

המוח המתבגר הוא פשוט אדיר

Kathryn L. Mills^{1,2*}, Jeya Anandakumar^{1,3}

¹המעבדה להתפתחות מוחות בהקשר, המחלקה לפסיכולוגיה, המרכז למדעי המוח התרגומיים, אוניברסיטת אורגון, יוג'ין, אורגון, ארצות הברית
²מרכז מחקר פרומנטה, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוסלו, אוסלו, נורווגיה
³האוניברסיטה המדינית של פורטלנד, פורטלנד, אורגון, ארצות הברית

מוח האדם עובר תקופת התפתחות ארוכה. בעוד שהמוח משתנה באופן דרמטי בילדות, ישנם הרבה שינויים במהלך העשור השני של החיים שגורמים לתקופה הזו, הידועה כהתבגרות, להיות אדירה. למתבגרים יש מוחות שמסוגלים להשתנות יותר ממוחות של מבוגרים, ושלא כמו ילדים, למתבגרים יש יכולת גדולה יותר לעצב למעשה את התפתחות המוח. יכולות עיבוד מידע ורגישות חברתית מוגברות במהלך ההתבגרות, גם הופכות את התקופה הזו לתקופה עם יכולת מוגברת לנווט בעולם החברתי המורכב שלנו. מאמר זה דן באופן שבו מדע עכשווי על התפתחות המוח יכול לשמש כדי לחזק מתבגרים כלומדים בעלי מסוגלות ללמוד את העולם שסביבם. נמליץ על האופן שבו סביבות חינוכיות יכולות לטפח את התפתחות המוח ולשפר את סביבת הלמידה במהלך ההתבגרות.

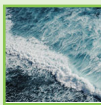
הקדמה

המוח המתבגר הוא **אדיר**, ואנו נסביר למה. התבגרות היא תקופה בחיים שלעיתים קרובות מתחילה עם שינויים גופניים שקשורים לבגרות מינית. אולם המוח גם משתנה בזמן הזה, וממשיך להשתנות אפילו אחרי שאנו מסיימים את ההתבגרות המינית – עמוק לתוך שנות

סוקרות צעירות

ALINE

גיל: 13



ISABELLA

גיל: 13



MARILIA

גיל: 13



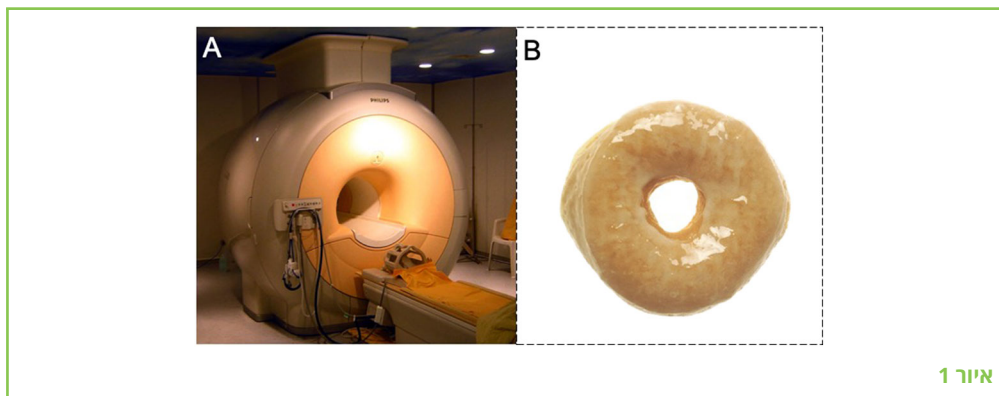
אדיר

(Awesome)

מעורר הערצה, חשש, או פחד גדולים.

איור 1

(A) דימות תהודה מגנטית (MRI) שנראה כמו (B) דונט.



איור 1

העשרים לחיינו [1]! השינויים במוח משתקפים בשינויים בהתנהגות שאנו לעיתים קרובות יכולים לראות במהלך ההתבגרות, כמו למשל רצון לחקור, ליצור קשרים חדשים ולנווט בעולם החברתי המשתנה שלנו.

מבנה המוח משתנה במהלך ההתבגרות

חוקרים משתמשים בשיטה שנקרא **דימות תהודה מגנטית (MRI)**, אשר משתמשת במגנטים ובגלי רדיו, כדי לצלם תמונות של המוח בזמן שהאדם שוכב בתוך מה שנראה כמו דונט ענקי (איור 1). מחקרי MRI יכולים להראות לנו כיצד המוח משתנה במבנה שלו (אנטומיה) ובארגון שלו (כיצד הוא מקושר) במהלך ההתבגרות.

המוח מורכב מהרבה חלקים, אולם כאן אנו נתמקד ברקמות של **המוח הגדול** שהוא האזור הגדול ביותר במוח (איור 2A). המוח הגדול מורכב משני סוגי רקמות שנקראות חומר אפור וחומר לבן. החומר האפור, אשר מורכב מתאי מוח הנקראים **ניורונים**, והקשרים ביניהם, יכול להימצא בחלק החיצוני של המוח הגדול (שנקרא **קליפת המוח**), כמו גם עמוק בתוך המוח הגדול. חומר אפור מכיל את מרבית גופי הניורונים ויוצר אזורים במוח שהכרחיים לתפקוד השרירים, תפיסה חושית, קבלת החלטות ושלטיה עצמית. חומר אפור פוחת במהלך ההתבגרות, בערך ב-1.5% בכל שנה ([1]; איור 2B). אולם ההפחתה הזו אינה דבר רע! ההפחתה בחומר האפור נחשבת קשורה לכוונון עדין של הקשרים בין תאי המוח, וגם קשורה לגדילה ברקמה אחרת במוח הגדול: החומר הלבן.

החומר הלבן במוח הגדול נמצא מתחת לקליפת המוח, ומורכב מסיבים ארוכים של ניורונים, שנקראים **אקסונים**, אשר שולחים אותות שמחברים יחד אזורים שונים במוח. חומר לבן גדל בשנות ההתבגרות הראשונות אולם נראה שהוא מתייצב עד לאמצע שנות הנעורים (איור 2C). העלייה בחומר הלבן נחשבת קשורה לעלייה במהירות האותות שנשלחים בין תאים במוח. איורים אנטומיים של החומר האפור והלבן מוצגים באיור 3.

כיצד ארגון המוח משתנה במהלך ההתבגרות?

חוקרים יכולים להשתמש ב-MRI גם כדי לראות כיצד המוח מאורגן, במונחים של האופן שבו אזורים שונים במוח מחוברים. מאחר שהמוח משתנה כל כך הרבה במהלך ההתבגרות, ארגונו

דימות תהודה מגנטית (Magnetic Resonance Ima)

דרך לסרוק את הגוף ולצלם את החלק הפנימי שלו, למשל את המוח.

המוח הגדול (Cerebrum)

החלק הקדמי של המוח, שמעורב בחשיבה, בהחלטה, ברגש ובאופי.

ניורון (Neuron)

תא עצב.

קליפת המוח (Cortex)

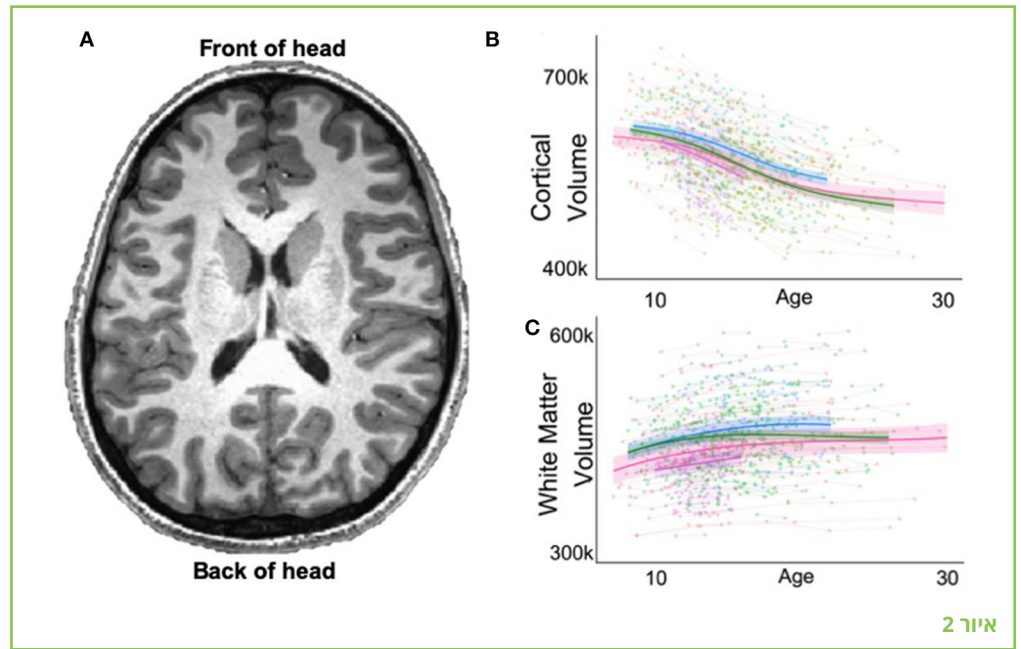
השכבה החיצונית של המוח הגדול, שמורכבת מחומר אפור מקופל.

אקסון (Axon)

חלק דק וארוך של הניורון השולח את האות מקצה אחד של הניורון לקצה השני.

איור 2

(A) תמונה של חלק מהמוח הגדול האנושי, שצולמה על ידי MRI. זהו מבט שמסתכל מהחלק העליון של הראש כלפי מטה אל תוך המוח. הקווים המפותלים סביב לאזורים הלבנים הם חומר אפור של קליפת המוח, והאזורים הלבנים הם החומר הלבן. (B) כמות החומר האפור בקליפת המוח פוחתת במהלך ההתבגרות. (C) כמות החומר הלבן במוח הגדול גדלה במהלך ההתבגרות. גם ב-B וגם ב-C, כל נקודה בגרף מייצגת את מדד המוח של אדם אחד בכל זמן, כפי שנרשם על ידי MRI. הנקודות מחוברות כדי להראות את המדידות שנאספו מאדם אחד. הנתונים נאספו בארבע מעבדות מחקר שונות, וממוצע הנתונים בכל אתר מוצג על ידי ארבעה קווים עבים (האיור נלקח מ-Tamnes et al. [2] ומ-Mills et al. [1]).



איור 2

יכול להיות מושפע ממה שאנו עושים, מהחוויות שלנו ומהסביבות שבהן אנו חיים. המוח הוא רשת גדולה – אזורים שונים במוח מתקשרים אחד עם השני כאשר האדם מבצע תפקודים או התנהגויות שונים, כמו למשל חשיבה על אנשים אחרים או תנועה בעולם. דפוסי התקשורת המוחית האלה יכולים להיחקר באמצעות שיטה מעט שונה, שנקראת דימות תהודה מגנטית תפקודי (fMRI). השיטה הזו בוחנת את כמות החמצן בדם שזורם בתוך המוח, כמדד לפעילות מוחית. כאשר אזורים שונים במוח מראים תבניות דומות של פעילות מוחית, נאמר שהם קשורים מבחינה תפקודית.

התנהגויות טיפוסיות שאנו רואים במהלך ההתבגרות, כמו למשל חשיבה על אנשים אחרים וקבלת החלטות, נראות כקשורות לתבניות שונות של פעילות מוחית בין אזורים שקשורים במוח מבחינה תפקודית. לא לכל המתבגרים יש את אותו ארגון המוח, ולא כל המתבגרים לוקחים חלק בהתנהגויות מתבגרים טיפוסיות. האופן שבו אנשים שונים בתבניות המוחיות שלהם, יכול להיות קשור להבדלים בהתנהגות.

דוגמה אחת להתנהגות שמשתנה במהלך ההתבגרות נקראת **העדפה של הפחתת ערך מושהה**. ההתנהגות הזו קשורה לכמה אנו מוכנים לחכות לתגמולים, ובפרט אם האדם יבחר תגמול קטן יותר שזמין באופן מיידי, או תגמול גדול יותר שהוא או היא חייבים לחכות בשבילו. חקרנו כיצד ההעדפה הזו משתנה במעבר אל ההתבגרות. מצאנו שתבניות של פעילות מוחית שקשורות יחד אזורים במוח שמעורבים בשליטה על ההתנהגות שלנו, ואזורים במוח שמעורבים בהערכת דברים בעולם, קשורות להעדפות הפחתת ערך מושהה של אנשים [3]. בעוד שייתכן כי קיים סטריאוטיפ שלפיו למתבגרים באופן כללי אין סבלנות לחכות לתגמולים גדולים יותר כאשר תגמול קטן יותר זמין באופן מיידי, מחקרנו מצא שאנשים שונים בהתנהגותם, וההבדל הזה קשור לארגון המוחי שלהם.

מחקרי דימות מוחי הראו שהמוח מתארגן מחדש במהלך ההתבגרות. מאחר שהמוחות שלנו משתנים כל כך, החוויה שלנו במהלך ההתבגרות יכולה לסייע לעצב את הארגון

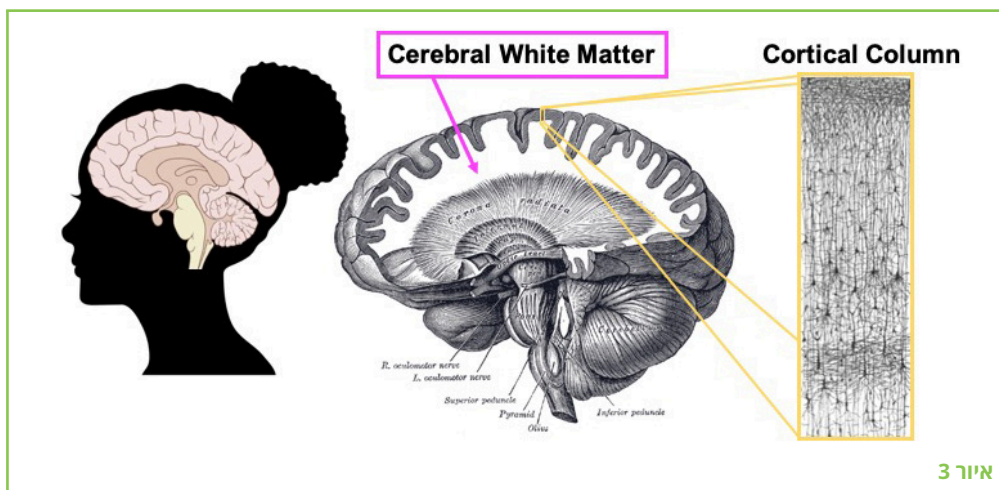
העדפה של הפחתת ערך מושהה (Temporal Discounting Preference)

העדפתו של כל אחד מהפרטים – אם היו בוחרים תגמול קטן יותר בזמן קרוב יותר, או שהיו מוכנים לחכות לתגמול גדול יותר בזמן מאוחר יותר.

איור 3

צללית של ילדה עם תמונה של מוח אנושי שמוצבת מעליה, כדי להמחיש מבט אחר על המוח האנושי. באמצע ישנו ציור של חתך אורך של מוח אנושי, שמראה את החומר הלבן מתחת לקליפת המוח. הפיסות הלבנות מרכיבות את החומר הלבן, כאשר באיור מצויר סט אחד של פיסות חומר לבן (שנקרא קורונה רדיאטה). ציור של עמודת קליפת מוח של מוח מתפתח מוצגת בתיבה הצהובה. האיור הזה מראה כיצד תאי עֶצֶב מסודרים בקליפת המוח, אולם נפח של חומר אפור גם כולל הרבה רכיבים תאיים שאינם מוצגים כאן, כולל תאי גליה וכלי דם. הציורים האלה התקבלו ממאגרים של תמונות לשימוש חופשי:

WikiMedia Commons
Pixabay-I



איור 3

המוחי. על ידי לקיחת חלק בתבניות התנהגות מסוימות, אנו מחזקים תבניות מסוימות של פעילות מוחית. זה יוצר קפיצות בהתקדמות האינטלקטואלית והרגשית שאפשרית במהלך ההתבגרות.

מדוע המוח המתבגר המשתנה מייצג הזדמנות ייחודית

שינויים במבנה המוח ובארגונו במהלך ההתבגרות, גדולים יותר ממה שאנו רואים בשנות הברגרות, אולם פחות גדולים ממה שאנו רואים במהלך הינקות והילדות. אולם שלא כמו בילדות, ההתבגרות היא זמן שבו יש לנו יכולת גדולה לעצב את האופן שבו המוחות שלנו מתפתחים. הסיבה לכך היא שאנו יכולים להבין יותר על עצמנו ועל העולם, יש לנו יותר מוטיבציה ואנו מעורבים יותר, ויש לנו יכולת מוגברת לקבל החלטות שיכולות להשפיע על ההשתנות של המוח. זה מה שגורם למוח של מתבגרים להיות אדיר.

חלק מיכולותיו של המוח שגדלות במהלך ההתבגרות כוללות חשיבה מופשטת, שקילה של נקודות מבט רבות ומסוגלות לחשוב על תהליכי חשיבה. חלק מהמחקרים מציעים שלמתבגרים יש אפילו יכולת גדולה יותר מאשר למבוגרים ולילדים לפתור בעיות בֶּאֱפָּנִים חדשים ויצירתיים כתוצאה מיכולתם לחשוב על תפיסות שונות באותו הזמן [4]. יכולותיו של המוח שכבר נוכחות במהלך ההתבגרות יכולות לשמש כדי לעודד גדילה מוחית בריאה נוספת, אולם זה דורש לאפשר למתבגרים את החופש לקבל החלטות בעצמם. לדוגמה, עידוד מתבגרים להציב לעצמם יעדים, יעודד את הפעילות המוחית שמעורבת ביצירת זהות עצמית ובשקילת השלכות לטווח ארוך. מתבגרים לעיתים קרובות די מודאגים מהאופן שבו הם נתפסים על ידי חבריהם לכיתה. בעוד שההיבט הזה של רגישות חברתית לעיתים קרובות מבוסס עם נימה שלילית של התנהגות מתבגרים, זה למעשה יכול להיות חיובי כאשר הסביבה החברתית בריאה [5]. דוגמה אחרת לרגישות חברתית שגדלה במהלך ההתבגרות קשורה למבנים חברתיים גדולים יותר ולאירועים בעולם [6]. מבוגרים, שלעיתים קרובות הם בעלי יכולת גדולה יותר לשנות את הסביבה החברתית שלהם ביחס למתבגרים, צריכים לדאוג לתת למתבגרים הזדמנויות נוספות לחוות גדילה מוחית חיובית.

מה המורים שלכם יכולים לעשות במטרה לשפר את סביבת הלמידה עבור תלמידים מתבגרים?

מאחר שהמוח יכול להיות מעוצב בקלות רבה כל כך במהלך ההתבגרות, חשוב שמורים והורים יטפחו את המוח המתפתח. שיפור סביבת הלמידה בבית הספר הוא אחת הדרכים האפקטיביות ביותר לתמוך במתבגרים. מה שאנו יודעים על המוח המתפתח הוא שבהשוואה לילדים צעירים יותר, למתבגרים יש יכולת גדולה יותר להבין נושאים מורכבים יותר. הבנה של מה שקורה במוחותיהם יכולה לסייע למתבגרים להשפיע על ההתפתחות של עצמם. דרך אחת שזה יכול להעשות היא על ידי אינטגרציה של נושאים התפתחותיים כמו למשל קבלת החלטות, התמכרות לתרופות, פתרון של קונפליקטים ותכנון חינוכי בתוכנית השיעורים של בית הספר. כאן ישנן דרכים אחרות לשפר את סביבת הלמידה של בית הספר. שקלו לחלוק אותן עם מוריכם!

הפכו את הלמידה לשיתופית ולמגוונת

במקום להתעלם מהמוטיבציה לקיים אינטראקציות חברתיות במהלך ההתבגרות, מורים יכולים לנצל את המוטיבציה החברתית הזו על ידי עידוד קבוצות דיון ומעורבות בקרב תלמידים. בקשת עצות ומשוב מתלמידים על פעילויות בכיתה יכולה לסייע לתלמידים להתעניין ולהיות מעורבים יותר בלמידת הסביבה. שיתוף תלמידים מכיתות שונות יכול לסייע לתלמידים ללמוד כישורים חדשים ולראות את הפרויקט מפרספקטיבות שונות מאחר שתלמידים מקבוצות גיל שונות יכולים לתרום מכישוריהם השונים לדיון או לפרויקט.

שנו את סביבת הכיתה

חשבו על הכיתה שלכם. כיצד השולחנות והכיסאות מסודרים? האם הם מסודרים בשורות ארוכות וישרות, או האם הם מסודרים במעגלים קטנים? עשוי להרגיש מבודד חברתית לשבת בשורות ארוכות ולהיות מסוגלים לראות רק את חברי הכיתה מאחור או מהצד. סוג הסידור הזה של השולחנות ו/או הכיסאות יכול להשתנות במטרה לזמן שיתוף פעולה ולמידה. שקלו לשאול את מוריכם אם הם פתוחים להתנסות עם סידורים חדשים כמו למשל מעגלים קטנים. נוסף על כיבוד המוטיבציה החברתית הפנימית של מתבגרים, ארגון מחדש של רהיטי הכיתה יכול לסייע עם חרדה חברתית, מאחר שעשוי להיות קל יותר לפנות ולדבר עם תלמידים אחרים בקבוצה.

טפחו עצמאות

מורים יכולים לעודד עצמאות בכיתה על ידי כך שיאפשרו לתלמידים להוביל את הדרך. זה כולל לאפשר לתלמידים להמציא חלק מהסילבוס, או את הקווים המנחים של פרויקט. אפשר לתלמידים לחקור במה הם מתעניינים יניע למידה. כאשר תלמידים מסוגלים ליצור את הקווים המנחים של עצמם ולהתגבר על קשיים דרך עבודה קשה ושיתוף פעולה, הם יהיו מוכנים יותר לקחת על עצמם אתגרים חדשים ולשגשג במצבים קשים.

תקשרו עם הקהילה

סביבת הכיתה הטיפוסית עשויה להיות מלאכותית ומובנית מדי. תלמידים צריכים להיות מעודדים לשתף פעולה עם העולם שמחוץ לכיתה. טיולי שטח קהילתיים עשויים לסייע לתלמידים להכיל על העולם האמיתי דברים שהם למדו בכיתה. זה משלים את הרגישות המוגברת לעולם החברתי של כל אדם המתרחשת במהלך ההתבגרות.

מה זה אומר עבורכם?

התבגרות היא תקופה של גדילה, התפתחות ולמידה מהירות. זה יוצר הזדמנות ייחודית לכך שלמתבגרים תהיה יכולת לעצב בפועל את ההתפתחות המוחית שלהם. אנו יכולים לחזק תבניות מסוימות של הפעילות המוחית שלנו על ידי מעורבות בסוגי התנהגות מסוימים. אחת הדרכים שבהן אתם יכולים להיות מעורבים בהתפתחותכם היא על ידי למידה והבנה של מה שקרה במוחכם. אדיר, נכון?

תרומות המחברות

KM יצרה את השלד למאמר. KM ו-JA כתבו את המאמר.

תודות

אנו רוצות להודות לסוקרים ולעורכים של המאמר הזה על הערותיהם והצעותיהם המועילות. KM רוצה להודות לסליו מיטשל ולג'רום מיטשל עבור ההשראה. אנו רוצות להודות גם לאלה שסייעו בתרגום המאמרים באוסף הזה כדי לעשותם נגישים יותר עבור ילדים מחוץ למדינות דוברות אנגלית, ולקרן ג'ייקובס על סיפוק הכספים הנדרשים לתרגום המאמרים. בגין המאמר הזה, אנו רוצות להודות במיוחד לניינקה ון-אטבלדט ולסאבין פיטרס על התרגום להולנדית.

מקורות

1. Mills, K. L., Goddings, A. L., Herting, M. M., Meuwese, R., Blakemore, S. J., Crone, E. A., et al. 2016. Structural brain development between childhood and adulthood: convergence across four longitudinal samples. *Neuroimage* 141:273–81. doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.07.044
2. Tamnes, C. K., Herting, M. M., Goddings, A. L., Meuwese, R., Blakemore, S. J., Dahl, R. E., et al. 2017. Development of the cerebral cortex across adolescence: a multisample study of inter-related longitudinal changes in cortical volume, surface area, and thickness. *J. Neurosci.* 37, 3402–12
3. Anandakumar, J., Mills, K. L., Earl, E. A., Irwin, L., Miranda-Dominguez, O., Demeter, D. V., et al. 2018. Individual differences in functional brain connectivity predict temporal discounting preference in the transition to adolescence. *Dev. Cogn. Neurosci.* 34:101–13. doi: 10.1016/j.dcn.2018.07.003

4. Stevenson, C. E., Kleibeuker, S. W., de Dreu, C. K. W., and Crone, E. A. 2014. Training creative cognition: adolescence as a flexible period for improving creativity. *Front. Hum. Neurosci.* 8:827. doi: 10.3389/fnhum.2014.00827
5. Telzer, E. H. 2016. Dopaminergic reward sensitivity can promote adolescent health: a new perspective on the mechanism of ventral striatum activation. *Dev. Cogn. Neurosci.* 17:57–67. doi: 10.1016/j.dcn.2015.10.010
6. Sherrod, L. 2007. "Civic engagement as an expression of positive youth development," in *Approaches to Positive Youth Development*, eds R. K. Silbereisen and R. M. Lerner (London: SAGE Publications Ltd), 59–74. doi: 10.4135/9781446213803

פורסם אונליין: 20 באפריל 2022

נערך על ידי: Sabine Peters

מנחות מדעיות: Aikaterini Dounavi and Carmen Flores Nakandakare

ציטוט: Mills KL and Anandakumar J (2022) המוח המתבגר הוא פשוט אדיר. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00075-he

תורגם והותאם: Mills KL and Anandakumar J (2020) The Adolescent Brain Is Literally Awesome. *Front. Young Minds* 8:75. doi: 10.3389/frym.2020.00075

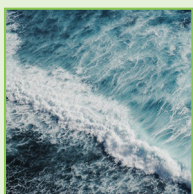
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © Mills and Anandakumar 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.

סוקרות צעירות

ALINE, גיל: 13

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



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, טבע ומדע, במיוחד בכל מה שקשור לחלל, לזמן ולחומר. בעתיד, אני רוצה להיות מהנדסת אווירונאוטיקה או ארכיטקטית. אני תמיד סקרנית מאוד ללמוד עוד על העולם שסביבנו.



**MARILIA, גיל: 13**

היי! קוראים לי Marilia. אני בת 13, אוהבת החלוקה על קרח, התאמנות אומנותית ריתמית ולשחק כדורגל. יש לי כלב קטן שאני אוהבת! יום אחד אֶרְצֶה לטייל לאוסטרליה ולראות קואלות. אני נהנית להיות עם חברים שלי וללכת איתם לשחות או לראות סרטים.

הכתבות**KATHRYN L. MILLS**

Kate Mills היא פרופסורית במחלקה לפסיכולוגיה באוניברסיטת אורגון. היא חוקרת כיצד המוח משתנה מהילדות לבגרות, וכיצד אנו מפתחים אסטרטגיות כדי לשגשג בסביבה המסוימת שלנו. היא מבלה את כל זמנה הפנוי עם משפחתה, חוקרת ונהנית ממקומות יפהפיים סביב ביתה ביוג'ין, אורגון.
*klmills@uoregon.edu

**JEYA ANANDAKUMAR**

Jeya Anandakumar היא סטודנטית לתואר ראשון באוניברסיטה המדינית של פורטלנד בפורטלנד, אורגון. היא לומדת תואר ראשי בביוכימיה ותואר משני בכימיה עם דגש על מדעי המוח. תחומי המחקר שלה כוללים את מדעי המוח ההתפתחותיים וניוירוגנטיקה. בעבר היא הייתה סוקרת צעירה של פרונטז'ו – מדע לצעירים. בזמנה הפנוי, היא נהנית לנגן על חליל ולהשתתף בשיעורי ריקוד.



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



הוצאת פרונטז'ו מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK