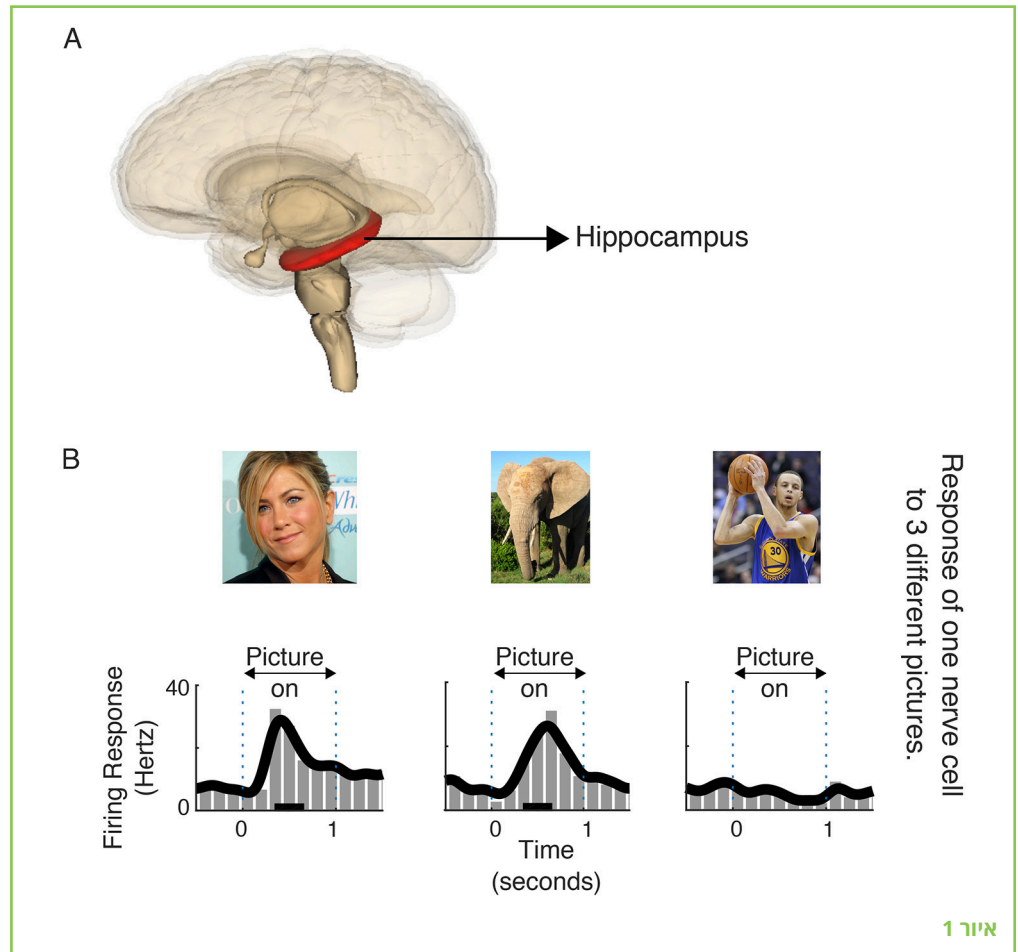
היפוקמפוס

(Hippocampus)

מבנה שנמצא עמוק בתוך המוח, אשר ממלא תפקיד חשוב בלמידה וביזכרון.

איור 1

(A) ההיפוקמפוס הוא מבנה שממוקם עמוק בתוך המוח. **(B)** חלק מתאי העצב מגיבים לתמונה. כאן אתם רואים את התגובה של תא עצב אחד לשלוש תמונות. הקווים המקווקים הכחולים מראים לכם את משך הזמן שבו התמונה הוצגה. לפני הזמן הזה ולאחריו, לא הוצגה תמונה. אם תא עצב מגיב לתמונה מסוימת הוא מגדיל את התגובה שלו כשהתמונה מוצגת בהשוואה לזמן לפני שהתמונה הוצגה. עבור שתי התמונות הראשונות, אתם יכולים לראות שתא העצב הגדיל את תגובתו באופן חד, אולם לא הגיב לתמונה השלישית.



Response of one nerve cell to 3 different pictures.

איור 1

ירי של ספייק (Firing a Spike)

אומרים שתאי עצב במוח "יורים ספייק" כשהם שולחים מידע לתאי עצב אחרים. ה"ספייקים" הם זרמים חשמליים זעירים.

הרץ (Hertz)

יחידת מידה של תדר של אירוע. הרץ מודד כמה פעמים אירוע מתרחש בשנייה אחת. במאמר הזה, אנו מודדים כמה ספייקים תאי עצב יורים בשנייה אחת, ומבטאים את תגובת הירי ביחידות של הרץ.

פשוט סופרים את כמות הפעמים שתא העצב מופעל. התגובה הזו של תא העצב ידועה כ**ירי של ספייק**, ונמדדת ביחידות של **הרץ**.

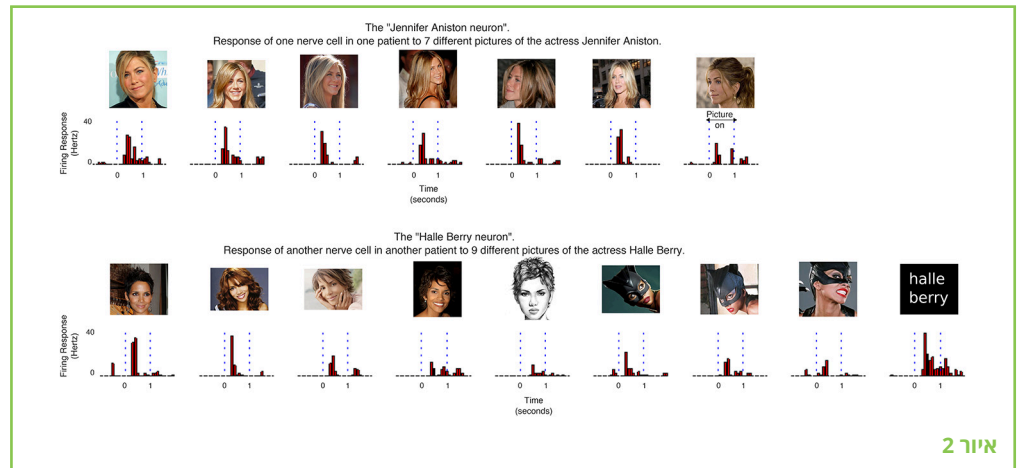
בניסויים מוקדמים, הראינו למטופלים תמונות על מסך מחשב. רצינו לראות אם תאי העצב הגיבו לאחת התמונות או יותר שהראינו למטופלים. שמונה מטופלים השתתפו בניסוי הראשון שלנו [2]. הראינו למטופלים כ-100 תמונות שונות של אנשים מפורסמים כמו השחקניות ג'ניפר אניסטון או האלי ברי; מקומות מפורסמים כמו בית האופרה של סידני, או המגדל הנוטה של פיזה, כמו גם תמונות של אנשים ומקומות לא מפורסמים, חיות, רכבים וכן הלאה.

עבור כל תמונה, ספרנו את מספר הפעמים שתאי עצב ירו ספייק בכל פעם שהוצגה תמונה. תא עצב שלא מגיב לתמונה נתונה יירה אותה כמות פעמים לפני שהתמונה מוצגת וגם בזמן שהיא מוצגת. מצד שני אם תא עצב מופעל בתגובה לתמונה נתונה, הוא יירה הרבה ספייקים כשהמטופל או המטופלת רואים את התמונה (איור 1). בתמונות שמוצגות באיור 1, תא עצב של מטופל אחד ירה הרבה ספייקים בתגובה לתמונה של השחקנית ג'ניפר אניסטון, ובתגובה לתמונה של פיל, אולם אותו תא עצב לא הגיב לתמונה של שחקן כדורסל.

לאחר מכן שאלנו אם תא העצב שהגיב לתמונה מסוימת, יגיב לתמונות אחרות של השחקנית. לדוגמה, אם תא עצב שמגיב לג'ניפר אניסטון מגיב גם לתמונות אחרות של השחקנית? או לשם הכתוב שלה? לאחר מכן שאלנו אם תא העצב שהגיב לתמונה מסוימת, יגיב גם לתמונות

איור 2

שני תאי עצב אצל שני מטופלים שונים הגיבו לתמונות קשורות. השורה הראשונה מראה את התגובה של תא עצב בהיפוקמפוס שהגיב לשבע תמונות שונות של השחקנית ג'ניפר אניסטון. תא העצב הזה לא הגיב לתמונה של שחקן כדורסל מפורסם, כפי שאתם יכולים לראות באיור 1B. הגובה של העמודות מייצג את חוזק החיבור בין התמונה שהעצב גבוהה יותר, כך התגובה הייתה חזקה יותר. השורה השנייה מראה לכם את התגובה של תא היפוקמפוס אחר, אצל מטופל אחר, שהגיב לתמונות שונות של השחקנית האלי ברי. תא העצב הזה הגיב לתמונות של האלי ברי, לאיור קווים שלה, לתמונה שבה היא מחופשת לאשת החתול, וגם לשם שלה. בשתי הדוגמאות, נראה שתאי העצב מקשרים בין התמונות השונות.



איור 2

אחרות של השחקנית קשורות. לדוגמה, מגיב גם לתמונות אחרות של השחקנית? או לשם הכתוב שלה? כדי לענות על השאלה הזו הראינו לאותו המטופל הרבה תמונות שוב, אולם הפעם כללנו שבע חדשות תמונות של ג'ניפר אניסטון. התמונות היו די שונות זו מזו – לדוגמה, חלק מהתמונות הראו אותה מקדימה, בחלק היא חייכה, היא עמדה בסביבות שונות בכל אחת מהתמונות, וכדומה. אולם מצאנו שאותו תא העצב ירה בתגובה לכל התמונות השונות של השחקנית, ולא כל כך הגיב לתמונות שלא כללו את ג'ניפר אניסטון. תא עצב אחר במטופל אחר הגיב לשחקנית האלי ברי (איור 2). במילים אחרות, תאי העצב האלה קישרו יחד תמונות שונות, למרות ההבדלים בין התמונות! שני תאי העצב באיור 2 הם משני מטופלים שונים, ומצאנו תאי עצב דומים גם אצל כל המטופלים האחרים.

האם תאי עצב אנושיים מקשרים בין פריטים קשורים?

הדוגמאות האלה מראות לכם שתמונות קשורות קושרו יחד על-ידי תאי העצב האלה. הממצא הזה הוביל אותנו להשערה שלנו – שכאשר אתם לומדים לקשר בין שני פריטים (לדוגמה, החבר שלכם והכלב שלו), אותם תאי עצב מופעלים עבור שני הפריטים [3].

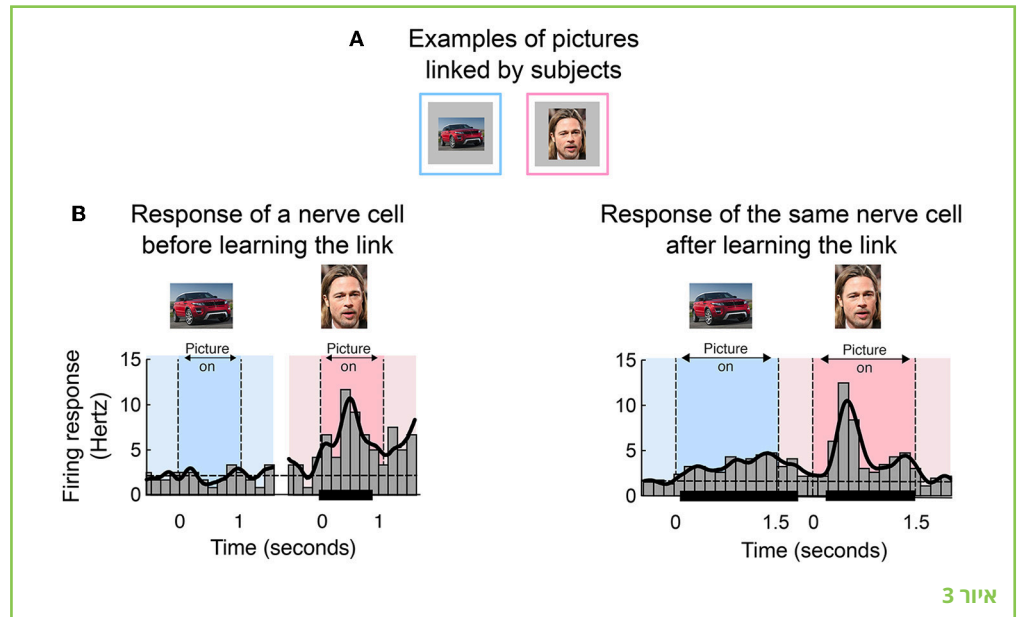
כדי לבחון את ההשערה הזו ערכנו ניסוי נוסף שבו קבוצה חדשה של שמונה מטופלים היו צריכות ללמוד ששני פריטים קשורים זה לזה [4]. בחנו אם תאי העצב בהיפוקמפוס יקשרו גם בין שני הפריטים האלה.

בדוגמה שבאיור 3, מטופל אחד למד שמכונת אדומה קשורה לשחקן בראד פיט. לאחר מכן שאלנו האם תא העצב שמגיב לבראד פיט יגיב גם לתמונה של המכונת האדומה. האם תא העצב ילמד לקשר בין המכונת לבין בראד פיט? ספרנו את מספר הפעמים שתא העצב ירה בתגובה למכונת האדומה לפני שהמטופלים למדו לבצע את הקישור, ואז השוונו את מספר הפעמים שתא העצב ירה אחרי שהמטופלים למדו לבצע את הקישור. אם תא העצב למד לבצע את הקישור, אז הוא אמור לירות לעיתים קרובות יותר כשהמכונת האדומה מוצגת, אחרי שהמטופל התחיל לקשר בין שני הפריטים.

התגובה של תא עצב אחד לפני הלמידה ואחריה מוצגת באיור 3. כפי שאתם יכולים לראות, לפני שהמטופל למד לבצע את הקישור, תא העצב לא הגיב למכונת האדומה. אולם לאחר

איור 3

(A) המטופלים שלנו התבקשו לקשר בין תמונות שונות, לדוגמה, בין התמונה של המכונית האדומה לבין התמונה של השחקן בראד פיט. (B) תגובתו של תא עצב אחד בהיפוקמפוס כדוגמה. משמאל, לפני שהמטופל למד לקשר בין שתי תמונות שונות, תא העצב הגביר את פעילות הירי שלו רק בתגובה לתמונה של בראד פיט. מימין, אחרי שהמטופל למד לקשר בין המכונית האדומה לבין בראד פיט, תא העצב הגביר את פעילות הירי שלו בתגובה למכונית האדומה וגם לשחקן במילים אחרות, תא העצב הגיב לשני הפריטים שקושרו יחד.



איור 3

שהמטופל למד לקשר בין התמונה של המכונית האדומה לבין תמונה של בראד פיט, תא העצב שהגיב בהתחלה רק לבראד פיט התחיל להגיב גם לתמונה של המכונית האדומה. במילים אחרות, כשהמטופל למד לקשר בין שתי התמונות האלה, גם תא העצב קישר ביניהן. שוב, תא העצב שמוצג באיור 3 הוא דוגמה ממטופל אחד. קיבלנו תוצאות דומות גם עבור 36 תאי עצב אחרים בקבוצה הזו של שמונת המטופלים.

מסקנות

גילינו שתאי עצב בהיפוקמפוס מקשרים בין פריטים שונים שמופיעים יחד. במילים אחרות, כשאנו חיים את חיינו וכל הזמן מקשרים בין כל מיני סוגי פריטים (כמו חברה שלכם והשם שלה), תאי עצב בהיפוקמפוס עסוקים ביצירת האסוציאציות האלה במוח שלנו.

כמה זמן תאי עצב בהיפוקמפוס מאחסנים את הקישורים האלה? נניח שאתם משנים את בית הספר שלכם וכבר לא מקשרים באופן יומיומי בין השמות לבין הפרצופים של תלמידים מבית הספר הקודם. באיזו תדירות אתם צריכים להעלות את הפרצופים והשמות האלה בזיכרון כדי שהקישורים האלה יישארו? מחקרים רבים מראים שאחרי זמן מה ההיפוקמפוס מסיע מידע ישן לאזורים אחרים במוח עבור אחסון לטווח ארוך, אולם לא ברור כמה זמן עובר עד שזה מתרחש. השאלות הקריטיות האלה על האופן שבו זיכרונות עולים, על האופן והמקום שבו הם מאוחסנים ועל הגורמים שמשפיעים על השימור שלהם, כולן עדיין פתוחות. מחקרים נוספים ימשיכו לפענח כיצד המוחות שלנו מייצרים זיכרונות.

מקורות

1. Rogers, S. and Buzsáki, G. 2019. What Is Epilepsy and How Can You Help Someone With It? *Front. Young Minds*. 7:52. doi: 10.3389/frym.2019.00052
2. Quiroga, R. Q., Reddy, L., Kreiman, G., Koch, C., and Fried, I. 2005. Invariant visual representation by single neurons in the human brain. *Nature*. 435:1102–7.

doi: 10.1038/nature03687

3. Reddy, L., and Thorpe, S. J. 2014. Concept cells through associative learning of high-level representations. *Neuron*. 84:248–51. doi: 10.1016/j.neuron.2014.10.004
4. Reddy, L., Poncet, M., Self, M. W., Peters, J. C., Douw, L., van Dellen, E., et al. 2015. Learning of anticipatory responses in single neurons of the human medial temporal lobe. *Nat. Commun.* 6:8556. doi: 10.1038/ncomms9556

פורסם אונליין: 28 בינואר 2022

נערך על ידי: Gideon Paul Caplovitz

מנחה מדעי: Amy Altick

ציטוט: Reddy L, Self MW and Roelfsema PR (2022) כיצד המוח לומד לחבר דברים זה לזה? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00144-he

Reddy L, Self MW and Roelfsema PR (2020) How Does the Brain Learn to Link Things Together? *Front. Young Minds* 7:144. doi: 10.3389/frym.2019.00144

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

COPYRIGHT © 2019 © Reddy, Self and Roelfsema 2022. זהו מאמר בנישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) 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

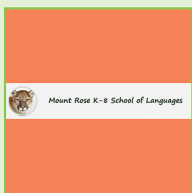
MT. ROSE ELEMENTARY, גיל: 13-14

אנחנו Mt. Rose! אנו קבוצה של תלמידי כיתה ח באקדמיה למצוינות שהולכים לבית הספר היסודי Mt. Rose. בזמננו הפנוי אנו משחקים, מחליקים על קרח, מציירים, מתאגרפים, אוכלים וישנים. אנו עובדים קשה, ואיננו פוחדים מאתגרים, גם בתוך הכיתה וגם מחוצה לה. אנו מצפים לשנה הבאה, שבה נתחיל את תקופת התיכון שלנו.

הכותבים

LEILA REDDY

Leila Reddy גדלה בהודו, למדה בארצות הברית, וכיום היא מדענית בצרפת. היא קיבלה את הדוקטורט שלה במדעי המוח מקאלטק. לפני כן, היא למדה כימיה ומתמטיקה. יש לה שני ילדים קטנים, והיא חושבת שזה יהיה כיף לקרוא איתם מאמרים מדעיים כשהם יגדלו. היא אוהבת לקרוא, גם ספרים למבוגרים וגם ספרים לילדים. *leila.reddy@cnr.fr





MATTHEW W. SELF

Matt Self מגיע מאיפסוויץ' בבריטניה. הוא למד מדעי המוח בקיימברידג' ובלונדון לפני שהוא עבר לאמסטרדם, שם הוא גר כיום. יש לו שני ילדים, שעדיין צעירים מדי לקרוא את פרונטיר - מדע לצעירים, אולם בן ה-4 שלו יודע הרבה מאוד דברים על דינזאורים. נוסף על היותו מדען, הוא גם אוהב מוזיקה ומנגן במנדולינה.



PIETER R. ROELFSEMA

Pieter Roelfsema גר בהולנד מרבית חייו. הוא עבד בגרמניה במשך כמה שנים. הוא למד רפואה מאחר שרצה לרפא מטופלים, אולם מאוחר יותר נמשך לעבודה מדעית מאחר שרצה לדעת כיצד המוח פועל. יש לו שלושה ילדים בני 14, 18, ו-21. הוא אוהב לראות את הילדים שלו משחקים הוקי, ולרכוב על אופניו לעבודה.

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



הוצאת פרונטיר מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK