



## עצרו! כיצד אנו מרסנים פעולות

Nicole Swann<sup>1</sup>, Ian Greenhouse<sup>2</sup>

<sup>1</sup>אוניברסיטת קליפורניה בסן פרנסיסקו, סן פרנסיסקו, ארצות הברית

<sup>2</sup>אוניברסיטת קליפורניה בברקלי, ברקלי, ארצות הברית

### סוקר צעיר

ROBERT

גיל: 14



דמיינו שאתם עומדים בעמדת הבסיס השלישי ומחכים לעשות ספרינט אל עמדת הבית של החובט ולנצח את המשחק עבור קבוצת הבייסבול שלכם. אתם מסתכלים על חברת קבוצתכם מתקרבת לעמדת החובט ומרימה את המחבט אל כתפה. אתם מוכנים לצאת מהר לספרינט, ברגע שתשמעו את חבטת הכדור שפגע במחבט. המגיש רץ וזורק את הכדור. הכדור שורק דרך האוויר וקראק! הוא ניתז מהמחבט. אתם מוכנים ומזומנים לפעולה ואתם מתחילים להאיץ כאשר, לפתע, השחקן בעמדת הבסיס השנייה מזנק ותופס באוויר את הכדור שעף בקשת נמוכה. אתם קופאים במקום ללא היסוס בעודכם נמצאים בבטחה בבסיס השלישי.

### הקדמה

איך עשיתם את זה? הייתם כל כך מוכנים לצאת לספרינט לעבר עמדת הבית של החובט, שרירי הרגליים שלכם כבר היו מתוחים, אבל אז בשבריר שנייה הייתם מסוגלים לבטל את הפעולה המתוכננת ולעצור את עצמכם.

היכולת לעצור פעולות חשובה עבור ההתנהגות שלנו. היא מאפשרת לבני אדם ולחיות להגיב במהרה כאשר הנסיבות משתנות, בין אם לעצור את צעדיכם כשאתם מסתובבים מעבר לפינה

ורואים נחש בדרככם, ובין אם להימנע מחיטוט באף כשאתם מבינים שהמורה שלכם מסתכלת ישר עליכם!

תאמינו או לא, מדענים חוקרים התנהגות כמו זו כל הזמן! סוג ההתנהגות הזה מהווה דוגמה למה שנקרא אינהיביציית תגובה (Response inhibition). המילה הלועזית 'אינהיביציה' (שבתרגומה לעברית הוא 'עִכְבָּה') מגיעה מהפועל inhibit שמשמעותו למנוע, או לרסן. ההתנהגות שתיארנו נקראת אינהיביציית תגובה מאחר שהגוף שלכם מוכן לבצע תגובה, למשל מוכן לצאת לספרינט לעמדת הבית של החובט בדוגמה שלעיל, ואז כדי לבטל את התגובה צריך 'לרסן' את הפעילות. ריסון זה עשוי להיות תוצאה של קָלֵט מהסביבה, כמו למשל נחש שנמצא על השביל, או שהוא עשוי להתרחש פשוט מאחר שהחלטתם לעצור ובלי שקיבלתם שום אות מהעולם שסביבכם. שאלה מעניינת היא אם אינהיביציית תגובה יכולה להיות אוטומטית. זו אחת השאלות שמדענים עדיין מנסים להבין.

עצירה של עצמכם עשויה להיראות פשוטה, אולם היכולת לרסן תגובות דורשת תיקונים מהירים לפעולות שלכם. יכולת זו קשורה למגוון רחב של כישורי יומיום. לדוגמה, דמיינו שאתם עומדים לרדוף אחרי כדורסל שמתגלגל לכביש ולפתע אתם שומעים צפירה של מכונית. לחוסר היכולת לעצור במקרה זה עשויות להיות השלכות חמורות. האם אתם יכולים לחשוב על דוגמאות נוספות לחשיבות של יכולת העצירה, אולי מתחום הספורט, או במצב שבו אתם צריכים להתנהל בזירות רבה?

בחלק הבא של המאמר תוכלו לקרוא על מטלה (סוג של משחק מחשב) שמדענים משתמשים בה כדי לחקור את אינהיביציית התגובה (אפילו תהיה לכם הזדמנות לנסות זאת בעצמכם!). בחלק שאחריו תוכלו לקרוא על הדברים שמטלות כאלה לימדו אותנו על המוח. בסוף המאמר תוכלו לקרוא סיכום של הסיבות שבגללן המחקר הזה הוא כל כך חשוב.

## מטלות

כשמדענים מתכננים מטלות הם נדרשים להבין כיצד לגרום למוחות של אנשים לבצע את אותו הדבר שוב ושוב. החזרתיות הזו מאפשרת למדענים לבצע תחזיות טובות יותר לגבי האופן שבו המוח מבצע את הפעולה. אחת המטלות שבהן משתמשים לחקר אינהיביציית התגובה היא מטלת את עצור (Stop Signal Task). מטלה זו היא די פשוטה. היא מתחילה בהצגה של מטרה, למשל תמונה של חץ. אתם אומרים למשתתפים בניסוי שכאשר הם רואים את המטרה עליהם ללחוץ על כפתור הכי מהר שהם יכולים. זה מאפשר למדענים לקבוע מהי מהירות התגובה של הנבדק לפריט המטרה. די פשוט עד כאן.

המלכוד הוא שלפעמים מושמע צפצוף בדיוק אחרי שהמטרה הוצגה. משמעות הצפצוף היא עצור! כך שאפילו אם המשתתפים התכוננו להגיב, עליהם לנסות לרסן את התגובה. זה יכול להיות קשה מאוד! השמעת הצפצוף מיד לאחר הצגת המטרה מקלה על הימנעות מלחיצה על הכפתור, אולם השמעת הצפצוף בזמנים מאוחרים יותר ויותר אחרי שהמטרה הוצגה מקשה יותר ויותר על הימנעות מלחיצה על הכפתור.

רוצים לנסות את מטלת אות עצור? ראו כמה מהר אתם מסוגלים להגיב למטרה וכמה מהר אתם מסוגלים לעצור!

הפיכת המטלה לקשה מאוד מאפשרת לנו להעריך כמה זמן לוקח לנבדקים לעצור. חלק מהאנשים יכולים לעצור ממש מהר, אפילו אם הם בדיוק עמדו ללחוץ על הכפתור. אנשים אחרים עוצרים לאט יותר וצריכים לשמוע את הצפצוף זמן רב יותר לפני שהם מתחילים ללחוץ על הכפתור.

באמצעות שימוש במטלת אות עצור אתם יכולים למדוד כמה מהר אנשים מגיבים למטרה כשאינן צפופות. אתם גם יכולים למדוד כמה מהר הם עוצרים. באופן טיפוסי, אנשים מסוגלים להגיב למטרה תוך פחות מחצי שנייה, או תוך פחות מ-500 מילישניות (מילישנייה = אלפית השנייה), ויש אנשים שמסוגלים לעצור את עצמם אפילו מהר יותר, בערך תוך רבע שנייה, כלומר 250 מילישניות.

## אינהיביציית תגובה והמוח

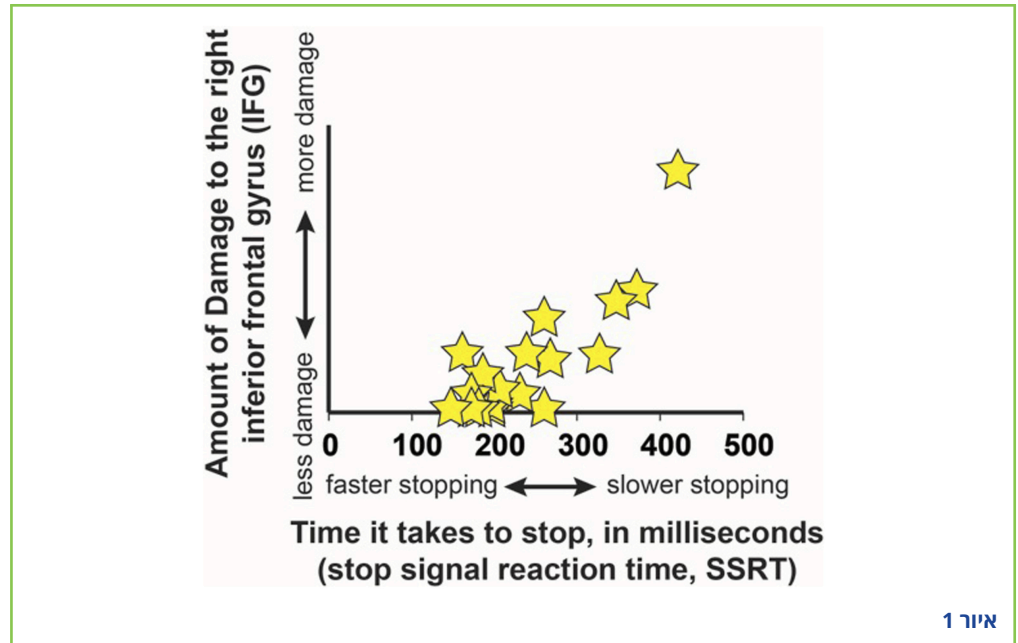
מדעני מוח חקרו את אינהיביציית התגובה בהרבה דרכים שונות. דרך אחת היא לגרום לאנשים עם נזקים או פגיעות באזורים שונים במוח לבצע מטלה שמשתמשת באינהיביציית תגובה, כמו מטלת אות עצור שצוינה קודם. לאחר מכן, אפשר להשוות את הביצועים של האנשים בעלי הפגיעות המוחיות לביצועים של אנשים שאין להם פגיעות מוחיות. שיטה זו מאפשרת לדעת אלה אזורי מוח הם הכרחיים עבור אינהיביציית תגובה. לדוגמה, פגיעה באזור במוח שנקרא בליטה מצחית תחתונה (Inferior Frontal Gyrus) ובקיצור IFG. זהו חלק מהאונה המצחית, אשר ממוקמת מתחת לרקות שלכם, גורמת לאנשים לרסן לאט יותר את אינהיביציית התגובה שלהם (ראו איור 1 אשר לקוח מהפניה [1]). בהמשך לכך, פגיעות באזורים אחרים במוח יכולות לגרום לבעיות דרמטיות יותר ביחס לעצירה. למשל, פגיעה באזור שנמצא מתחת לתלמוס ונקרא גרעין תת-תלמי, עמוק בתוך מרכז המוח, יכולה לגרום לאנשים לבצע תנועות בלתי נשלטות כל הזמן. זוהי לקות תנועתית שמכונה המיבְּלִיִּסְמוֹס [ראו סרטון בקישור הזה]. גירוי חשמלי ישיר של הגרעין התת-תלמי, אשר מהווה טיפול לסוגים שונים של מחלות, יכול גם לשנות את יכולתו של האדם לעצור. הליך זה מתבצע על-ידי השתלה של אלקטרודה בתוך המוח.

דרך נוספת לקבוע אם אזור במוח הכרחי עבור התנהגות מסוימת היא באמצעות שיטה של גירוי מגנטי דרך הגולגולת (Transcranial Magnetic Stimulation, או TMS בקיצור). בשיטה זו חשמל נשלח דרך הקרקפת והגולגולת אל תוך המוח באמצעות מכשיר מיוחד בצורת משוט, אשר מכיל חוט סלילי. שיטה זו מאפשרת למדענים ליצור הפרעה זמנית בפעילות החשמלית של אזורים שונים על פני השטח החיצוניים של המוח (קליפת המוח). מדענים השתמשו ב-TMS כדי ליצור הפרעות לאזורי מוח בזמן שאנשים ביצעו את מטלת אות עצור. הם מצאו שגירוי TMS-IFG, מצד ימין של הראש, פוגם ביכולתו של האדם לעצור מהר [2]. נתון זה מתאים לממצאים מניסויים שנעשו באנשים עם פגיעות מוחיות.

דימות תהודה מגנטית תפקודי (functional magnetic resonance imaging) fMRI, הוא סוג אחר של שיטה שבה מצלמים את השינויים בזרימת הדם במוח. השינויים האלה

**איור 1**

פגיעה באזור מסוים באונה המצחית, הבליטה המצחית התחתונה (IFG), מצד ימין, קשורה בהאטת תהליך העצירה. בגרף הזה, כל כוכב מייצג נתונים של נבדק אחד. הציר האופקי מציג את מהירות העצירה של כל נבדק, והציר האנכי מציג את מידת הנזק של אותו הנבדק ב-IFG הימני. גרף זה מראה כי לאנשים שחוו נזק רב יותר ב-IFG הימני לוקח זמן רב יותר להגיב לסימני עצירה, כלומר העצירה שלהם היא איטית יותר [1].



איור 1

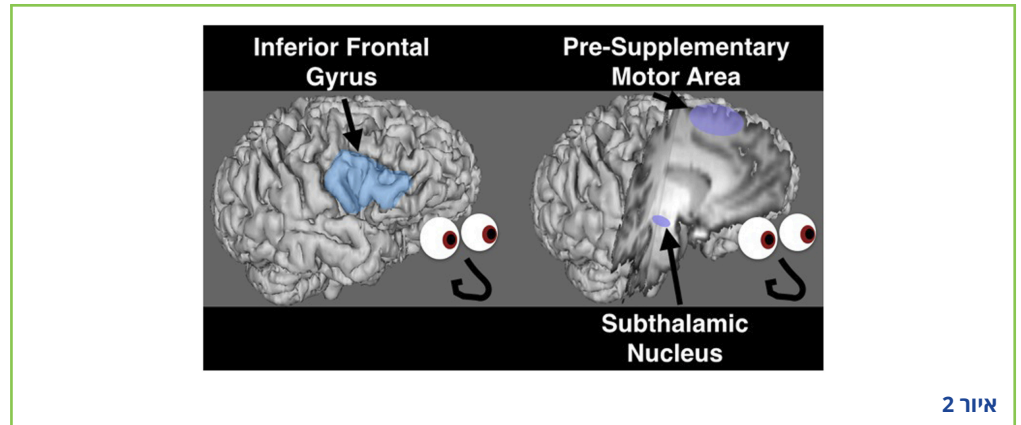
בזרימת הדם קשורים לאזורי המוח שצורכים אנרגיה, ומצביעים לנו, לכן, על האזורים שעשויים להיות פעילים בביצוע של מטלה מסוימת. מדענים ביצעו סריקות fMRI בזמן שאנשים ביצעו את מטלת אות עצור כדי לראות אלה אזורים במוח משנים את פעילותם במהלך אינהיביציית תגובה. במחקרים שהתבססו על fMRI נמצא שינוי בפעילות ב-IFG ובסביבת הגרעין התת-תלמי כאשר אנשים הצליחו לעצור את עצמם. אזור שלישי שנקרא האזור התנועתי הקדם-משלים (pre-supplementary motor area), ליד החלק העליון האמצעי של המוח, הציג גם הוא פעילות מוגברת ב-fMRI. ממצאים אלה מתאימים ברובם למחקרים אחרים שנעשו. שיטת ה-fMRI אמנם מספקת מידע רב לגבי אלה אזורים פעילים במוח, אולם אינה אומרת הרבה לגבי שינויים שמתרחשים בפעילות באותו האזור.

למרבה המזל, שיטות אחרות יכולות לבצע מדידות מהירות יותר. שתיים מהשיטות האלה נקראות רשמת מוח חשמלית (Electroencephalography, או EEG בקיצור), ואלקטרוקורטיקוגרפיה (Electrocorticography, או ECoG בקיצור). שתי השיטות מספקות לנו מידע על הזמנים שבהם מתרחשים שינויים בפעילות החשמלית במוח. השיטות האלה רגישות לאותות חשמליים זעירים אשר מיוצרים על-ידי קבוצות של תאי עצב (נוירונים). בשיטת EEG שינויי הפעילות נרשמים באמצעות אלקטרודות שממוקמות על פני השטח החיצוני של הראש, מעל לשיער. בשיטת ECoG האלקטרודות ממוקמות על-ידי מנתח ישירות על גבי קליפת המוח אחרי שחלק מהגולגולת הוסר. באמצעות שימוש ב-EEG וב-ECoG, מדענים איתרו שינויים בפעילות החשמלית בקליפת המוח, אשר מתרחשים זמן קצר מאוד אחרי שאות העצירה מוצג - בין 100 ל-200 מילישניות אחריו. המחקרים האלה מציעים גם שתאי עצב מאותתים בקצב או בתדר מסוים כדי לתקשר דרך כל המוח בעת עצירה.

שיטה נוספת שהתבררה כמועילה עבור ההבנה לגבי אלה אזורים במוח עשויים לתקשר בעת ריסון של תגובה, נקראת דימות טנזור הדיפוזיה (Diffusion Tensor Imaging, או

## איור 2

רשת אזורי המוח שקשורה באינהיביציית תגובה כוללת את הבליטה המצחית התחתונה, האזור התנועתי הקדם-משלים והגרעין התת-תלמי. בשתי התמונות האלה, אזורי המוח שמצוינים לעיל מודגשים על גבי סריקות של המוח של אחד מכותבי המאמר, ד"ר Greenhouse. בתמונה משמאל אפשר לראות את הבליטה המצחית התחתונה שמודגשת על גבי קליפת המוח. בתמונה מימין אפשר לראות את האזור התנועתי הקדם-משלים ואת הגרעין התת-תלמי. בתמונה זו האזור הקדמי של המוח הוסר כדי להראות את החלק הפנימי של המוח. איזה מוח יפה, אינכם חושבים!?



איור 2

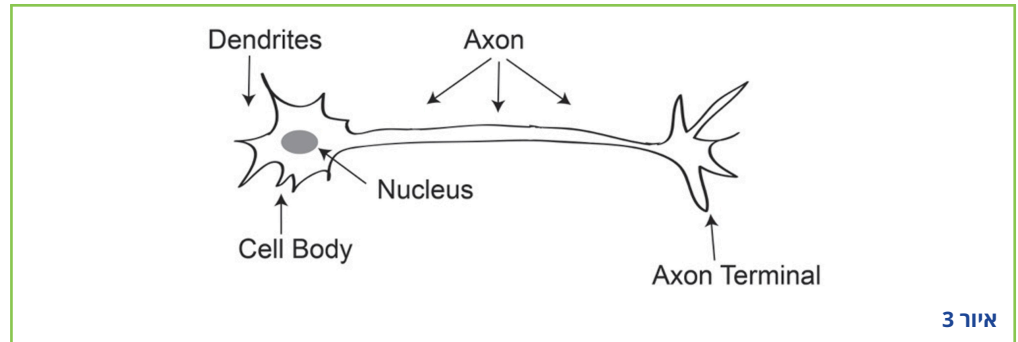
DTI בקיצור). לתאי עצב רבים יש חלק מיוחד שנקרא אקסון, שהוא צינורית דקה וארוכה, כמעט כמו קשית קטנטנה, אשר דרכו נשלחים אותות חשמליים בין אזורים שונים במוח (איור 3). שיטת DTI מאפשרת למדוד את הכיוון שבו זורמים המים בתוך האקסונים של תאי העצב. רוב הגוף שלכם בנוי ממים, כולל המוח, וחלק מהמים האלה נמצאים בתוך האקסונים. מדענים משתמשים במידע הזה לגבי זרימת המים כדי לקבוע אלה אזורים במוח מחוברים זה לזה. מדובר במידע חשוב מאחר שאזורי מוח שונים צריכים לתאם את הפעילות שלהם כדי לייצר התנהגות תקינה. מדענים השתמשו בשיטת DTI כדי לראות אם אזורי ה-IFG, האזור התנועתי הקדם-משלים והגרעין התת-תלמי מחוברים אחד לשני ישירות.

מדענים יכולים להתחשב בתוצאות מכל השיטות האלה כדי לגבש מושג כללי על האופן שבו המוח מבצע אינהיביציית תגובה במהלך מטלת אות עצור. כל שיטה מוסיפה חתיכה חדשה לפאזל: אפשר ללמוד אלה אזורים הם הכרחיים עבור עצירה (בעזרת מחקרי TMS או מחקרים על פגיעות מוחיות), אלה אזורים במוח פעילים בזמן עצירה (באמצעות fMRI וחלקית גם באמצעות EEG ו-EECoG), מתי פעילות המוח משתנה (עם EEG או ECoG) וכיצד אזורים שונים במוח מחוברים (באמצעות DTI).

מדענים ערכו מאות ניסויים תוך שימוש בשיטות האלה, יחד עם כמה שיטות נוספות (שאינן לנו מקום לספר לכם עליהן כאן). מתברר שאינהיביציית התגובה אינה תלויה באזור אחד במוח, אלא בתקשורת בין רשת של אזורי מוח מחוברים! חלק מהאזורים האלה נמצאים בקליפת המוח, וכוללים את ה-IFG ואת האזור התנועתי הקדם-משלים, והם מוצגים באיור 2. ישנם גם אזורים קרובים למרכז המוח. דוגמה לאזור אחד כזה מבין אזורי המוח העמוקים היא הגרעין התת-תלמי, שגם הוא מוצג באיור 2. האזורים האלה מתקשרים זה עם זה באמצעות קשרים שזוהו בעזרת שיטת ה-DTI. מדענים מאמינים כי הרשת המוחית הזו היא שמאפשרת לנו לעצור את עצמנו, כמו בדוגמה מתחילת המאמר כשראיתם שמישהו תפס את כדור הבייסבול וזה גרם לכם לעצור את היציאה לספרינט לעבר עמדת הבית של החובט. מדענים לומדים על אינהיביציית התגובה כל הזמן. בעתיד, ככל הנראה נוכל לגלות אזורים נוספים במוח שהם חשובים עבור אינהיביציית תגובה, וזרמים נוספות שבהן אזורי המוח האלה מתקשרים.

### איור 3

תא עצב (ניורון). האיור מראה את אזורי המפתח של תא העצב, או הניורון: האקסון (axon), שהוא חלק דמוי-קשית של התא, מסומן יחד עם אזורי מפתח אחרים: הגרעין (nucleus), גוף התא (cell body), הדנדריטים (dendrites) וקצות האקסון (axon terminals).



איור 3

## מדוע חקר אינהיביציית התגובה הוא חשוב?

ראשית, היכולת לעצור עשויה להציל את חייכם! זכרו את הדוגמה של ריצה אחרי כדורסל שמתנגלגל לכביש ושמיעה של צפירת מכונית שמתקרבת. הבנה של משמעות הצפירה (עצור!), והיכולת לרסן את הנטייה לרוץ אחרי הכדור, מונעת מכם תאונה כואבת. מלבד זאת, מדענים בוחנים את הרעיון שאותה רשת מוחית שאחראית על ריסון של תנועות עשויה להיות חשובה גם בריסון של מחשבות בלתי רצויות או רגשות בלתי רצויים. לדוגמה, אתם עשויים לסמוך על אותה הרשת המוחית שתעצור את האצבע שלכם מלחיצה על הכפתור במטלת אות עצור, ושתמנע מתשומת הלב שלכם לברוח אל עבר תוכנית הטלוויזיה האהובה עליכם שמשודרת בחדר הסמוך, בזמן שאתם רוצים להתרכז בשיעורי הבית שלכם. חוסר יכולת לשלוט בתשומת הלב שלכם באופן כזה עשוי להורות על לקויות כמו הפרעת קשב, ריכוז והיפראקטיביות, או ADHD. מדענים הראו כי יכולת העצירה של אנשים עם ADHD לוקה בחסר כשהם מבצעים את מטלת אות עצור [3]. ככל שאנו לומדים יותר על האופן שבו המוח מבצע אינהיביציית תגובה, כך אנו מבינים טוב יותר מה גורם ללקויות, כמו במקרה של ADHD. יום אחד ההבנה הזו עשויה להוביל לשיפור משמעותי בטיפולים שעוזרים לאנשים להתגבר על לקויות ביכולת לשלוט בעצמם. חקר אינהיביציית התגובה מאפשר למדעני מוח גם הבנה טובה יותר של האופן שבו אזורי מוח שונים פועלים יחד כדי לעשות את כל הדברים המדהימים שהמוח מסוגל לעשות!

## תודות

אנו רוצים להודות ל-Timothy Hoang על עזרתו ביצירת משחק הווידאו ול-Robert על הסקירה המצינית של המאמר שלנו.

## מילות מפתח

אינהיביציית תגובה  
מטלת אות עצור  
נזק מוחי  
גירוי מגנטי דרך הגולגולת (TMS)  
דימות תהודה מגנטית תפקודי (fMRI)

רשמת מוח חשמלית (אלקטרואנצפלוגרפיה, EEG)  
 אלקטרוקורטיקוגרפיה (EcoG)  
 דימות טנזור הדיפוזיה (DTI)  
 בליטה מצחית תחתונה (IFG)  
 האזור התנועתי הקדם-משלים  
 גרעין תת-תלמי  
 גרעיני הבסיס  
 רשת מוחית

## מקורות

1. Aron, A. R., Fletcher, P. C., Bullmore, T., Sahakian, B. J., and Robbins, T. W. 2003. Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nat. Neurosci.* 6:115–116. doi: 10.1038/nn1003
2. Chambers, C. D., Bellgrove, M. A., Stokes, M. G., Henderson, T. R., Garavan, H., Robertson, I. H., et al. 2006. Executive “brake failure” following deactivation of human frontal lobe. *J. Cogn. Neurosci.* 18:444–455. doi: 10.1162/089892906775990606
3. Lijffijt, M., Kenemans, J. L., Verbaten, M. N., and van Engeland, H. 2005. A meta-analytic review of stopping performance in attention-deficit/hyperactivity disorder: deficient inhibitory motor control? *J. Abnorm. Psychol.* 114:216–222. doi: 10.1037/0021-843X.114.2.216

פורסם אונליין: 31 בינואר 2019

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

ציטוט: Swann N and Greenhouse I (2019) עצרו! כיצד אנו מרסנים פעולות. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2014.00007-he

### תורגם והותאם:

Swann, N., and Greenhouse, I. (2014). STOP! How we inhibit acts. *Front. Young Minds* 2:7. doi: 10.3389/frym.2014.00007

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

© Swann and Greenhouse 2014. **COPYRIGHT** 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 (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקר צעיר

### ROBERT, גיל: 14

אני תלמיד כיתה ח' ובזמן הפנוי שלי אני מנגן על צ'לו. אני נהנה ממועצת התלמידים וכיום אני יושב הראש שלה. האתרים האהובים עליי הם יוטיוב ו-Listverse. הנושא האהוב עליי הוא מדע, ואני הקפטן של קבוצת המדע של בית הספר שלי אשר מתחרה בתחרות Science Bowl.

## הכותבים

### NICOLE SWANN

אני אוהבת להיות מדענית מאחר שאני תמיד לומדת דברים חדשים, ויכולה להמציא דרכים יצירתיות לשאול שאלות ולפתור בעיות. אני חוקרת כיצד אזורים שונים במוח עובדים יחד כדי לאפשר לנו להזיז את הגוף שלנו, וכיצד אנו מסוגלים, בעת הצורך, לעצור ולשנות פעולות בצורה דינמית. אני חוקרת גם מה קורה כאשר התהליכים האלה אינם מתרחשים בצורה רגילה, מה שעשוי להוביל ללקויות תנועתיות כמו למשל במקרה של מחלת הפרקינסון. כשאינני עוסקת במדע אני אוהבת לטייל, לשחות, לעשות יוגה, לרוץ, לרכב על אופניים ולבלות עם חיות המחמד שלנו: סבסטיאן הכלב, אדינגר החתול ואודיס הצב.

### IAN GREENHOUSE

אני חושב שמוח האדם הוא מדהים! אני מתעניין במיוחד באופן שבו אנשים שולטים בתנועות שלהם מאחר שתנועה היא האמצעי שדרכו אנו מתקשרים עם העולם. אני חוקר מערכות במוח אשר מתכננות תנועות ועוצרות אותן. כחלק מהמחקר שלי אני מבקש מאנשים לשחק במשחקי וידיאו בזמן שאני מודד את הפעילות שמתרחשת בין המוח לבין השרירים בגוף שלהם. אני מודד גם את כמות הכימיקלים באזורים שונים במוח שאני חושב שהם חשובים עבור שליטה בתנועה. כשאני לא מבצע ניסויים אתם עשויים למצוא אותי באוקיינוס עם הגלשן שלי, רוכב על אופניים, עושה סקי, מנגן, מנגן, מבשל ונהנה עם החברים שלי.



Hebrew version  
provided by

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

