

## למידה מטעויות: כיצד המוח מתמודד עם שגיאות?

Knut Overbye<sup>1</sup>, Rune Bøen<sup>2</sup>, Rene J. Huster<sup>3</sup>, Christian K. Tamnes<sup>2,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>המרכז לשינויי תוחלת חיים במוח ובקוגניציה, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוסלו, אוסלו, נורווגיה  
<sup>2</sup>מרכז מחקר PROMENTA, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוסלו, אוסלו, נורווגיה  
<sup>3</sup>המעבדה לדימות רב מודלי ולהתנהגות קוגניטיבית, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוסלו, אוסלו, נורווגיה  
<sup>4</sup>NORMENT, המכון לרפואה קלינית, אוניברסיטת אוסלו, אוסלו, נורווגיה  
<sup>5</sup>המחלקה למחקר פסיכיאטרי, בית חולים דיאקונה'ממט, אוסלו, נורווגיה

כולנו טועים – וכשאנו טועים זו הזדמנות נהדרת עבור מוחנו לכוונן את מה שהוא עושה וללמוד. כדי לחקור כיצד המוח מאתר שגיאות ומתמודד עימן, חוקרים השתמשו בקסדות שמצוידות בחיישנים שיכולים למדוד פעילות מוחית. דבר אחר שהחוקרים מצאו באמצעות השיטה הזו הוא שהמוח יוצר סוג מיוחד של פעילות מוחית כאשר האדם מבצע טעות. הפעילות הזו, שנקראת 'שליליות שקשורה בטעות' (error-related negativity, ERN בקיצור), מתרחשת כמעט באותו הזמן שבו מבוצעת השגיאה. זה כאילו שהמוח כבר יודע שאנו עושים טעות בתוך שברירי שנייה, לפני שאנו אפילו מודעים לכך. מהיכן מגיעה ה-ERN במוח? כיצד היא מסייעת לנו ללמוד? וכיצד היא משתנה כשאנו מתפתחים מילדים למבוגרים?

### ביצוע טעויות

ביצוע טעויות מרגיש לא טוב. האכזבה הפתאומית שאתם מרגישים כאשר החץ מפספס את לוח המטרה, או תחושת השקיעה שאתם חווים כשאתם מקבלים ציון נכשל בבחינה. התחושות

#### סוקרות צעירות

ASHLEY

גיל: 12



JULIA

גיל: 14



SAMANTHA

גיל: 15



האלה יכולות להיות מעצבנות או כואבות, אולם הן חלק ממה שהמוח שלכם עושה כדי לוודא שתצליחו בעתיד.

ביצוע טעויות גם יכול היה לגרום לפגיעה או למוות של האבות הקדמונים שלנו שחיו בטבע, ועסקו בציד ובבריחה מפני טורפים. המוחות של האבות הקדמונים שלנו היו צריכים לסייע להם ללמוד מטעויותיהם, כך שהמין האנושי יוכל לשרוד. פונקציה חשובה של המוח היא לנסות לחזות את העתיד. זה כולל את האופן שבו אנו משנים את הפעולות שלנו בעתיד, כדי להימנע מביצוע אותן הטעויות. הבנת האופן שבו המוח מאתגר ומתמודד עם טעויות היא לכן חשובה להבנת האופן שבו המוח פועל והאופן שבו אנו לומדים.

אנו יכולים לחשוב על טעות כך: אתם מתחילים עם מטרה שאתם רוצים להשיג. אולי אתם משחקים כדורגל ועומדים לבעוט בעיטה חופשית. מטרתכם היא להבקיע שער. אתם אומדים את המצב ובחרים תוכנית פעולה. בואו נגיד שהקבוצה היריבה העמידה חומה, ולכן אתם מחליטים לבעוט את הכדור סביב לשחקנים ולכיוון השער. אולם אתם בועטים עם מעט מדי סיבוב בכדור, והוא פוגע בעמוד השער ויוצא החוצה.

בדוגמה הזו, הטעות נגרמה על ידי תחזית בלתי מדויקת. חזיתם שהאופן שבו בעטתם בכדור יגרום לכדור להיכנס לשער, אולם להפתעתכם הכדור פגע במקום זאת בעמוד! במילים אחרות, מה שחשבתם שיקרה לא קרה בפועל. אף על פי שאתם עשויים להתאכזב מכך שלא הבקעתם שער, האירוע הזה אומר לכם משהו חשוב מאוד. הוא אומר לכם שרעיונותיכם לגבי האופן שבו העולם פועל והאופן שבו אתם יכולים להשפיע עליו אינם לגמרי נכונים. עכשיו אתם יודעים שבפעם הבאה תצטרכו לבעוט את הכדור עם יותר סיבוב. הודות לחוויות למידה כאלה, אתם תשפרו את יכולות הבעיטה שלכם עד שבסופו של דבר תבקיעו.

## כיצד המוח מתמודד עם טעויות?

תאי מוח מתקשרים זה עם זה באמצעות חשמל. חלק מהפעילות החשמלית "מטיילת" מתאי המוח לחלק החיצוני של הראש. היא עוברת דרך רקמת המוח, הגולגולת והעור שלכם בדרך. על ידי שימוש בקסדות עם חיישנים מיוחדים שנקראים אלקטרוודות, אנו יכולים לרשום את הפעילות הזו; השיטה נקראת **אלקטרואנצפולוגרפיה (EEG, electroencephalography)**. EEG מאפשרת לנו לחקור את הפעילות המוחית בזמן שאנשים מבצעים מטלות שונות. המוח אף פעם לא מפסיק לפעול, אפילו כשאתם ישנים, ולכן הוא כל הזמן מייצר את הפעילות החשמלית הזו. על ידי התבוננות בתבניות שב"גלי המוח" החשמליים האלה, אפשר לראות הרבה דברים שקורים במוח. אנו יכולים לראות אם אנשים ערים או ישנים, אם הם רגועים או ממוקדים, או אם הם בדיוק ביצעו טעות.

במעבדה, אנו חוקרים פעילות מוחית שקשורה בטעויות על ידי כך שאנו נותנים לאנשים מטלה קשה, שבה הם צפויים לבצע הרבה טעויות. לדוגמה, האדם עשוי להתבקש ללחוץ מהר על מקש מסוים במקלדת כאשר מוצג חץ שמאלי או ימני במרכז המסך, אולם החץ מוקף בהרבה חיצים מסיחים שמצביעים לכיוונים שונים. בכל פעם שהאדם טועה, מופיעה תבנית פעילות מיוחדת: פעילות חשמלית חדה ושלילית שהיא חזקה ביותר בחלק העליון של הראש. מאחר

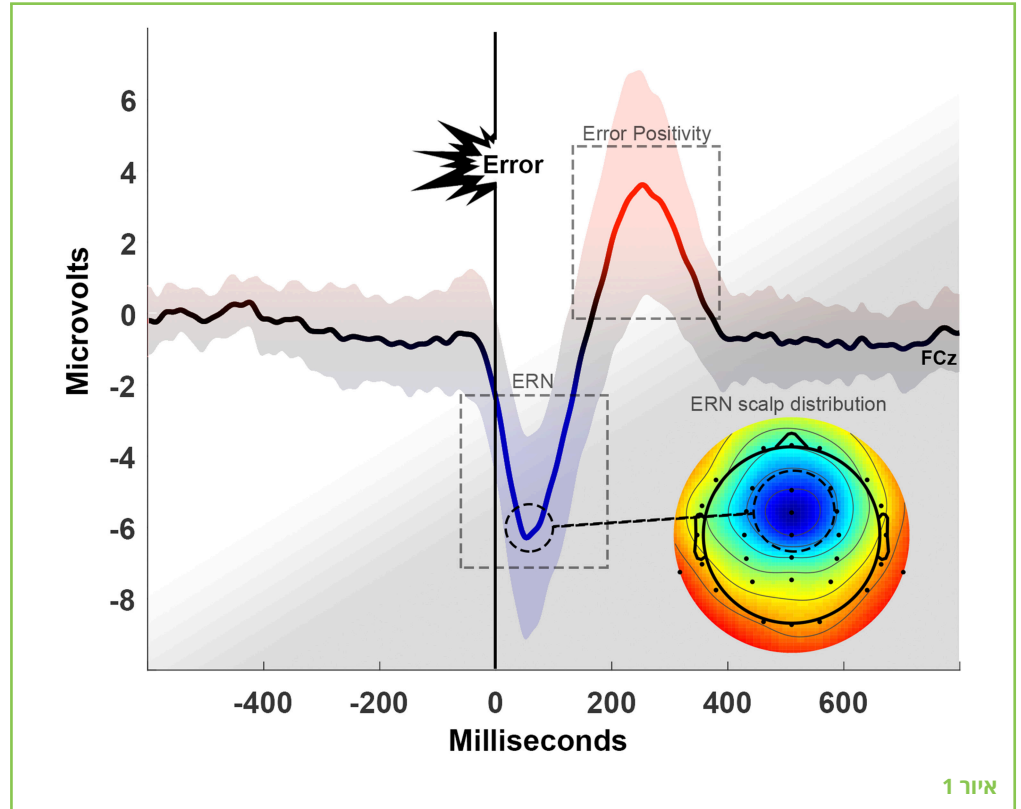
### אלקטרואנצפולוגרפיה (EEG - Electroencephalography)

שיטה לרשום פעילות חשמלית של המוח.

**איור 1**

**שליליות קשורה בשגיאה (ERN) וחיוביות השגיאה.**

תבנית מסוימת בפעילות מוחית ניתנת לצפייה כשאנו מבצעים שגיאה. בגרף, הקו המתפתל מראה את הפעילות המוחית עם הזמן. הקו האופקי מייצג את הזמן שבו השגיאה בוצעה. אתם יכולים לראות שה-ERN (בכחול) מתרחשת כמעט מייד אחרי שהטעות בוצעה, והיא חזקה במיוחד בחלק העליון של הראש, בעוד שחיוביות שגיאה (באדום) מגיעה מעט מאוחר יותר.



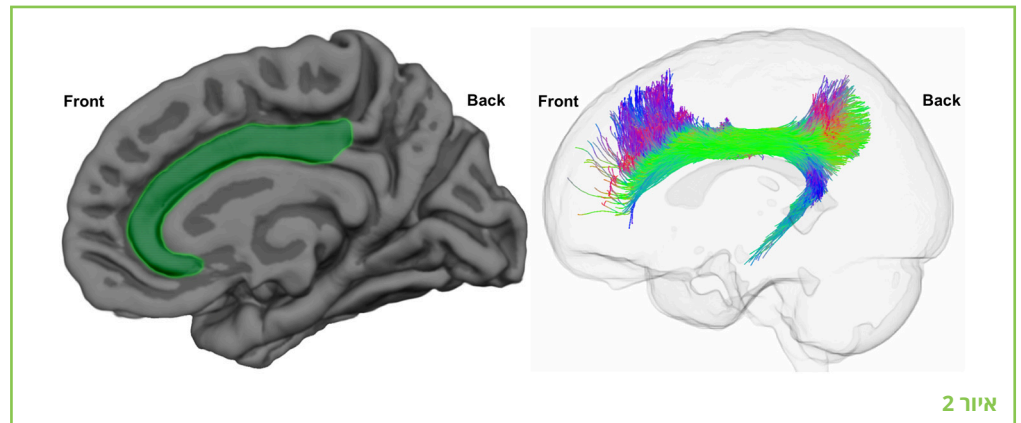
איור 1

**איור 2**

**פיתול החגורה**

**וה-cingulum bundle. משמאל: פיתול החגורה,**

שמוצג בירוק, הוא אזור עמוק בתוך החלק האמצעי של המוח, והוא המקור של ה-ERN. מימין: ה-cingulum bundle, החיבורים הסיביים שנמצאים מתחת לפיתול החגורה, ומחברים בין אזורים שונים במוח (האיור איור על ידי Sila Genc).



איור 2

**שליליות קשורה בשגיאה (ERN - Error Related Negativity)**

פעילות מוחית טעונה שלילית שמתרחשת מהר מאוד אחרי שגיאה, ואשר מאותתת על זיהוי השגיאה ועיבודה.

**פיתול החגורה**

**(Cingulate Cortex)**

אזור במוח עמוק בתוך החלק האמצעי של המוח.

שהפעילות החשמלית הזו טעונה שלילית ומקושרת עם ביצוע טעויות, היא נקראת **שליליות קשורה בשגיאה**, או ERN [1] (איור 1).

ה-ERN נחשבת כמגיעה מאזור עמוק בתוך החלק הקדמי של המוח שנקרא **פיתול החגורה** (איור 2). ה-ERN היא ככל הנראה תוצר של פיתול החגורה שמאתר את השגיאה ושולח אות אזהרה לאזורים אחרים במוח, דרך חיבורים שנקראים **cingulum bundle**, שממקדים את תשומת הלב של האדם כדי להפחית את הסבירות שיתבצעו טעויות חדשות.

דבר מסקרן לגבי ה-ERN הוא המהירות שבו היא מתרחשת אחרי שאתם מבצעים שגיאה. כל כך מהר, למעשה, שהיא קורית לפני שאתם מודעים לטעותכם. ה-ERN בדרך כלל מתרחשת לא יותר מ-100 מילישניות (מילישנייה = אלפית השנייה) אחרי שבוצעה שגיאה. ה-ERN אפילו

### Cingulum Bundle

מערכת עצבית שמכילה אוסף של סיבים שמחברים בין אזורים רבים במוח.

### חיוביות שגיאה

#### (PE - Error Positivity)

פעילות מוחית טעונה חיובית שמתרחשת מ-200 מילישניות אחרי שגיאה, ומעורבת במודעות שלנו לביצוע השגיאה.

יכולה להתרחש כמעט בזמן המדויק שבו השגיאה מתבצעת. בניגוד לכך, לא תרגישו שביצעתם טעות עד לפחות 200 מילישניות מאוחר יותר. זה כאילו שהמוח שלכם יודע שביצעתם טעות לפני ש"אתם" יודעים! ואכן, מדענים חושבים שזה בדיוק מה שקורה. פיתול החגורה משווה את הפעולות שלנו בפועל למה שאנו רוצים לעשות או להשיג, וה-ERN מאותתת לאני המודע שלנו שהפעילות בפועל והתוצאה שציפינו לה אינן תואמות. ה-ERN אם כן מביאה את הטעות או את חוסר ההתאמה הזה לתשומת ליבנו. המודעות בפועל לביצוע הטעות מתרחשת באותו הזמן של אות מוחי מאוחר יותר, שנקרא **חיוביות שגיאה**, שהוא אות חשמלי שמדענים מאמינים שמעורב במודעות שלנו לביצוע טעות.

## כיצד טעויות מסייעות לנו לכוונן את התנהגותנו וללמוד?

הרבה מחקרים מדעיים מצאו שאחרי שמבצעים טעות, אנו מגיבים לאט יותר בסיבוב הבא. זה עשוי להיות בגלל שהמוח מנסה לתת לעצמו זמן רב יותר, כדי להימנע מביצוע אותה הטעות שוב. ככל שה-ERN חזקה יותר אחרי שגיאה, כך התגובה נוטה להיות איטית יותר בסיבוב הבא [3].

לחלק מהאנשים יש ERN גדולה יותר מלאחרים. האם זה אומר שהאנשים האלה רגישים יותר לביצוע טעויות ולומדים יותר מטעויותיהם? חלק מהמחקרים תומכים ברעיון הזה. לדוגמה, Hirsh and Inzlicht [4] מצאו ש-ERN חזקה יותר מקושרת עם ביצועים טובים יותר בבית הספר. במחקרם, החוקרים מדדו את הפעילות המוחית של סטודנטים באוניברסיטה, ומצאו שהסטודנטים שהייתה להם ERN גדולה יותר נטו לקבלציונים טובים יותר.

אולם זה שיש למישהו ERN חזקה יותר זה לא בהכרח תמיד דבר טוב. אנשים שהם יותר חרדתיים נוטים להיות בעלי ERNs חזקות יותר [5], ותגובות מוחיות חזקות מאוד לטעויות מקושרות עם מוסחות גדולה יותר ולא עם מיקוד משופר. אם ה-ERN מראה שהמוח מגיב לטעויות, אז בדרך כלל ERN חזקה עשויה להיות תגובת יתר של המוח, והיותכם מתוסכלים ומבוהלים יותר מביצוע טעות מאשר המידה ההכרחית.

## כיצד אותות שגיאות משתנים כשאנו גדלים?

בילדות ובנערות, הגוף עובר שינויים פיזיים רבים, אולם ישנם גם הרבה שינויים באופן שבו אנחנו חושבים, מרגישים ומתנהגים, ובמוטיבציות שלנו. השינויים האלה, עם האחריויות והציפיות ההולכות וגדלות שאנו ניצבים מולן בחיים, דורשים ניסוי וטעיה חוזרים ונשנים כדי שנוכל ללמוד את הכישורים החברתיים והאקדמיים שאנו זקוקים להם כדי לשגשג כמבוגרים.

מחקרים מראים ש-ERN משתנה עם הגיל, כאשר למבוגרים ולנערים גדולים יותר יש אותות ERN חזקים יותר בהשוואה לילדים [3]. ה-ERN הזו שמתגברת בעוצמה במהלך הילדות והנערות, ככל הנראה קשורה לאופן שבו המוח מתפתח. אזורים שונים במוח מתפתחים במהירויות שונות. חלק מהאזורים במוח הם בוגרים לחלוטין עד לילדות המאוחרת, בעוד שאחרים ממשיכים להתפתח בזמן הבגרות [6]. פיתול החגורה, אשר מייצר את ה-ERN, לא מפסיק להתפתח עד שנות ה-20 המאוחרות. במילים אחרות, אזור במוח שחשוב ללמידה מטעויות מתפתח במשך זמן רב מאוד בהשוואה להרבה אזורים אחרים במוח.

## מסקנות

ביצוע טעויות יכול להיות מעצבן ומתסכל לעיתים. אולם גם חשוב מאוד עבורנו ללמוד מטעויותינו, כך שנוכל לתקן את תגובותינו ולעשות דברים אחרת בפעם הבאה שאנו נמצאים באותן הנסיבות. המוח רגיש מאוד לטעויות, והוא מייצר סוג מסוים של פעילות חשמלית כשאנו מבצעים טעויות, שנקראת ה-ERN. אות השגיאה הזו: (1) מתרחש לפני שאנו מודעים לטעותנו; (2) נעשה חזק יותר כשאנו מתבגרים; ו-(3) יכול לחזות את טיב ביצועינו בבית הספר או באוניברסיטה. יש הרבה דברים שאיננו יודעים עדיין על האופן שבו המוח מגיב לטעויות. ערכת מחקרים נוספים על ERN עשויה לסייע לנו לפתור חלק מהתעלומות האלה.

## תודות

אנו רוצים להודות מקרב לב לאלה שסייעו בתרגום המאמרים באוסף הזה כדי לעשותם נגישים יותר עבור ילדים מחוץ למדינות דוברות אנגלית, ולקרן ג'ייקובס עבור סיפוק הכספים הנדרשים לתרגום המאמרים. בגין המאמר הזה, אנו רוצים להודות לטים יאנסן על התרגום להולנדית. CT נתמך על ידי ועדת המחקר של נורווגיה של נורווגיה (#230345, #288083, #223273) ורשות הבריאות האזורית של דרום-מזרח נורווגיה (#2019069).

## מקורות

1. Tamnes, C. K., Walhovd, K. B., Torstveit, M., Sells, V. T., and Fjell, A. M. 2013. Performance monitoring in children and adolescents: a review of developmental changes in the error-related negativity and brain maturation. *Dev. Cogn. Neurosci.* 6:1–13. doi: 10.1016/j.dcn.2013.05.001
2. Cavanagh, J. F., and Frank, M. J. 2014. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends Cogn. Sci.* 18:414–21. doi: 10.1016/j.tics.2014.04.012
3. Overbye, K., Walhovd, K. B., Paus, T., Fjell, A. M., Huster, R. J., and Tamnes, C. K. 2019. Error processing in the adolescent brain: Age-related differences in electrophysiology, behavioral adaptation, and brain morphology. *Dev. Cogn. Neurosci.* 38:100665. doi: 10.1016/j.dcn.2019.100665
4. Hirsh, J. B., and Inzlicht, M. 2010. Error-related negativity predicts academic performance. *Psychophysiology* 47:192–6. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00877.x
5. Hajcak, G. 2012. What we've learned from mistakes: insights from error-related brain activity. *Curr. Direct. Psychol. Sci.* 21:101–6. doi: 10.1177/0963721412436809
6. Amlie, I. K., Fjell, A. M., Tamnes, C. K., Grydeland, H., Krogsrud, S. K., Chaplin, T. A., et al. 2016. Organizing principles of human cortical development—thickness and area from 4 to 30 years: insights from comparative primate neuroanatomy. *Cereb. Cortex* 26:257–67. doi: 10.1093/cercor/bhu214

פורסם אונליין: 20 באפריל 2022

נערך על ידי: Nienke Van Atteveldt

מנחות מדעיות: Jessie Claire Newville and Iryna Omelchenko

**ציטוט:** Overbye K, Bøen R, Huster RJ and Tamnes CK (2022) למידה מטעויות: כיצד המוח מתמודד עם שגיאות? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.00080-he

Overbye K, Bøen R, Huster RJ and Tamnes CK (2020) Learning From Mistakes: How Does the Brain Handle Errors? Front. Young Minds 8:80. doi: 10.3389/frym.2020.00080

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Overbye, Bøen, Huster and Tamnes 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 למחבר(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.

## סוקרות צעירות

### ASHLEY, גיל: 12

היי אני Ashley! אני אוהבת לרקוד פלמנקו כל יום מאחר שזה כיף וזו פעילות גופנית מצוינת. פלמנקו וחוג משחק הם השיעורים האהובים עליי השנה. אני הולכת לבית ספר שמתמקד לא רק בשיעורים רגילים, אלא גם באומנויות הבמה. בזמני הפנוי אני אוהבת להמציא בדיחות ולשחק במשחקי קלפים עם משפחתי.



### JULIA, גיל: 14

קוראים לי Julia, אני תלמידת כיתה ט מברלין. אני מתעניינת מאוד במתמטיקה, בכימיה ובמדעים, במיוחד במדעי המוח והחלל או במכניקת הקוונטים, אולם אני נהנית גם ללמוד שפות חדשות. בבית אני מדברת עם הוריי באוקראינית מאחר שבמקור אנו מגיעים מאוקראינה, וכמו כן אני לומדת גרמנית, אנגלית וצרפתית בבית הספר. בזמני הפנוי אני אוהבת מאוד לנגן על פסנתר, לרקוד ולקרוא ספרים.



### SAMANTHA, גיל: 15

היי, קוראים לי Samantha! אני אוהבת לקרוא ולכתוב, ועכשיו אני עובדת על כתיבת סיפור ארוך. השיעורים האהובים עליי הם כימיה ואנגלית. בזמני הפנוי אני נהנית להרהר בתעלומות של היקום, להביט לחלל ולכתוב סיפורים.



## הכותבים

### KNUT OVERBYE

Knut הוא פסיכולוג ומדען מוח קוגניטיבי. הוא חקר כיצד מוחות של מתבגרים מגיבים לשגיאות ולהפתעות. כיום הוא חוקר כיצד המוח משתנה פיזית כאשר אנו מתאמנים במשהו במשך זמן רב. גם בעבודה וגם בבית, Knut נהנה מתכנות וממציאת שימושים חדשים למציאות מדומה.



**RUNE BØEN**

Rune הוא עוזר מחקר ומסייע לחוקרים אחרים לערוך ניסויים. הוא מתעניין במוח ובאופן שבו הוא פועל, ורוצה להיות מדען מוח קוגניטיבי בעתיד. הוא נהנה ממדע ומלמידת דברים חדשים. כשאינו בעבודה, הוא אוהב לקרוא ספרים, להקשיב לפודקאסטים ולצפות במשחקי כדורגל.

**RENE J. HUSTER**

René הוא מדען מוח קוגניטיבי שחוקר כיצד המוח מסייע לנו להסתגל לשינויים בסביבה, וכיצד אנו יכולים לתפקד תחת תנאים מאתגרים, כמו למשל כיצד אתם יכולים לעמוד בפיתוי ולא לאכול כרנע עוגייה, אם מבטיחים לכם שתקבלו שלוש עוגיות בעוד חצי שעה? כשאינו בעבודה, הוא אוהב להתאמן בג'ו-ג'יטסו, או בגיטרה בס.

**CHRISTIAN K. TAMNES**

Christian הוא פסיכולוג ומדען מוח קוגניטיבי התפתחותי. הוא חוקר כיצד המוח מתפתח במהלך הילדות והנעורים. הוא גם מתעניין באופן שבו התפתחות המוח גורמת לנו להיות מי שאנחנו. במחקרו, הוא מנסה להבין אם הצורה של המוח ותפקודו המתפתח יכולים להגיד לנו משהו על הסיבה לכך שחלק מהאנשים הם חברותיים מאוד או חכמים, או אפילו מדוע חלק מהאנשים מפתחים מחלת נפש. בזמנו הפנוי, הוא בעיקר מבלה עם שני ילדיו. \*c.k.tamnes@psykologi.uio.no

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