

כיצד המוח מקשר בין העולם הפנימי לעולם החיצוני?

Yoav Livneh*

המחלקה למדעי המוח, מכון ויצמן למדע, רחובות, ישראל

סוקרת צעירה

HILLEL

גיל: 12



כשאנו רעבים ומריחים מאכל טעים, רואים אותו, או רק חושבים עליו, מתחיל רצף אירועים בגופנו: ריר מצטבר בפינו; מיצי עיכול והורמוני עיכול מופרשים, ועוד. כל זה קורה עוד לפני שטעמנו מהאוכל – כיצד? מוחנו חוזה את העתיד, לא כמעשה קסמים, אלא בלמידה מחוויית עבר. המוח מחשב ללא הרף תחזיות לגבי העולם סביבנו, המאפשרות לנו להעריך את מהירות הנסיעה של מכונית מתקרבת ולחצות את הכביש בבטחה; לשחק כדורגל ולרכוב על אופניים. יתרה מזו, המוח מחשב תחזיות לגבי עולמנו הפנימי, הרוחש בתוך גופנו. במאמר זה אתאר כיצד המוח לומד מניסיון עבר כדי לקשר בין אירועים בעולם סביבנו להתרחשויות בגופנו, במטרה לחזות את צורכי הגוף. אסביר גם כיצד תחזיות אלה קשורות קשר הדוק לאופן שבו אנו חווים רגשות, ולכן הבנתן עשויה לסייע לנו להבין טוב יותר את הבסיס המוחי לבעיות פסיכיאטריות שונות.

תקשורת מוח-גוף

הגוף והמוח מתקשרים זה עם זה בכל רגע, לאורך כל חייו. תקשורת זו חיונית לבריאותנו הגופנית והנפשית – כיצד היא מתרחשת? לפי התיאוריות המסורתיות

בנושא, כאשר חל שינוי בגופנו, למשל ספיגת מזון במערכת העיכול או עליית חום הגוף, המסר על כך עובר למוחנו, והמוח מגיב על ידי שליחת פקודות לשינויים בגוף, דוגמת הפעלת מערכת העיכול או הזעה לקירור הגוף. מצב זה דומה לבקרת מיזוג אוויר בביתנו – כאשר נהיה חם מדי, חישן חש בכך ושולח מסר למזגן שיקרר יותר.

דמיינו שאתם מתהלכים ברחוב, עבר זמן רב מאז שאכלתם את ארוחת הצוהריים, ואתם רעבים מאוד. אם יגיע לאפכם ריח מאכל טעים, הדבר יגרום מיד להפעלת תגובה מורכבת ומתואמת בכל גופכם – ריר יצטבר בפיכם; מיצי עיכול יופרשו במערכת העיכול; אינסולין (הורמון החשוב לספיגת סוכר בגוף) יופרש מהלבלב, ועוד. כל זה קורה עוד לפני שבכלל הגיע אוכל אל פיכם. דוגמה זו ממחישה כי מוחנו מבצע בקרה על תפקודי גופנו לא רק כתגובה לשינויים בגוף, אלא גם בציפייה לשינויים עתידיים. ואכן, כבר לפני יותר ממאה שנים המדען הרוסי איוון פבלוב חקר את התופעה ותיאר אותה. על מחקריו החשובים והחדשניים לתקופתו, הוא זכה בפרס נובל [1].

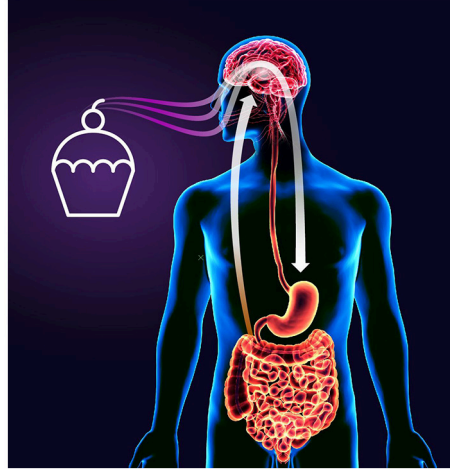
המוח מנבא שינויים עתידיים בתוך הגוף

אז מדוע צריך לחזות את העתיד כדי לבצע בקרה על תפקודי הגוף? מחקרים רבים בעקבות עבודתו של פבלוב הראו שאם מונעים את הפעלת התחזיות המוחיות הללו, למשל על ידי הכנסת מזון ישירות לקיבה דרך צינורית, ללא התראה מראש, גופנו מתקשה לספוג את הסוכרים מהמזון, ונוצר מצב זמני הדומה למאפיינים של מחלת הסוכרת. הסיבה לכך היא שכאשר המזון כבר נמצא בתוך מערכת העיכול, תגובת הגוף אליו היא איטית מדי. חשוב לציין שתחזיות מוחיות מסוג זה הן בעלות משמעות לא רק לעיכול מזון, אלא גם לתפקודי גוף נוספים כמו שמירה על מאזן הנוזלים והמלחים של הגוף.

למידה מחוויית העבר היא רבת-חשיבות לבקרת המוח על תפקודי גוף תקינים. מוחנו יודע לחזות את צורכי הגוף על בסיס למידה מחוויית עבר. חוויית אלה הן חוויית פנימיות, כלומר שינויים בתוך גופנו. דוגמה קיצונית לכך היא למידה להימנע ממאכל שגרם לנו קלקול קיבה. אם ניתקל במאכל הזה שוב, ההימנעות עשויה להיות תגובת גועל למראייה המאכל המסוים, לריחו, או לטעמו. למידה מסוג זה חיונית להישרדות בעלי חיים בטבע – כך הם נמנעים ממזון מזיק וממחלות. למעשה, למידה מחוויית עבר היא כל כך מהירה, והזיכרון שנותר ממנה כה חזק וארוך-טווח, שמדענים משתמשים בה למחקר מנגנונים כלליים של למידה וזיכרון במוח. מה שמוחנו בעצם לומד במצבים האלה הוא קישור בין אירוע בעולם החיצוני לנו (לדוגמה, ריח של מאכל מסוים) לבין אירוע בתוך גופנו (למשל, שינויים במערכת העיכול הגורמים לבחילה או לכאב בטן, איור 1). אך כיצד מוחנו יוצר קישורים בין העולם החיצוני לעולם הפנימי? ומהי החשיבות של כך מעבר לבקרה על תפקודי הגוף?

איור 1

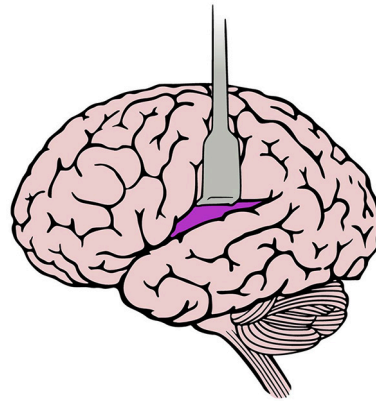
מוחנו מתווך ביו העולם סביבנו לבין הסביבה הפנימית בגופנו. האיור מראה אדם שרואה ומריח עוגה. המידע מחוש הראיה וחוש הריח גורם להעברת פקודה מהמוח לקיבה, הגורמת לשינויים כגון שחרור מיצי עיכול (חץ יורד). המידע על השינויים במערכת העיכול ולבסוף גם עיכול האוכל עובר חזרה למוח לעדכן אותו על המצב הנוכחי של הגוף (חץ עולה).



איור 1

איור 2

תרשים של המוח האנושי. קליפת המוח היא החלק החיצוני, בעל הקפלים הרבים, שנראה באיור. האינסולה (בסגול) מתחבאת בתוך הקפלים וניתן לראותה רק כאשר מציצים ביניהם.



איור 2

קליפת המוח (Cerebral cortex)

השכבה החיצונית של המוח ביונקים. קליפת המוח מעורבת בתפקודים המתקדמים יותר של מוחנו כגון זיכרון; קשב; שפה; דמיון; קבלת החלטות ותכנון ארוך-טווח.

אינסולה (Insula)

אחד מחלקי קליפת המוח, אשר נסתרת בתוך קפל עמוק במיוחד בקליפה. האינסולה מעורבת בחישה של תפקודי הגוף ובקרה עליהם; בחוש הטעם; ברגשות, ובמודעות לתחושות כגון רעב, כאב ועייפות.

אינסולה - 'האי הבודד' במוחנו שֶמְקַשֵּׁר בין העולם הפנימי לעולם החיצוני

קליפת המוח, השכבה החיצונית הדקה והמפותלת של המוח שנמצאת מתחת לגולגולתנו, אחראית על התפקודים המתקדמים יותר של מוחנו כגון זיכרון; קשב; שפה; דמיון; קבלת החלטות ותכנון ארוך-טווח. באחד מהקפלים הפנימיים ביותר בקליפת המוח מתחבא אזור בשם **אינסולה**. אזור זה קיבל את שמו בשל מיקומו המבודד בתוך קפל פנימי של קליפת המוח (insula - אי בודד בלטינית), אך האינסולה אינה באמת מתבודדת, היא מתקשרת עם אזורים רבים מאוד במוח, ונחשבת לאחד האזורים ה'מקושרים' יותר במוחנו (איור 2).

אחד המאפיינים הייחודיים של האינסולה בקליפת המוח הוא שאזור זה מקבל מידע חושי מפורט על המתרחש בתוך גופנו. בדומה לאזורים אחרים בקליפת המוח שקולטים דרך מערכות הראייה והשמיעה מידע מן העולם שבחוץ, האינסולה היא האזור בקליפת המוח האחראי לחישה המתרחש בתוך הגוף. הבנתנו את ארגון קליפת המוח עוצבה במידה רבה בעקבות המחקרים של רופא המוח, הניירולוג הקנדי וִיילְדֵר פֶּנְפִילְד בשנות הארבעים של המאה העשרים. פנפילד מיפה את תפקוד החלקים השונים של קליפת המוח כשהתכוון לניתוח בחולים במחלת הנפילה (אפילפסיה). כדי לדעת היכן לנתח, והיכן להיזהר במיוחד לא לפגוע,

דימות מוחי (Neuroimaging)

שימוש בטכנולוגיות שונות כגון CT ו-MRI, ליצירת דימות או מיפוי של מבנה המוח ותפקודו. דימות מוחי משמש לצורכי רפואה ומחקר מדעי.

רשת הבולטות (Salience network)

רשת אזורים במוח, המגיבים לאירועים משמעותיים ובולטים עבורו. הרשת מנטרת ללא הפסק אירועים חיצוניים, מזוהה עם זיהוי וסינון גירויים בעלי בולטות ורלוונטיות ועם הפניית הקשב לאירועים בולטים בסביבה.

הפעיל פנפילד גירוי חשמלי מקומי חלש בקליפת המוח של החולים. למשל, כאשר הוא גירה באזור של חישת מגע ביד, החולים דיווחו שהם מרגישים מגע בידם. באופן דומה, כאשר הוא גירה חשמלית את האינסולה, החולים דיווחו על תחושות פנימיות, בעיקר במערכת העיכול, כמו 'פרפרים בבטן' או בחילה. נוסף על כך פנפילד גילה שגירוי חשמלי של האינסולה מפעיל תנועות מעיים, בדומה לתנועות המתרחשות בעת עיכול מזון. כעבור שנים רבות, כאשר התפתחו טכנולוגיות **דימות מוחי** המאפשרות לחוקרים "להתבונן" בפעילות מוחית של נבדקים אנושיים ממש בזמן התרחשותה, חוקרים גילו שהאינסולה רגישה לשינויים רבים בפנים הגוף. עם אלה נמנים למשל שינויים בלחץ הדם; בקצב הלב; בנשימה; בטמפרטורה, וכמובן במערכת העיכול. כמו כן חוקרים גילו שפרט לשינויים בתוך הגוף, האינסולה רגישה גם לאירועים בעולם סביבנו. למעשה, האינסולה נחשבת לחלק מרכזי ברשת של כמה אזורים במוח שמעבדים יחד מידע על אירועים יוצאי דופן או בולטים במיוחד בעולם סביבנו - **רשת הבולטות** (network the salience). לסיכום, האינסולה שבמוחנו מקשרת בין העולם הפנימי לעולם החיצוני, ומייצרת תחויות על שינויים עתידיים בגוף לאור למידה מחוויית עבר - למשל, ללמוד להימנע ממאכל שגרם בעבר לבחילה, או לחפש מאכל שכבר ידוע כטעים ומזין [2]. האם כל זה חשוב רק לאכילה? ומה הקשר של זה לרגשות?

האינסולה שותפה לעיבוד החוויה הרגשית

למידת קשרים בין אירועים חיצוניים ופנימיים אינה מאפיינת רק בקרה על תפקודי הגוף. שינויים גופניים כמו דפיקות לב חזקות או עלייה בלחץ הדם, מהווים חלק בלתי נפרד מהאופן שבו אנו חווים רגשות. ואכן, ישנן תיאוריות פסיכולוגיות רבות שלפיהן החוויה הרגשית מושפעת מהאופן שבו אנו מפרשים שינויים פנימיים בתוך גופנו, ואולי אפילו נקבעת על פיו במידה מסוימת. כך לדוגמה נפרש דפיקות לב מוגברות באופן שונה אם הן מתרחשות רגע לפני עלייה לבמה להופעת בכורה בפני קהל ("אוי, יש לי פחד קהל"), או לאחר ריצה ממושכת ("הלב שלי דופק מרוב מאמץ"). באופן דומה, תחושה של 'פרפרים בבטן', או בחילה קלה, תקבל פרשנות שונה על ידי מוחנו, ולכן תעורר בנו רגשות שונים, אם היא נחוות לאחר שאכלנו יותר מדי עוגה ("אכלתי כל כך הרבה עד שיש לי בחילה"), או רגע לפני עלייה לבמה להופעה ראשונה בפני קהל ("אוי, יש לי פחד קהל"). בשל תפקידה המרכזי בקישור בין החיצוני והפנימי, האינסולה נחשבת למוקד מרכזי של הרשת העצבית במוחנו אשר גורמת לחוויה הרגשית שלנו. כלומר, תפקידה העיקרי של האינסולה בחוויה הרגשית הוא בדיוק קישור בין אותות מהגוף (למשל, תחושת בחילה קלה או דפיקות לב) לעולם סביבנו (מראה הקהל כשעולים לבמה להופעת בכורה) [3].

שינויים בפעילות האינסולה מְדוּחֵים שוב ושוב במחקרים מדעיים כקשורים למגוון בעיות פסיכיאטריות: הפרעות אכילה כגון אנורקסיה נרבוזה; התמכרות לסמים; דיכאון וחרדה. מעורבותה של האינסולה בעיבוד החוויה הרגשית יכולה להסביר זאת. חוקרים רבים סבורים כי בבעיות פסיכיאטריות שונות ישנם שינויים באופן שבו מוחנו מפרש אותות מתוך הגוף. למשל, לפי תיאוריות בנושא, חרדה קשורה לרגישות יתר לאותות מהגוף, בעוד שדיכאון קשור לרגישות מופחתת אליהם. כדי להמחיש זאת, נבחן דוגמה קיצונית - הפרעת פְּנִיקָה. בעת התקף פאניקה אדם עלול לחוות קוצר נשימה קל, אך רגישות יתר לקוצר הנשימה הקל תגרום לתגובה רגשית חזקה יותר שרק תגביר את קוצר הנשימה במידה הולכת וגדלה, עד לכדי חוויה של חוסר יכולת לנשום. ואכן, ישנן עדויות מחקריות לכך שהתקפי פאניקה קשורים גם לשינויים

בפעילות האינסולה. לסיכום, כיום ישנו עניין גובר בחקר מנגנוני התקשורת בין הגוף למוח, מתוך ההבנה שתקשורת זו חשובה לתחומים רבים בבריאות הגוף והנפש [4].

באילו דרכים אנו חוקרים את האינסולה כיום?

כיצד ניתן לפענח את מנגנוני התקשורת בין הגוף למוח? כדי לעשות זאת עלינו להביא בחשבון שתופעות גופניות רבות משתנות בו-זמנית, כל הזמן (לחץ דם, קצב נשימה, רמות סוכר בדם וכדומה), אך למרות זאת עלינו לערוך ניסויים שיבודדו תופעה גופנית אחת בכל פעם. למשל, למדוד בנפרד את רמות הסוכר בדם, או את תכולת מערכת העיכול, או את קצב הלב, או את לחץ הדם; או לשלוט בכל אחד מאלה בנפרד. בכל ניסוי מודדים מספר תופעות גופניות משנים תופעה גופנית אחת ומודדים או שולטים בפעילות העצבית באינסולה. כך נוכל להבין כיצד האינסולה מגיבה לשינויים הרבים בגופנו, וגם כיצד היא מבצעת בקרה על תפקודי הגוף לאור שינויים בעולם סביבנו. בקבוצת המחקר שלי במכון ויצמן למדע, אנו עורכים ניסויים שכאלה בחיות מודל (עכברים) ובנבדקים אנושיים. פיתוחים טכנולוגיים חדשים מאפשרים לנו "לקרוא" דפוסי פעילות מורכבים באינסולה (המכונים 'הקוד העצבי') ולפענחם, על ידי רישום פעילותם של מאות ואף אלפי תאי עצב באינסולה בזמן, בתגובה לאירועים חיצוניים ופנימיים [5, 6]. נוסף על רישום הפעילות באינסולה, אנו יכולים לשלוט בפעילותה בחיות מודל, כלומר "להכתיב" ישירות לאינסולה דפוסי פעילות חשמלית מורכבים באופן מלאכותי באמצעות שילוב בין שיטות גנטיות ואופטיות חדשות.

כך אנו יכולים למשל לרשום פעילות של מאות תאים באינסולה בו-זמנית בתגובה לריח של מאכל, ולזהות רק את אותם תאים שהגיבו לריח המאכל. אז ביכולתנו להפעיל באופן מלאכותי, בהיעדר כל ריח אמיתי, רק את התאים שהגיבו לריח. כך ניצור באינסולה ציפייה מלאכותית לאוכל (עקב הפעלה ספציפית של התאים שהגיבו לריחו), ונוכל למדוד כיצד היא משפיעה על תפקודי הגוף.

אנו מקווים שמחקרים מסוג זה יספקו תובנות משמעותיות לגבי המנגנונים שבהם המוח והגוף מתקשרים זה עם זה. מחקרים רבים מראים כי במגוון רב של בעיות פסיכיאטריות ובריאותיות ישנם שינויים בתקשורת בין מוחנו לגופנו [4]. לכן, אנו מקווים שהתובנות ממחקרנו וממחקרים רבים של אחרים בתחום, יוכלו בעתיד להוות בסיס ליצירת גישות טיפוליות חדשות למחלות המתאפיינות בשינויים בגופנו, במוחנו, ובתקשורת ביניהם.

מקורות

1. Smith, G. P. 2000. Pavlov and integrative physiology. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 279:R743–55. doi: 10.1152/ajpregu.2000.279.3.R743
2. de Araujo, I. E., Schatzker, M., and Small, D. M. 2020. Rethinking food reward. *Annu. Rev. Psychol.* 71:139–64. doi: 10.1146/annurev-psych-122216-011643
3. Barrett, L. F., and Simmons, W. K. 2015. Interoceptive predictions in the brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 16:419–29. doi: 10.1038/nrn3950
4. Khalsa, S. S., Adolphs, R., Cameron, O. G., Critchley, H. D., Davenport, P. W., Feinstein, J. S., et al. 2018. Interoception and mental health: a roadmap. *Biol. Psychiatry Cogn. Neurosci. Neuroimaging* 3:501–13. doi: 10.1016/j.bpsc.2017.12.004

חיית מודל

(Animal model)

בדרך כלל חיית מעבדה, בשונה מחיות משק (חקלאות) או מחיות בר (מחקר שדה), אשר לה תכונות המאפשרות עריכת מחקר שתוצאותיו יכולות לסייע בהבנת הביולוגיה בחיות אחרות ובבני אדם.

5. Livneh, Y., Ramesh, R. N., Burgess, C. R., Levandowski, K. M., Madara, J. C., Fenselau, H., et al. 2017 Homeostatic circuits selectively gate food cue responses in insular cortex. *Nature*. 546:611–6. doi: 10.1038/nature22375
6. Livneh, Y., Sugden, A. U., Madara, J. C., Essner, R. A., Flores, V. I., Sugden, L. A. 2020. Estimation of current and future physiological states in insular cortex. *Neuron*. 105:1094–111.e10. doi: 10.1016/j.neuron.2019.12.027

פורסם אונליין: 29 בספטמבר 2022

נערך על ידי: Idan Segev

מנחה מדעי: Yachel Baker

ציטוט: Livneh Y (2022) כיצד המוח מקשר בין העולם הפנימי לעולם החיצוני? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.867981-he

תורגם והותאם: Livneh Y (2022) How Does the Brain Connect the World Around Us to the World Inside Us? Front. Young Minds 10:867981. doi: 10.3389/frym.2022.867981

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחבר מצהיר כי המחקר נערך בהיעדר כל קשר מסחרי או כלכלי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2022 © Livneh 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.

סוקרת צעירה

HILLEL, גיל: 12

אני כמעט בן 12, לומד בכיתת מחוננים ומשלב אומנות ומדעים. זכיתי באולימפיאדות ארציות במתמטיקה, ואני גם משתתף בתוכנית דה- וינצ'י באוניברסיטת תל אביב. הפסנתר מלווה אותי מגיל צעיר – אני מלחין, מנגן ושר בהרכב מוזיקלי. כלבים הם אהבה ענקית שלי. לפני כחודשיים חוויתי אובדן של קני, כלב שהיה לי כאח, ומאז ישן בתוך ליבי. הסקירה הראשונה שלי מוקדשת לזכרו של כלבי האהוב.

הכותב

YOAV LIVNEH

אני ראש קבוצת מחקר במחלקה למדעי המוח במכון ויצמן למדע. יחד עם הסטודנטיות והסטודנטים שלי אנו חוקרים כיצד המוח מפרש אותות מתוך הגוף שלנו, וכיצד המוח משפיע על תפקודי הגוף. בתיכון למדתי כימיה ומוזיקה, ותכננתי להיות פסיכולוג שמסייע לאנשים דרך 'שיחות נפש'. בלימודי לתואר ראשון באוניברסיטה העברית בירושלים, התעניינתי מאוד בשאלת 'גוף ונפש', אבל תוך כדי התאהבתי פתאום בביולוגיה, בפרט בדרך להבין את המוח (ביורוביולוגיה, הביולוגיה של המוח), וכיום אני חוקר בתחום. באותה תקופה התאהבתי



גם באשתי לעתיד, דפנה נחמני, שהיא כיום ביולוגית וראש קבוצת מחקר באוניברסיטה העברית. אנו מגדלים יחד את ילדינו בסקרנות ובאהבה רבה. *yoav.livneh@weizmann.ac.il

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



הוצאת פרונטיירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK