

## בניית כבישים בעיר המוחית שלכם

Daniel Simmonds<sup>1</sup>, Margot Goldberg<sup>2</sup>, Beatriz Luna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>אוניברסיטת פיטסבורג, פיטסבורג, פנסילבניה, ארצות הברית

<sup>2</sup>מרכז המדע King K-8 Carnegie בפיטסבורג, פיטסבורג, פנסילבניה, ארצות הברית

<sup>3</sup>המרכז לחקר המוח באוניברסיטת פיטסבורג, פיטסבורג, פנסילבניה, ארצות הברית

### סוקרים צעירים

ALANYA

גיל: 12



JANELLE

גיל: 9

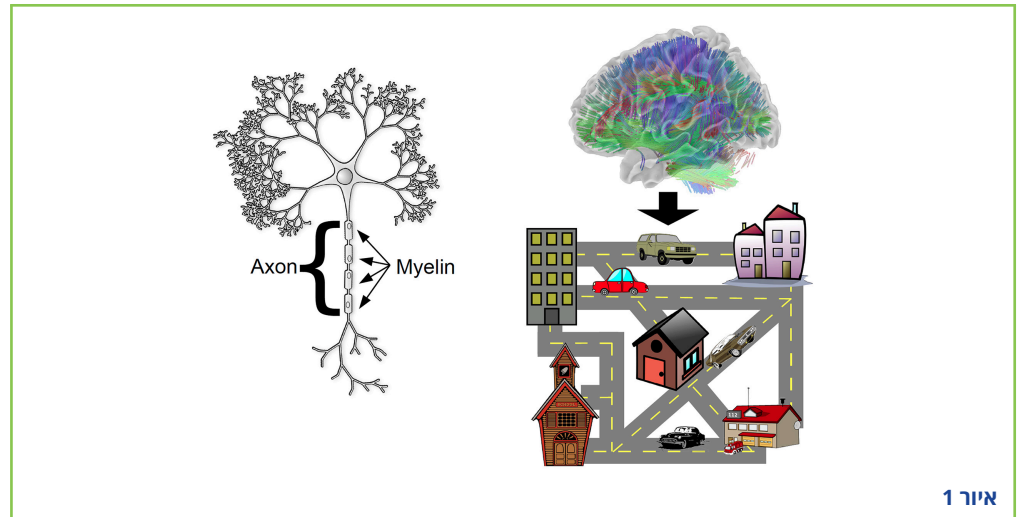


"האם אתם מוכנים להיכנס לתוך החללית? זיכרו להישאר דוממים מאוד!" זה מה שאתם שומעים לפני שהמיטה שאתם שוכבים עליה מחליקה לתוך מכונה ארוכה בצורת גליל. אתם כמעט יכולים לדמיין שזו חללית, ואתם, עם הקסדה שלראשכם, האוזניות ומסך הצפייה הקטן, הטייסים שעומדים להמריא אל החלל החיצון! סרט החלל האהוב עליכם מתחיל להתנגן על המסך, והמכונה נדלקת ומשמיעה קולות חזקים כמו "באפ- באפ-בליפ", ואתם מדמיינים שאתם בקרב בין חלליות. אולם זו אינה חללית אלא מכונה מיוחדת שנקראת סורק דימות תהודה מגנטית של המוח (MRI – Magnetic Resonance Imaging), והיא תצלם מאות תמונות של המוח שלכם אשר יעזרו לנו לראות כיצד המוח שלכם פועל וממה הוא מורכב.

המוח שלכם הוא מרכז הבקרה של הגוף שלכם; כל תנועה, מחשבה ורגש שאתם חווים מנהלים על-ידי המוח שלכם. אולם כיצד המוח עושה זאת? פעולות המוח מתבצעות על-ידי תאי עצב (נוירונים), סוג של תאים אשר נראים כמו עץ בעל הרבה ענפים שמסתעפים לכל הכיוונים (הסתכלו בצד שמאל של איור 1 כיצד נראה תא עצב). מחשבות ופעולות מתרחשות כאשר תאי העצב "מדברים" זה עם זה. בכל רחבי הגוף שלכם ישנם תאי עצב, והם כל הזמן מקבלים מידע על העולם שסביבכם. תאי העצב שבעור שלכם מאפשרים לכם להרגיש את

## איור 1

משמאל: איור של תא עצב שנראה כמו עץ, בעל סיב עצבי בשם אקסון (Axon) שדרכו עוברות הודעות חשמליות לתאים שכנים. האקסון עטוף במעטפת שומנית הקרויה מיאלין (Myelin) ותפקידה לשפר באמצעות בידוד את מעבר ההודעות החשמליות בין התאים. מימין: המחשה של החיבורים במוח שנראים כמו כבישים בתוך עיר. בחלק העליון אפשר לראות תמונה של המוח שבה הקשרים בין תאי העצב מוצגים כצינוריות צבעוניות. בחלק התחתון של התמונה אפשר לראות בניינים, כבישים ומכוניות. ישנם הרבה קשרים במוח, בדיוק כפי שישנם הרבה כבישים בעיר שמאפשרים לאנשים להגיע להיכן שהם רוצים.



הדברים שאתם נוגעים בהם, תאי עצב בעין שלכם "נדלקים" על-ידי האור ומאפשרים לכם לראות, ותאי עצב בתוך האוזניים שלכם פועלים כשאתם שומעים רעשים סביבכם. ישנם אפילו תאי עצב באף שלכם שמגיבים עם כימיקלים שנמצאים באוויר, כך שאתם יכולים להריח, ובלוטות הטעם שלכם פועלות יחד עם תאי עצב בלשון ששולחים למוח את אותות הטעם של המאכל האהוב עליכם. כל תאי העצב האלה בגוף שלכם "מדברים" עם תאי עצב אחרים, וכולם מחוברים למוח שלכם. בתוך המוח שלכם כל המידע שנאסף ממין, ומעצב את הדרך שבה אתם חווים את העולם. אתם יכולים לחשוב על המוח שלכם כעל עיר שבה תאי העצב הם הבתים והבניינים, וההודעות שמועברות ביניהם הן כמו מכוניות שמסיעות אנשים ממקום למקום (הסתכלו בצד ימין של איור 1 כדי לראות המחשה של הדימוי הזה). במאמר זה אנו נספר לכם על האופן שבו הכבישים האלה, שנדרשים להעביר הודעות חשובות, נעשים טובים ומהירים יותר כשגדלים, מה שמאפשר לעיר המוחית שלכם להשתפר ולבצע פעולות מורכבות יותר עם הזמן.

דוגמה לשיחה שתאי העצב מקיימים זה עם זה קשורה בזיכרון של משהו שלמדתם למבחן בבית הספר, כמו למשל השיר "הכניסיני תחת כנפך" של חיים נחמן ביאליק. ראשית, תאי העצב באוזן שלכם שומעים את צלילי הקול של המורה שלכם, מקודדים ושולחים אותם אל תאי העצב במוח שלכם, כך שהצלילים הופכים למילים ואתם יכולים להבין את מה שהמורה אומר/ת. בינתיים, אתם עשויים גם להסתכל על הלוח ולכתוב את המילים שהמורה קוראת, וההודעות האלה מהעיניים ומהידיים שלכם מקודדות ונשלחות גם הן אל המוח שלכם. המידע הזה נחלק בין תאי עצב שונים במוח, כך שבסופו של דבר אתם מצליחים לזכור את השיר. מאוחר יותר, כשאתם נבחנים על החומר שלמדתם בכיתה, תאי העצב שאחראים על זיכרון במוח שלכם שולחים הודעות לתאי עצב אחרים, אשר מעבירים אותן הלאה לתאי העצב שמורים ליד שלכם לנוע באופן שמתאים לכתובת התשובה הרצויה. ילדים צעירים עשויים להיות מסוגלים לאגד את כל פיסות המידע האלה שהמורים מספקים להם, אולם עשוי להיות להם קשה יותר מאשר ילדים מבוגרים לזכור את המידע הזה בזמן מאוחר יותר, ולשלוף אותו בזמן מבחן. משמעות הדבר עשויה להיות שהקשרים של תאי העצב עם האוזניים, העיניים והידיים כבר מפותחים אצל ילדים צעירים, בעוד שהקשרים עם תאי העצב שקשורים בזיכרון משתפרים בעת ההתבגרות.

מה קורה לקשרים האלה בין תאי העצב כאשר מתבגרים? כשתאי עצב מתקשרים זה עם זה הם לא משתמשים במילים; במקום זאת, הם שולחים אותות חשמליים דרך צינור או "כביש" שנקרא אקסון (הסתכלו באיור 1 משמאל כדי לראות היכן האקסון ממוקם בתא העצב). האקסונים האלה יכולים להיות ארוכים מאוד, כאשר הארוך ביותר מביניהם עובר ממעלה הגב שלכם למטה עד לבוהן שלכם, והמידע עשוי להיאבד בדרך, במיוחד אם הוא צריך לעבור מרחק גדול מדי. כדי לפתור את הבעיה הזו ישנו כיסוי, או בידוד, על האקסון מסביב לצינוריות שלו, שמסייע למידע להגיע להיכן שהוא מיועד להגיע. דברים רבים שאנו רואים ביומיום מכילים בידוד – האם אתם יכולים לחשוב עליהם? הבידוד של תאי העצב שלנו הוא שומן מיוחד שנקרא מיאלין, שמסייע להודעות החשמליות לנוע מהר מאוד למקום שאליו הן צריכות להגיע. בעיר המוחית שלנו, כפי שמוצגת לדוגמה באיור 1 מימין, הגדלת כמות המיאלין שקולה לזיפות של כביש במטרה להבטיח שהרבה מכוניות יוכלו לנסוע עליו, ומהר. כשאתם צעירים, האקסונים שלכם הם כמו כבישי עפר שאי אפשר לנסוע עליהם מהר. הוספת מיאלין סביב לתאים היא כמו זיפות של הכבישים האלה כך שמכוניות (הודעות חשמליות) יכולות לנסוע מהר יותר ולהעביר במהרה מידע רב יותר לחלקים שונים במוח שלכם. במילים אחרות, סיבי העצב שלכם שמכילים כמות גדולה של מיאלין יכולים לתקשר אחד עם השני מהר יותר מאשר האקסונים שאין להם בידוד רב.

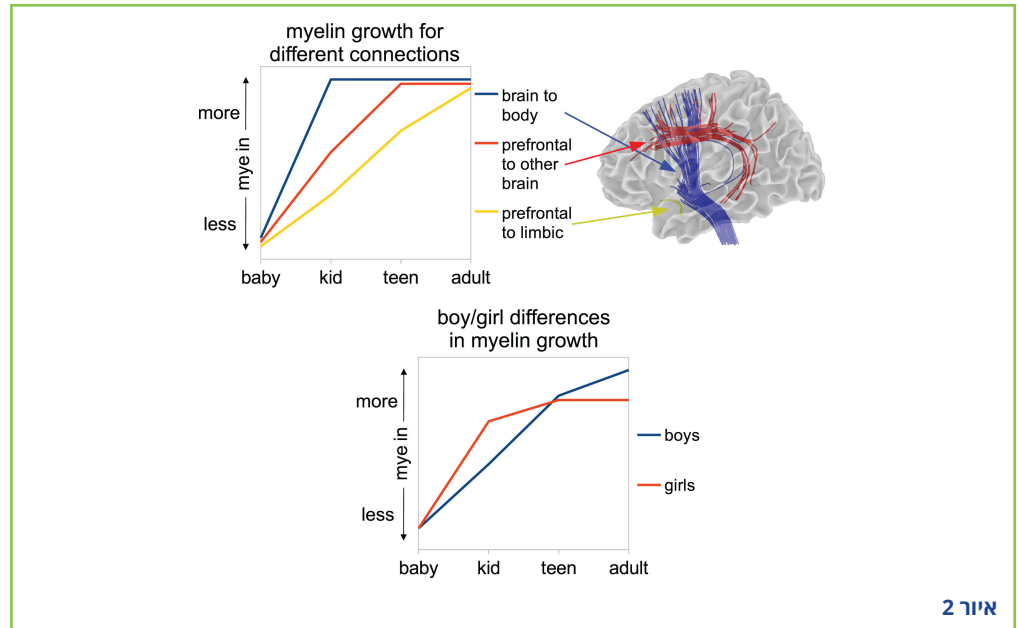
מדענים יודעים זה זמן רב שכמות המיאלין המבודד גדלה במוח ככל שאנשים מתבגרים [1]. אולם בעבר מדענים מצאו זאת באמצעות חקירת המוחות של אנשים שמתו, ובאופן זה אי אפשר היה לקבל מידע רב על המוחות של ילדים ומתבגרים בעודם בחיים. זה השתנה כאשר הומצאו סורקי ה-MRI שהזכרנו קודם, מאחר שהם מאפשרים לנו לצלם תמונות של המוחות שלכם בעודכם בחיים. סוג מיוחד של סריקת MRI נקרא דימות טנזור הדיפוזיה (DTI – Diffusion Tensor Imaging), והוא מאפשר לנו להסתכל על האקסונים במוח שלכם [2], כולל על מעטפת המיאלין שלהם, וכך אנו יכולים לראות כיצד הם משתנים כשאתם גדלים.

בימים אלה, כשכבר מתאפשר להסתכל על הקשרים במוחות חיים באמצעות סריקות DTI, ערכנו מחקר שמטרתו לראות כיצד הקשרים במוח שלכם משתנים כאשר אתם גדלים. החלטנו לחקור ילדים מגיל 8 ומעלה ומתבגרים, שאף על פי שהם עשויים להיות חכמים מאוד ומסוגלים לעשות דברים רבים שמבוגרים עושים, הם עדיין עושים גם הרבה דברים טיפשיים שעשויים ליצור בעיות [3]. האם אתם מכירים בני נוער שעושים מעשים מטופשים? חקרנו גם מבוגרים עד גיל 30, כך שיכולנו להשוות בין המוחות שלהם למוחות של ילדים ושל מתבגרים. מאחר שבנים ובנות שונים זה מזה במובנים מסוימים, הסתכלנו גם אם הקשרים במוחות שלהם שונים זה מזה גם כשהם גדלים. הסתכלנו על קשרים שונים רבים במוח ומדדנו מתי הם סיימו להתפתח ונראו כמו קשרים של מבוגרים. בהתבסס על מה שכבר למדנו, האם אתם חושבים שכל המיאלין גדל בכל מקום במוח באותו הזמן, או שהגדילה שלו מתרחשת בזמנים שונים במקומות שונים?

אם ניחשתם שהגדילה מתרחשת בזמנים שונים, אתם צודקים! אתם יכולים להסתכל באיור 2 שבו מוצג תרשים אשר מסכם את התוצאות שמצאנו. כפי שאתם יכולים לראות, חלק מהקשרים שהסתכלנו עליהם כבר היו קשרים בוגרים לפני גיל 8 (איור 2, למעלה, בכחול). הקשרים האלה כללו את הקשרים שהזכרנו קודם בין המוח לבין אזורים אחרים בגוף שלכם, שהם חשובים עבור פעולות כמו התבוננות בתמונה, חישת קור וגירוד האף שלכם. האם יש לכם אח או אחות שהם

## איור 2

תוצאות המחקר שביצענו. למעלה: גדילת המיאלין (ציר Y) כתלות בשלב הבגרות של הנבדק (ציר X) עבור שלושה סוגי קשרים: בין המוח לבין הגוף (בכחול), בין אזור במוח הקדם-מצחית לבין אזורים אחרים במוח (באדום), ובין קליפת המוח הקדם-מצחית לבין המערכת הלימבית (בצהוב). מצד ימין של הגרף ישנה דוגמה של קשרים כאלה במוח, באתם הצבעים שמופיעים בגרף, וחיצים שמצביעים מהתרשים אל המוח. למטה: גדילת המיאלין (ציר Y) כתלות בשלב הבגרות של הנבדק (ציר X) עבור בנים (בכחול) ועבור בנות (באדום).



איור 2

Myelin growth for = different connections  
גדילת מיאלין בקשרים שונים  
Boy/girl difference in Myelin growth – הבדלי בן/בת בגדילת מיאלין  
Baby = תינוק  
Kid = ילד  
Teen = נוער  
Adult = מבוגר  
Boys = בנים  
Girls = בנות

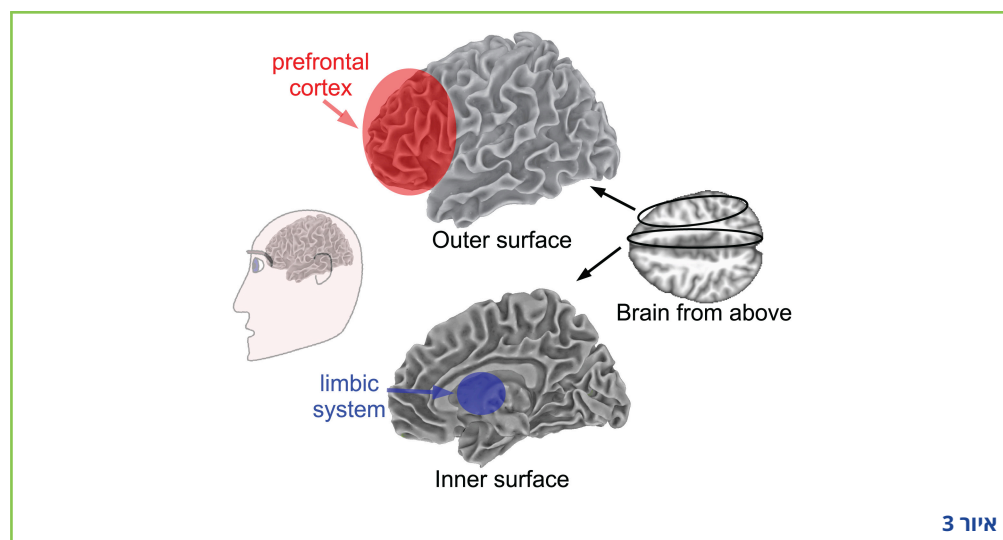
בני פחות מ-8? האם אלה נשמעות כמו פעולות שהם מסוגלים לעשות? אפשר לראות באיור שהקשרים בין המוח לבין הגוף מגיעים למצב בוגר כבר אצל ילדים (בכחול), קשרים מקליפת המוח הקדם-מצחית אל אזורים מוח אחרים מפסיקים להשתפר אצל בני נוער (באדום), וקשרים מקליפת המוח הקדם-מצחית אל המערכת הלימבית ממשיכים להשתפר אפילו אצל מבוגרים (בצהוב). כמו כן, אפשר לראות שאצל בנים לוקח לקשרים זמן רב יותר להשתפר מאשר אצל בנות, אולם בתור מבוגרים הקשרים שלהם בממוצע חזקים יותר (איור 2, למטה).

מרבית הקשרים במוח ממשיכים להשתפר אפילו במוחות של מתבגרים. רבים מהקשרים האלה מתחברים אל קליפת המוח הקדם-מצחית, שאחראית על ארגון המידע אשר מסתובב במוח שלכם, כך שאפשר יהיה להחליט מה לעשות ולהפעיל את הגוף בהתאם (הסתכלו באיור 3 כדי לראות היכן ממוקמת קליפת המוח הקדם-מצחית). האם זה מפתיע אתכם? אם הייתם נותנים את אותו המבחן הקשה במתמטיקה לילד בן 10 או למתבגר בן 16, מי לדעתכם היה מצליח יותר? ככל הנראה הייתם מנחשים שבן ה-16 יצליח יותר, וחלק מהסיבה לכך עשוי להיות טמון בעובדה שהחיבורים אל קליפת המוח הקדם-מצחית של בן ה-16 מכילים יותר מיאלין, מה שמסייע לאותו האזור "לדבר" עם אזורים אחרים במוח אשר מקלים על ריכוז תשומת הלב וגורמים לאזורים נוספים לפעול בהתאם לפעולות שנדרש לבצע.

הממצא המפתיע והמרגש ביותר במחקר שלנו היה שאחדים מהקשרים במוח המשיכו לגדול אפילו אצל מבוגרים! הכבישים האלה מחברים בין תאי עצב של קליפת המוח הקדם-מצחית, אשר מסייעים לנו בתהליך המחשבה, לבין תאי עצב במערכת הלימבית שממוקמת עמוק בתוך המוח (ראו איור 3 למטה), אשר קשורים בתהליכים רגשיים. האם אי פעם נסעתם ברכבת הרים וחשתם נרגשים או מפוחדים, או שאכלתם שוקולד והרגשתם הנאה מהטעם שלו? האם אי פעם התרגזתם על ההורים או על חברים שלכם כשהם לא עשו מה שרציתם שהם יעשו? אתם מסוגלים לחוות את כל הרגשות האלה מאחר שהמערכת הלימבית שלכם נעשית מעוררת בתגובה לנסיבות מסוימות. אולם לעיתים אנו רוצים לשלוט על הרגשות שלנו, למשל במטרה לעצור את עצמנו מלפגוע במישהו אחר שהרגיז אותנו. ברגעים כאלה באים לידי ביטוי

### איור 3

המחשה של מבנה המוח, כאשר פני השטח החיצוניים מוצגים למעלה ופני השטח הפנימיים מוצגים למטה. את אזורי המוח שהזכרנו במאמר, כאשר קליפת המוח הקדם-מצחית מסומנת באדום, והמערכת הלימבית מסומנת בכחול. משמאל אפשר לראות את מיקום המוח בתוך הגולגולת. מימין מוצגת המחשה של המוח במבט מלמעלה, ומסומנים עליה מיקומי פני השטח החיצוניים (המוגדלים במעלה התמונה) ופני השטח הפנימיים (המוגדלים בתחתית התמונה).



איור 3

הקשרים בין קליפת המוח הקדם-מצחית לבין המערכת הלימבית, כך שהחשיבה המודעת על אופן הפעולה הרצוי יכולה למנוע את הפעולה שהייתה מתרחשת כתוצאה מתגובה רגשית אוטומטית, ובכך לוודא שאתם פועלים באופן שמרגיש עבורכם נכון וראוי. מאחר שהמיאלין שעוטף את הקשרים האלה ממשיך לגדול גם כאשר אתם לומדים באוניברסיטה, ואפילו בשלבים מאוחרים יותר, העובדה שאיננו מפותח לגמרי אצל מבוגרים עשויה להיות שותפה בהסבר התנהגויות של חוסר שליטה רגשית אצל מבוגרים.

לבסוף, כפי שצינו קודם, הסתכלנו במחקר שלנו גם על האופן שבו הקשרים במוח שונים אצל בנים ואצל בנות בזמן תהליך ההתבגרות שלהם. מצאנו שעבור קשרים רבים, במיוחד אלה שבקליפת המוח הקדם-מצחית, הכבישים של הבנות נראים בוגרים שנים אחדות לפני אלה של הבנים. אם את נערה שקוראת את המילים האלה, ייתכן שאינך מופתעת! סיבה אחת להבדל הזה עשויה להיות שבנות מתחילות את שלב ההתבגרות המינית (השלב שבו הגוף משתנה ומתחיל להרגיש בוגר) כמה שנים לפני בנים. במילים אחרות, שינויים בקשרים האלה עשויים להיות קשורים להתבגרות המינית. אולם עד לשלב הבגרות הכבישים של הבנים המשיכו לגדול ונעשו בסופו של דבר גדולים יותר מהקשרים של הבנות. אז כולם מנצחים!

בשלב זה אתם עשויים לומר לעצמכם: "זה מגניב, אבל למה זה חשוב?". אם כן, אחת הסיבות העיקריות למחקר על האופן שבו המוח פועל בגילאים שונים היא לצורך שיפור ההוראה בבתי הספר באמצעות התאמת השיעורים ליכולות של הילדים. התקווה היא שהתאמה זו גם תסייע ליצור שיעורים מהנים יותר! נוסף על כך אנו יודעים שחלק מהאנשים חווים קשיים כמו אוטיזם או דיכאון, שיכולים להתבטא במהלך הילדות או הנערות. האם אתם מכירים אנשים שסובלים מקשיים כאלה? לרוע המזל, עדיין איננו יודעים כיצד ומדוע הלקויות האלה מתרחשות, אולם אנו חושבים שהן עשויות להיות קשורות לחיבורים במוח שאינם מתפתחים כראוי. באמצעות חקירת המוחות של אנשים שאינם חווים קשיים כאלה אנו יכולים ללמוד גם על המוחות של אנשים שזקוקים לעזרה, ולהבין כיצד לעזור להם. מוסר ההשכל החשוב ביותר של הסיפור הזה הוא שכאשר אתם גדלים המוח שלכם משתנה כך שהכבישים שאתם הכי זקוקים להם משתפרים, מה שמסייע לכם להפוך להיות טובים במה שאתם צריכים (כמו למשל בשפה שבה אתם

מדברים), בעוד שהכבישים הפחות חשובים מתפתחים לאט יותר. אתם יודעים כעת שכאשר אתם צעירים הקשרים שמסייעים לכם לשלוט בתגובות שלכם אינם מהירים מאוד, כך שאתם עשויים להתרגז ולומר משהו שתצטערו עליו מאוחר יותר. כשאתם גדלים, הכבישים שמסייעים לכם לחבר בין הפעולות והמחשבות לעתיד מתחזקים, ומסייעים לכם להתנהג בצורה טובה יותר ולהפוך למבוגרים נפלאים.

## מקורות

1. Yakovlev, P. I., and Lecours, A. R. 1967. "The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain," in Regional Development of the Brain in Early Life, ed A. Minkowsky (Oxford: Blackwell Scientific), 3–70.
2. Douek, P., Turner, R., Pekar, J., Patronas, N., and Le Bihan, D. 1991. MR color mapping of myelin fiber orientation. J. Comput. Assist. Tomogr. 15:923–9. doi: 10.1097/00004728-199111000-00003
3. Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., and Sweeney, J. A. 2004. Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. Child Dev. 75:1357–72. doi: 10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x

פורסם אונליין: 18 בינואר 2019

נערך על ידי: Robert T. Knight, University of California, Berkeley, USA

**ציטוט:** Simmonds D, Goldberg M and Luna B (2019) בניית כבישים בעיר המוחית שלכם. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2014.00017-he

### תורגם והותאם:

Simmonds D, Goldberg M and Luna B (2014) Building the roads in the city of your brain. Front. Young Minds 2:17. doi: 10.3389/frym.2014.00017

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

**COPYRIGHT** © Simmonds, Goldberg and Luna 2014. 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

**ALANYA, גיל: 12**

אני אוהבת לקרוא, לקנות בגדים ולשחק במשחקי וידאו. אני אוהבת לאכול גלידה, פיצה, כנפי עוף ומאכלים חריפים! אני אוהבת להיות עורכת מאחר שכך אני זוכה ללמוד דברים חדשים על מדע.





## JANELLE, גיל: 9

אני אוהבת לשחק בלגו, לעצב ולארגן דברים כמו חדר השינה שלי. אני אוהבת לאכול סרטנים, אבל אני אלרגית אליהם! אני אוהבת מאוד מדע, ויום אחד ארצה ללמוד רפואה. להיות עורכת של כתבות שעוסקות בחקר המוח זה ממש כיף ומעניין.

## הכותבים

### DANIEL SIMMONDS

אני מדען מוח וסטודנט לרפואה בפיטסבורג, פנסילבניה, ארצות הברית. אני חוקר כיצד מתפתחים מוחות של ילדים וכיצד הם משתנים במהלך ההתבגרות, ואני מקווה להיות נירולוג ילדים שמטפל בילדים עם לקויות מוחיות. יש לי גם תחביבים רבים, כולל נגינה על גיטרה ועל יוקללה, בניית מכשירים אלקטרוניים (הלחמה זה כיף!), אימון ביוגה ובילוי עם אשתי מרגוט, הכלבה שלנו סאלי והחתול שלנו ז'אן-קלוד.

### MARGOT GOLDBERG

לומדת עצמית ותיקה ומעריצה של מדע, אשר עבדה על בעיות שונות בביוכימיה. היא חקרה תותים ובחנה את הכרומוזומים שלהם, עבדה על פיתוח חיסון נגד מחלת האיידס (נגיף HIV) בדרום אפריקה וחקרה את החלבון הסוכך (Chaperone), אשר מסייע לחלבונים אחרים לבצע את עבודתם בתוך התא. כיום היא לומדת להיות מורה לביוכימיה בבית ספר תיכון, ומקווה להפיץ לתלמידים את אהבתה למדע! כשהיא לא בכיתה היא נהנית מתפירה, משירה ומנגינה על גיטרה ועל פסנתר, משהות בטבע ומבילוי עם בעלה, דני, ועם חיות המחמד שלהם.

### BEATRIZ LUNA

ראש המעבדה להתפתחות נוירו-קוגניטיבית באוניברסיטת פיטסבורג. חוקרת את האופן שבו המוחות של אנשים משתנים מילדות לבגרות. כיום היא עובדת על כמה מחקרים שבוחנים היבטים שונים של השינויים האלה, כולל כיצד אנו זוכרים דברים ואם גמולים משנים את האופן שבו אנו יכולים לשחק במשחק.

Hebrew version  
provided by

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

