

## מישוש הדרך וידיעה מבוססת מגע

Edward de Haan<sup>1</sup>, Chris Dijkerman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>המחלקה לפסיכולוגיה והמרכז למוח וקוגניציה באמסטרדם, אוניברסיטת אמסטרדם, אמסטרדם, הולנד

<sup>2</sup>פסיכולוגיה ניסיונית, מכון Helmholtz, אוניברסיטת אוטרקט, אוטרקט, הולנד

### הקדמה

אתם מסוגלים לקלוט דברים באמצעות מגע, טעם, ריח, שמיעה וראייה. מערכת החושים אשר מאפשרת לנו "להרגיש" (במובן של לחוש את עצמנו ואת הסביבה) נקראת "מערכת החישה". מערכת החישה מוגדרת כמערכת רחבה של תפיסה אשר כוללת, בין השאר, את החוויה של מגע או ליטוף על פני העור, אבל גם תחושה של טמפרטורה ותחושת כאב. נוסף על כך מערכת החישה אחראית למעקב אחרי מנגנונים פנימיים של הגוף. מערכת זו מאפשרת לנו לדעת את מיקומם המרחבי של איברי הגוף שלנו (למשל הרגליים והידיים). תפקוד זה של מערכת החישה, העוסק בהעברת מידע בנוגע להתמצאות הגוף במרחב, נקרא פרופריוספציה (Proprioception). תפקוד זה הוא הכרחי עבור תכנון ההתנהגות התנועתית שלנו. אנו צריכים לדעת, אפילו במקרה של היעדר משוב ראייתי, היכן הגוף והגפיים שלנו ממוקמים כדי שנוכל לבצע את התנועות הרצויות. לבסוף, אנו מסוגלים לזהות עצמים על-ידי חקירתם באמצעות מגע. חשבו פשוט על זיהוי תוכן הכיסים שלכם באמצעות מישוש, או על פתיחת דלת בחושך בעזרת המפתח המתאים.

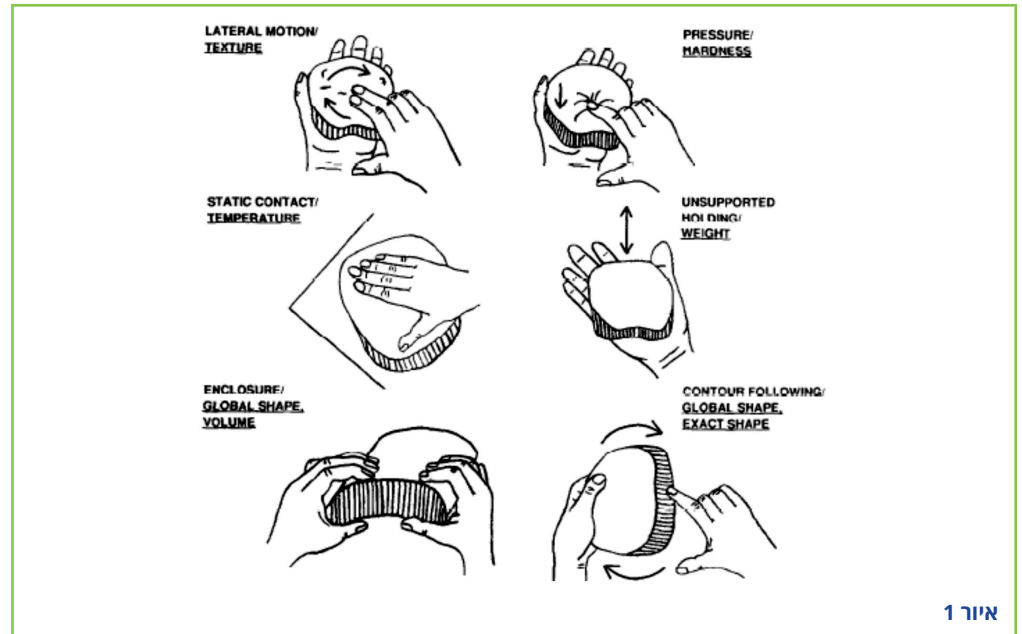
### סוקר צעיר

**HENRY**  
גיל: 11



## איור 1

דוגמאות לתפקודי חישה שונים ששייכים למערכת החישה.



איור 1

בהינתן טווח התפקודים שהוזכר לעיל, אין זה מפתיע שמערכת החישה מבוססת על מגוון רחב של תת-מערכות, ביניהן: (i) מספר איברי חישה שונים בעור, בשרירים ובמפרקים; (ii) רשת נרחבת של עצבים היקפיים אשר מחברים את איברי החישה האלה אל המוח ו-(iii) מערך של מבנים במוח שתפקידם לעבד את כל המידע הזה. במאמר זה נתאר את הרכיבים העיקריים של מערכת החישה.

## איברי חישה היקפיים

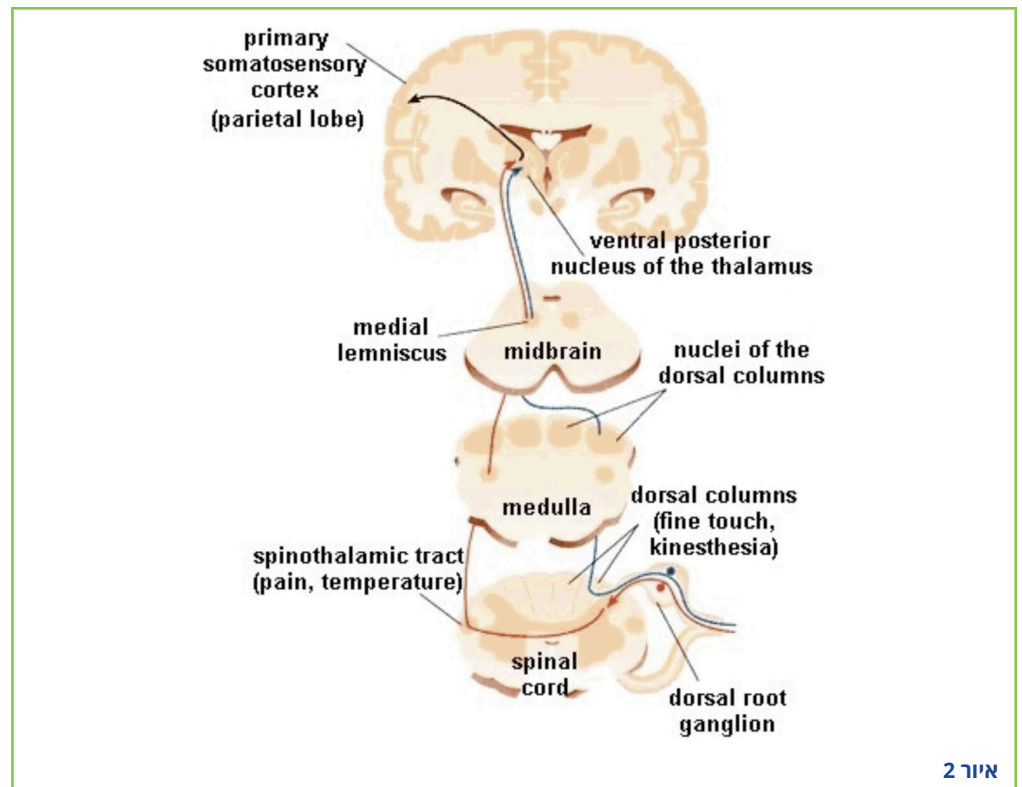
באופן כללי, כל תת-מנגנון ששייך למערכת החישה (למשל מגע, פרופריוספציה, רגישות לחום ולקור ותחושת כאב), מקושר לסוגים שונים של קולטנים (ראו איור 1).

**מגע:** ישנם כמה סוגים של קולטנים מכניים (קולטנים שמגיבים למגע). באזורי העור שמכילים שיער, הקולטן המכני העיקרי הוא הקולטן של זקיקי השיער. כמו כן, אזורי עור שעירים מכילים סיבים שרגישים לליטוף איטי בעזרת מברשת רכה, וגירוי של הסיבים האלה יוצר חוויה של מגע נעים. אזורי עור בלי שיער מכילים ארבעה סוגים עיקריים של קולטנים מכניים, אשר יכולים להיות מחולקים לשתי קבוצות תפקוד שונות. הקבוצה הראשונה מכילה קולטנים מכניים בעלי הסתגלות מהירה, אשר מגיבים רק בתחילתו של מגע, ולעיתים קרובות גם בסופו. הקבוצה השנייה מכילה קולטנים מכניים בעלי הסתגלות איטית, אשר מגיבים באיטיות לתחילתו של מגע, אבל ממשיכים להגיב גם במהלך המגע עצמו. צפיפות הקולטנים המכניים משתנה בין אזורים שונים בגוף. בכף היד, למשל, צפיפות הקולטנים הגדולה ביותר נמצאת בקצות האצבעות. ככל שצפיפותם של הקולטנים המכניים גבוהה יותר, כך עולה יכולת ההבחנה בין מגע שמתבצע בשתי נקודות קרובות (כלומר, קטן המרחק שממנו ואילך אפשר להבחין שמדובר בשתי נקודות מגע שונות ולא בנקודה אחת).

**פרופריוספציה:** קולטנים בשלושה איברים שונים תורמים לפרופריוספציה: קולטנים בעור, בשרירים ובמפרקים. בעור, קולטנים בעלי הסתגלות איטית מגיבים למתיחה צידית (לטרלית),

## איור 2

נתיבים של מערכת החישה אשר עוברים דרך עמוד השדרה אל קליפת המוח החישהית.



איור 2

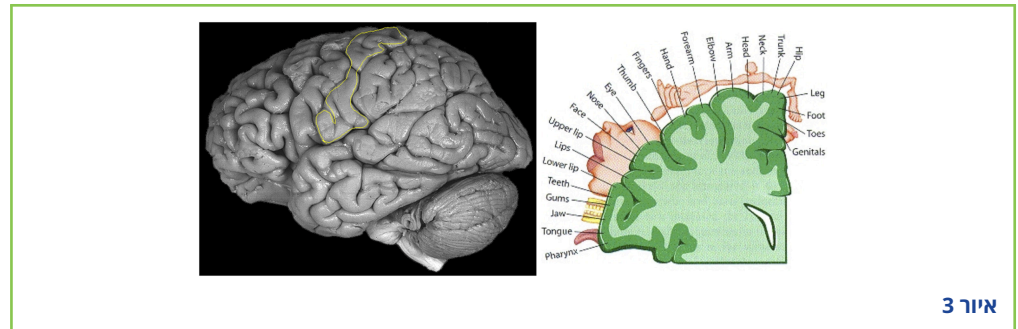
הרחק מהמרכז) של העור. בשרירים יכולים להימצא שני סוגי קולטנים עיקריים: כישורי השריר ואברוני הגיד על שם גולג'י (Golgi). אברוני הגיד על שם גולג'י ממוקמים בצומת החיבור שבין שרירים וגידים. קולטנים בגידים הם זהים לאלה שנמצאים בעור ובשרירים.

**קולטני חום/קור:** ישנם שני סוגים של קולטנים תרמיים (כלומר קולטנים שרגישים לטמפרטורה) בעור אשר נקראים תרמורצפטורים (Thermoreceptors). התרמורצפטורים אינם מעוררים בקלות באמצעות אף גירוי שאיננו תרמי. קולטני קור מעוררים על-ידי ירידה בטמפרטורת העור, ומפסיקים להגיב (כלומר לירות חשמלית) כאשר טמפרטורת העור עולה. קולטני חום מגיבים בצורה הפוכה, כלומר הם מגבירים את תגובת הירי החשמלי שלהם כאשר טמפרטורת העור עולה, ומפסיקים להגיב כאשר הטמפרטורה יורדת.

כיום ידועים נתיבי העיבוד העיקריים של מערכת החישה הקשורים במגע ובפרופריוספציה, אשר מחברים בין קולטנים היקפיים בגוף לבין קליפת המוח. קלט שמגיע מהקולטנים ההיקפיים עולה דרך העמודה הגבית (דורסלית, שקרובה לגב) של עמוד השדרה ומגיע אל החלק שמחבר בין עמוד השדרה לבין המוח, ששמו המוח המוארך. בהמשך הנתיב, סיבי העצב חוצים את המוח לסירוגין משמאל לימין ומימין לשמאל (ראו את הקו הכחול באיור 2), ויוצרים מבנה של רקמת עצבים אשר נקראת "למניסקוס אמצעי" (Medial lemniscus). הנתיב מסתיים באזור במוח שנקרא גרעין התלמוס. נתיב עיבוד נוסף שעולה אל המוח נקרא המערכת הקדמית-צידי, והוא עוסק בעיקר בגירויים תרמיים ובגירויים שקשורים בנוק פוטנציאלי לרקמות הגוף (שיכול לנבוע ממקור מכני, כימי או תרמי). המערכת הקדמית-צידי מגיעה גם היא אל גרעין התלמוס, וגם אל כמה גרעינים קטנים יותר במוח. היא חוצה את עמוד השדרה בחלקו הנמוך (ראו את הקו הכתום באיור 2).

## איור 3

קליפת המוח החישתית הראשונית (SI).



איור 3

### מאפייני עיבוד מידע בקליפת המוח החישתית הראשונית

מרבית המידע החישתי נכנס אל קליפת המוח דרך מסלול שעובר מהתלמוס אל קליפת המוח הקודקודית האחורית. האזור הזה ידוע בשם קליפת המוח התחושתית הראשונית (Primary somatosensory cortex, בסימונה המקובל - SI; ראו צד שמאל באיור 3). למעשה, ה-SI מורכבת מכמה אזורים שונים (הנקראים אזורי ברודמן, Brodmann, ומספריהם 1, 2, 3a, 3b), שכל אחד מהם מקבל קלט שונה מהתלמוס. ארבעת האזורים השונים האלה מכילים מפות סומטוטופיות (Somatotopic maps) של חצי הגוף הנגדי (כלומר של חצי הגוף השמאלי אם האזור נמצא בצד ימין של המוח, ולהיפך). משמעות המונח "סומטוטופי" היא שאזורי גוף שונים מיוצגים בנפרד על גבי משטח קליפת המוח. אולם, השטח היחסי של קליפת המוח אשר משמש לייצוג של איבר מסוים אינו בהכרח פרופורציוני לגודל היחסי של האיבר בגוף. בפועל, אזורי הגוף הרגישים ביותר, כמו למשל כפות הידיים והשפתיים, תופסים חלק גדול מה-SI (ראו איור 3 מימין).

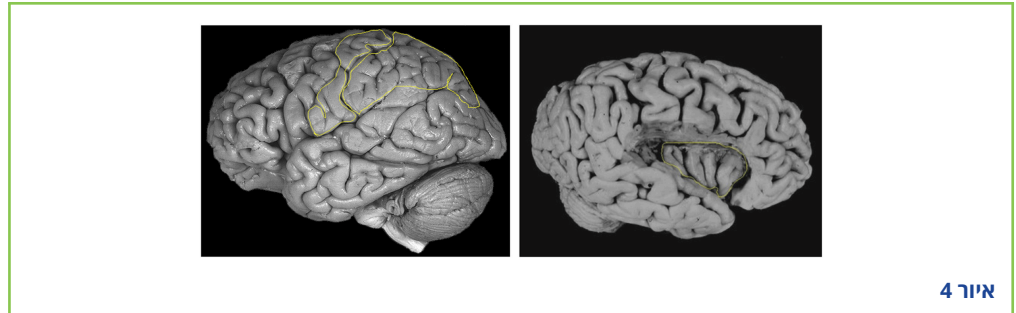
מעניין לשים לב שבכל אחד מהאזורים ישנו מרכיב חישתי אחד שנוטה להיות רכיב הקלט המרכזי. כלומר, מסתמן שאזורי ה-SI השונים מתמחים כל אחד במרכיב מסוים של הקלט החישתי. לדוגמה, באזור 3a הקלט העיקרי מגיע מקולטני השרירים, ובאזורים 1 ו-3b הקלט העיקרי מגיע מקולטני העור. בתוך אזורי ברודמן האלה, תת אזורים מסוימים מופעלים על-ידי סוגי גירויים שונים, כמו למשל תנועות או לחץ מכני.

בשלב המוקדמים של עיבוד מידע בקליפת המוח, פעילות תאי העצב מייצגת בצורה מדויקת יחסית את מאפייני הגירוי שפעל על עצבים היקפיים בגוף. תאי העצב הממוקמים הרחק מהקלט שמגיע מהתלמוס מראים אופני תגובה מורכבים יותר, מה שמעיד כנראה על עיבוד מידע מתקדם. לדוגמה, תאי עצב שרושמים את כיוון התנועה שמתרחשת על גבי העור אינם נפוצים באזור הקרוב לתלמוס, קרי אזור 3b, אלא הרבה יותר נפוצים באזורים הבאים 1 ו-2.

בשלב זה חשוב לזון בתופעה קלינית אשר מספקת לנו תובנה מיוחדת על המוח. חלק מהמטופלים שאינם מסוגלים לומר בצורה מודעת היכן נגעו בגופם (באיזה איבר בגוף), למשל במקרה שנגעו ביד שלהם, בכל זאת מסוגלים להצביע בצורה מדויקת על המיקום שבו התרחש הגירוי. במחקר אחד, שכיום כבר נחשב למחקר קלאסי [1], דאח על ארבעה מטופלים בעלי ליקויים בתפיסות מגע ופרופריוספציה בעקבות שבץ מוחי, אשר לא יכלו להרגיש היכן הזרוע שלהם נמצאת במרחב, אך הם היו מסוגלים לבצע עם אותה היד תנועות מרחביות מכוונות.

**איור 4**

קליפת המוח החישהית  
השניונית (SII).



איור 4

נדמה שהמידע בנוגע למיקום המרחבי של היד, שכבר לא היה זמין עבורם בצורה מודעת, בכל זאת נותר זמין עבורם בצורה בלתי מודעת, והיה זמין לשימוש עבור משימות תנועתיות מסוימות. תופעה זו נקראת בתרגום חופשי לעברית "חישה רדומה" ("Numb sense") באנגלית, שילוב של המילים numb שפירושה רדום או חסר תחושה ו-sense שפירושה לחוש או להרגיש), והיא דומה במידה רבה לתופעה "ראייה עיוורת" שבה מטופלים עשויים להיות מסוגלים להצביע על גירוי שנמצא בתוך שדה הראייה שלהם, אף על פי שאינם מסוגלים לראות אותו. נדמה אם כן שאפשר להשתמש במידע חישה עבור ביצוע של תנועות גם לאחר פגיעות בקליפת המוח החישהית הראשונית. הסבר אפשרי שניתן לתופעה, שעדיין איננה מובנת כהלכה, הוא העברת מידע מהתלמוס ישירות אל קליפת המוח הקודקודית האחורית, תוך ביצוע "עיקוף" של קליפת המוח הקודקודית האחורית.

### עיבוד מידע מתקדם בקליפת המוח החישהית

עיבוד של קלט חישה מעבר לקליפת המוח הקודקודית הקדמית מתרחש בכמה אזורים בקליפת המוח. אזורים אלה כוללים את קליפת המוח החישהית השניונית (Secondary somatosensory area - SII), את האינסולה (Insula, ראו איור 4 מימין) ואת קליפת המוח הקודקודית האחורית (Posterior parietal cortex, ראו איור 4 משמאל). שאלה מתבקשת היא מהם התפקידים של שלושת האזורים האלה, אשר מקושרים ביניהם בחוזקה. דרך טובה להתחיל לענות על השאלה הזו היא להתבונן באפנים שבהם אנו עושים שימוש במידע החישהי, כפי שנראה כעת.

### חקירה באמצעות מגע

תפקוד אחד עיקרי של מערכת החישה הוא זיהוי של גירויים חיצוניים, כמו למשל עצמים לעיתים קרובות אנו משתמשים בתפיסה שמבוססת על מגע כדי לזהות עצמים בחיי היומיום שלנו, למשל כאשר אנו מוציאים את המפתחות מכיס המכנסיים. זיהוי של עצמים באמצעות מגע אינו תהליך פסיבי בדרך כלל. הגירוי נבחן לרוב בעזרת תנועות של הידיים ואצבעות הידיים כדי לבנות ייצוג פנימי של העצם. תנועות האצבעות והידיים האלה אינן מקריות אלא תלויות במאפייני העצם שמנסים לזהות. כשאנשים מתבקשים להבחין באחד מממדיו או מאפייניו של העצם (למשל מרקם, קשיחות או משקל), הם משתמשים בסוגים שונים של תנועות או רטינות (סדרות קבועות של תנועות), אשר נקראים "נהלי גישוש". לדוגמה, מרקמים נבחנים בעיקר באמצעות תנועות צידיות בין העור ומשטח העצם (תנועה לטרלית, ראו איור 1).

בעת זיהוי עצמים מתבצעים רצפים של תנועות גישוש אשר עוזרים לִבְנוֹת ייצוג פנימי של האובייקט. הייצוג הפנימי שנבנה מושווה לייצוגים אחרים של עצמים דומים אשר שמורים בזיכרון.

## עיבוד של מידע חישתי המגיע מהגוף בקליפת המוח

תפקוד חשוב אולי אפילו יותר של מערכת החישה הוא להודיע לנו על מיקומם היחסי של איברי הגוף השונים שלנו (האחד ביחס לשני). כדי לבצע זאת, קלטים הקשורים במגע ובפרופריוספציה צריכים להיות משולבים עם קלטים ראייתיים וקלטים הקשורים בשיווי משקל, לבניית ייצוג שלם של הגוף. יתרה מזו, מידע אשר מאוחסן בזיכרון לגבי הגוף שלנו מהווה מרכיב עיקרי בתהליך.

אם כן, אנו משתמשים במידע הקשור במגע בשני אופנים חשובים. אנו הכותבים מאמינים [2] שהמערכת האחראית על עיבוד מידע חישתי לשם הנחיה ישירה של ביצוע פעולה, ממומשת על-ידי נתיב אשר עובר מהאזור החישתי הראשוני, קרי קליפת המוח הקודקודית האחורית, דרך קליפת המוח החישתית השניונית או ישירות אל קליפת המוח הקודקודית הקדמית. האזור הזה מעורב בשילוב בין אופני החישה השונים ובהכנה לתנועה. עיבוד המידע החישתי שמוביל לתפיסה וזיכרון מודעים מתבצע על-ידי מערכת שמסתיימת באינסולה. נוסף על כך מסתמן שקליפת המוח הקודקודית הקדמית הימנית מעורבת בשילוב של תפיסה מרחבית וזמנית בקלט חישתי במהלך זיהוי של עצמים ושל מנחי גוף, בעוד שקליפת המוח הקודקודית השמאלית מעורבת בייצוגי גוף מבניים וסמנטיים (כלומר ייצוגי גוף אשר מבוססים על שפה ועל מושגים מילוליים).

בשלב זה ודאי ברור לכם שהיכולת "להרגיש" היא יכולת אנושית מורכבת מאוד. יש לנו כמה סוגי קולטנים בעור ובגוף, והאותות שהם קולטים מועברים אל המוח דרך כמה נתיבים. במוח, כמה אזורים או מבנים שונים מעבדים רכיבים מסוימים של המידע החישתי אשר נכנס למוח. לבסוף, נעשה שימוש במידע הזה כדי להרגיש, לזהות עצמים ולבצע תנועות מדויקות. ממאמר הסקירה הזה ברור גם שבמקרים שבהם משהו במערכת משתבש, כמו למשל אצל מטופלים עם פגיעה מוחית, אנשים עשויים לסבול מליקויים מסוימים שגורמים למוגבלויות חמורות. חשוב שנרכוש הבנה מעמיקה של מערכת החישה כדי לעזור לאותם המטופלים.

## מקורות וקריאה נוספת

The famous case description of the patients with numbsense was published in:

1. Volpe, B. T., LeDoux, J. E., and Gazzaniga, M. S. 1979. Spatially oriented movements in the absence of proprioception. *Neurology* 29:1309–13. doi: 10.1212/WNL.29.9\_Part\_1.1309

There are a large number of articles and books that we have used for this review but we will not bore you with a list of references. Most of the original sources we used can be found in our paper:

2. Dijkerman, H. C., and de Haan, E. H. 2007. Somatosensory processes subserving perception and action. *Behav. Brain Sci.* 30:139–89. doi: 10.1017/S0140525X07001641

Two instructive book chapters are:

Gardner, E. P., Martin, J. H., and Jessell, T. 2000. The bodily senses. In *Principles of Neural Science*, 4th Edn, eds. E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell, 430–50. New York: McGraw-Hill.

Mountcastle, V. B. 1984. Central mechanisms in mechanoreceptive sensibility. In *Handbook of Physiology, Section 1: The Nervous System*, vol. III, ed. J. M. Brookhart, 789–878. Bethesda: American Physiological Society.

A lot of our ideas are based on the work of:

Paillard, J. 1999. Body schema and body image – a double dissociation in deafferented patients. In *Motor Control, Today And Tomorrow*, eds. G. N. Gantchev, S. Mori, and J. Massion, 198–214. Bulgaria: Academic Publishing House.

Milner, A. D., and Goodale, M. A. 1995. *The Visual Brain In Action*. Oxford: Oxford University Press.

**פורסם אונליין:** 31 בינואר 2019

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

**ציטוט:** de Haan E and Dijkerman C (2019) מישוש הדרך וידיעה מבוססת מנע. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2013.00011-he

**תורגם והותאם:**

de Haan E and Dijkerman C (2013). Feeling your way and knowing by touch. *Front. Young Minds* 1:11. doi: 10.3389/frym.2013.00011

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

**COPYRIGHT** © de Haan and Dijkerman 2013. 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.



## סוקר צעיר

### HENRY, גיל: 11

אוהב לנגן בפסנתר ובסקסופון, לקרוא, לרכוב על אופניים. אוהב טכנולוגיה ורובוטיקה. הולך לבית הספר Horace Mann ולמחנה הקיץ Grey-lock ב-Berkshires, מסצ'וסטס, ארצות הברית. זו תרומתו הראשונה לעיתון מדעי.

## הכותבים

### EDWARD DE HAAN

אני עובד בתור ניוירופסיכולוג באמסטרדם, הולנד. אני רואה הרבה מטופלים שונים שסובלים מנזק מוחי. אני מתעניין במיוחד בלמידה על השפעות של מחלות מוחיות על תפיסתנו את העולם שבחוץ. ליקויים בתפיסה מופיעים במגוון צורות. לעיתים מטופלים אינם יכולים יותר להרגיש כשנוגעים בהם, אחרים רואים את העולם בצורה מעוותת. לפעמים אני תוהה אם הם רואים אותי בתור פרופסור מוזר.

### CHRIS DIJKERMAN

Hebrew version  
provided by

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

