



## כיצד מוחי מתקשר עם גופי?

Athira Sivadas<sup>1\*</sup>, Kendal Broadie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>אוניברסיטת וונדרבילט, נאשוויל, טנסי, ארצות הברית  
<sup>2</sup>המחלקה למדעי הביולוגיה, אוניברסיטת וונדרבילט, נאשוויל, טנסי, ארצות הברית

### סוקרת צעירה

KIRSTY

גיל: 8



### נירון

(Neuron)

תא חשמלי בתוך מערכת העצבים שמתמחה בשליחת אותות ובקבלתם.

אתם רואים את הכדור נזרק לקראתכם, ממש כמה מטרים מכם. אתם רצים לתפוס אותו, ומפעילים את שרירי רגליכם בעוצמה המרבית שלכם. אתם תופסים את הכדור ואוחזים בו באצבעותיכם. ולפתע, אתם שומעים את קולה של אימכם קורא בשמכם, מבינים שהגיע הזמן לארוחת ערב, ולכן אתם ממהרים חזרה הביתה. כיצד כל זה קורה? אתם יודעים שמוחכם שולט בגופכם, אולם כיצד הוא יודע מה עיניכם רואות, או גורם לרגליכם לנוע? מוחכם מורכב ממיליארדי תאים שנקראים ניורונים. הניורונים שלכם נושאים מידע בצורה של פולסים חשמליים. ניורונים מתקשרים זה עם זה ועם שאר הגוף בנקודות מפגש מיוחדות שנקראות סינפסות.

### האופן שבו ניורונים שולחים ומקבלים הודעות

כל התאים בגופנו מתקשרים זה עם זה. כך אנו מסוגלים לעשות דברים רבים ביומיום, כמו למשל אכילת ארוחת בוקר ולמידה בבית הספר. במוחנו ובגופנו, ניורונים מתקשרים על ידי

## יון (Ion)

חלקיק מלח טעון חיובית או שלילית שנע דרך ממברנות התא שלכם.

## סינפסה (Synapse)

צומת תקשורת נוירולוגי שבו היפתחות של בועית משחררת אותות כימיים.

## מוליך עצבי (Neurotransmitter)

אות כימי שמשוחרר בסינפסה כדי להיקשר לקולטן של התא הבא.

## קולטן (Receptor)

חלבון ממברנלי שנקשר למוליך עצבי במטרה לאפשר זרימה של יונים לתוך התא.

## איור 1

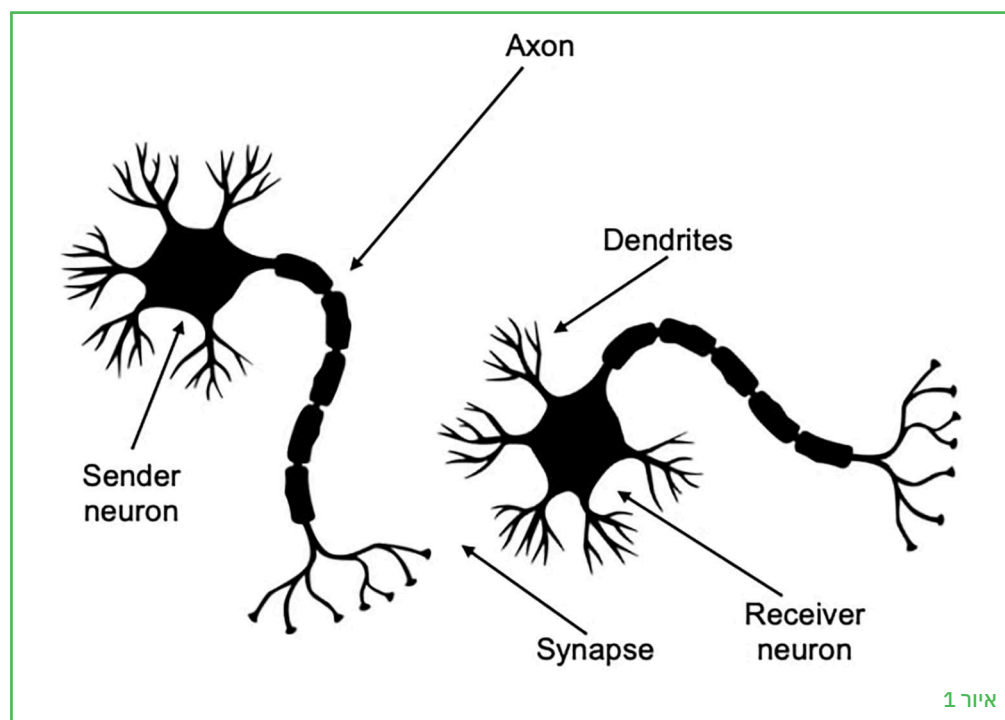
המבנה ותפקודו של תא עצב ("נוירון"). נוירונים שולחים ומקבלים אותות חשמליים במטרה לתקשר זה עם זה במערכת העצבים, ועם סוגים אחרים של תאים בגוף, במיוחד שרירים. בקצה אחד, לנוירונים יש שלוחות דמויות ענפים שנקראות דנדריטים, אשר מאפשרות להם לקבל אותות. נוירון אחד שולח את האות (הנוירון השולח) והאחר מקבל אותו (הנוירון המקבל). ה"גזע" הארוך של הנוירון נקרא אקסון, ולאורכו "מטייל" האות החשמלי ארוך-הטווח. בסוף האקסון ישנו צומת תקשורת מיוחד שנקרא סינפסה. הסינפסה מחברת את קצה האקסון בנוירון אחד לדנדריט של נוירון שני. בין הנוירונים ישנו מרווח צר מאוד שדרכו עובר אות תקשורת מהנוירון השולח לנוירון המקבל.

שליחת הודעות תוך שימוש באות חשמלי. אות חשמלי זה נוצר על ידי זרימה של חלקיקים טעונים שנקראים **יונים**, שנעים ברחבי החלק החיצוני של ממברנת התא [1]. התנועה של יונים נושאת גל חשמלי לאורכו של הנוירון (איור 1). לנוירון יש ענפים שנקראים דנדריטים, שמקבלים אותות, ושלוחה ארוכה ופשוטה יותר שנקראת אקסון, ששולחת אותות. **סינפסות** נמצאות בקצוות של אקסונים. כיצד האות החשמלי עובר מנוירון אחד לאחר? הנוירון משחרר אותות כימיים, שנקראים **מוליכים עצביים**, אשר "נוסעים" לאורך הסינפסה אל נוירון אחר כדי ליצור גל חשמלי חדש בתא הבא.

כיצד אות חשמלי מתקדם לאורך נוירון? הממברנה של הנוירון מכילה תעלות זעירות שניתנות לפתיחה ולסגירה כדי לאפשר ליונים להיכנס לתא או לצאת ממנו [1]; כמו דלתות אוטומטיות. כשתעלה כזו נפתחת, היא מאפשרת ליונים לזרום לתוך התא, והם נושאים איתם מטען חשמלי (איור 2A). זה גורם לתעלה אחרת בקרבת מקום להיפתח, ואז לתעלה הבאה, כך שהגל החשמלי נע לאורך התא. כדי לחזור למנוחה, תעלה אחרת נפתחת לאט יותר ומאפשרת ליונים לעזוב את התא [1]. זה מסיים את הגל החשמלי, ומכין את הבמה לגל החשמלי הבא שיתחיל מחדש את המחזור. תנועת היונים ממשיכה לאורך האקסון במטרה להגיע לסינפסה.

## כיצד סינפסה פועלת כדי לתקשר בין תאים?

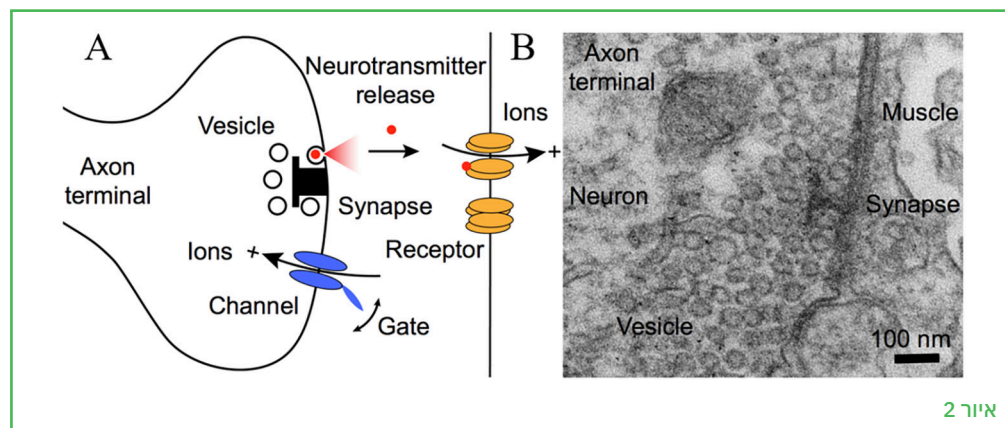
הגל החשמלי גורם לנוירון לשחרר כמות קטנה של מוליך עצבי כימי בסינפסה [1], ש"נוסע" לעבר הנוירון שבצידה השני של הסינפסה (איור 2A) [1]. זה קורה מהר מאוד מאחר שהמרווח צר ביותר (איור 2B). כשהמוליך העצבי הכימי מגיע לתא המקבל, הוא נקשר למולקולה שנקראת **קולטן** על גבי הממברנה של התא המקבל, באופן דומה להתאמה בין



איור 1

**איור 2**

(A) תקשורת בסינפסה. בסינפסה, אות חשמלי בתוך הניורון מתורגם לשחרור של אות כימי שנקרא מוליך עצבי. יונים שזורמים לתוך קצה האקסון הם האות עבור בועיות שמכילות מוליך עצבי להתחבר עם ממברנת התא כדי לשחרר את המוליך העצבי. לאחר מכן, המוליך העצבי יזז לצד השני כדי להיקשר לחיישנים בתא המקבל, אשר נפתח במטרה לאפשר ליונים לזרום לתוך אותו התא. (B) תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני של צומת עצב-שריר. בקצה האקסון של הניורון תוכלו לראות בועיות עגולות ואת הסינפסה שנראית כמבנה בצורת T. ממברנת השריר המקופלת ביותר מכילה את החיישנים, אולם אלה קטנים מדי מכדי שנוכל לראותם, אפילו עם מיקרוסקופ אלקטרוני. שימו לב לכך שהסינפסה היא מרווח צר במיוחד בין הניורון לבין ממברנת התא.



איור 2

מפתח ומנעול. הקישור גורם לתעלות יונים בתא המקבל להיפתח. כעת, יונים זורמים אל תוך התא המקבל, ונוצרת הודעה חשמלית חדשה [2].

התהליך בסינפסה גם מאפשר לניורונים שלנו לתקשר עם השרירים שלנו, ולהורות להם מתי לזוז. הסינפסה בין תא העצב לבין תא השריר נקראת **צומת עצב-שריר** (איור 2B) [3]. המוליך העצבי שמשוחרר בצומת זה נקרא **אצטילכולין**. ממש כמו בניורונים, ההיקשרות של אצטילכולין גורמת לתעלות להיפתח בתא השריר, מה שמאפשר ליונים לזרום אל תוך השריר [3]. ההודעה החשמלית הזו גורמת לשריר להתכווץ או להתקצר. חשבו על תפיסת כדור: מוחכם מורה לניורון לשלוח אות חשמלי לסינפסה בצומת העצב-שריר, וזה גורם למוליך העצבי להיות משוחרר בשרירי האצבע שלכם, כך שיוכלו להתכווץ כדי לתפוס את הכדור.

**כיצד סינפסות מאפשרות לנו לראות ולשמע?**

החושים שלנו מסייעים לנו לגלות את העולם סביבנו, ומתמרים צורות חיצוניות רבות של אנרגיה - אור, צליל, תנועה - להודעות חשמליות בניורונים שלנו. בעינינו, לדוגמה, ישנם ניורונים מאתרי אור שמגיבים לדברים שאנו רואים [1]. חלק מהניורונים המיוחדים האלה מאתרים אור צבעוני (אדום, ירוק, כחול), וחלק מאתרים רק שחור ולבן. אור גורם לתעלות להיפתח בניורונים מאתרי האור, אשר שולחים הודעה חשמלית לסינפסות של הניורונים בתוך מוחכם (איור 3) [1]. לאחר מכן, המידע הזה מעובד על ידי המוח כדי לפרש את תמונת האור.

כדי שנשמע, חיישנים חושיים באוזניים שלנו מופעלים על ידי תנודות של צליל שמתקדמות באוויר. תנודות אלה מניעות שערות זעירות על גבי הניורונים של האוזן [1]. תנועה זו פותחת תעלות, שמאפשרות ליונים לזרום לתוך הניורון וליצור הודעה חשמלית. כתוצאה מכך, משוחררים מוליכים עצביים בסינפסה בין תא השיערה לבין הניורון במוח. עוצמת הצליל תלויה בכמות השערות שמתכופפות - כיפוף גדול יותר גורם לשחרור של יותר מוליך עצבי בסינפסה, מה שיוצר יותר הודעות חשמליות בתוך המוח. האותות האלה "מטיילים" לניורונים של המוח, והם מפרשים אותם בתור צלילים [1].

**צומת עצב-שריר (Neuromuscular Junction)**

הסינפסה המיוחדת שבין ניורון מוטורי לבין תא שריר.

**אצטילכולין (Acetylcholine)**

סוג מסוים של מוליך עצבי שפועל בצומת עצב-שריר.

- Neuron = ניורון
- Axon terminal = קצה האקסון
- Muscle = שריר
- Synapse = סינפסה
- Vesicle = בועית
- Receptor = קולטן
- Neurotransmitter = מוליך עצבי
- Channel = תעלה.

### איור 3

סינפסות רבות מתקשרות בתוך המוח. התמונה הזו היא תרגום אומונטי של הניורונים במערכת העצבים שלכם. הצבעים השונים מייצגים סוגים רבים של ניורונים, כמו למשל אלה שמאפשרים לכם לראות ולשמוע, או ללמוד ולזכור. השלוחות הרבות מכל ניורון מייצגות את הסינפסות השונות שניורונים יוצרים זה עם זה. לניורונים רבים יש אלפי סינפסות, שמאפשרות להם לקבל מידע רב, לעשות לו אינטגרציה ולהעבירו לניורונים אחרים. למערכת העצבים יש תכונה שנקראת פלסטיות – מכוחה סינפסות חדשות יכולות להיווצר כשאנו לומדים, ולהתחזק כשאנו יוצרים זיכרונות. בינתיים, סינפסות שאיננו משתמשים בהן מתכווצות או קטנות במספרן. שינויים אלה במוח יכולים לשנות את האופן שבו ניורונים מתקשרים.

### פלסטיות (Plasticity)

היכולת של סינפסות להשתנות בהתבסס על כמות השימוש שלכם בהן.



איור 3

## הדרך שבה סינפסות מאפשרות לנו ללמוד ולזכור

אחד הדברים החשובים ביותר לגבי מוחנו הוא שהכמות של סינפסות וגודלן משתנים כשאנו משתמשים בהן. תכונת השינוי הזו של המוח בתגובה למה שאנו חווים נקראת **פלסטיות**. פלסטיות מאפשרת לנו ללמוד מידע חדש, ולזכור את מה שלמדנו [2]. אם אנו משתמשים בסינפסות שלנו הרבה, יכולות להיווצר סינפסות רבות נוספות. אם איננו משתמשים בהן כל כך, סינפסות יכולות להתכווץ או שמספרן קטן [2]. חוזק התקשורת בין סינפסות עשוי אף הוא להשתנות כתלות בתדירות שבה אנו משתמשים בהן. שימוש רב יכול להגדיל את כמות המוליך העצבי שמשוחררת, או את מספר החיישנים של מוליכים עצביים בתא המקבל [2]. סינפסות, כמו שרירים, מתחזקות על ידי שימוש בהן. שימוש רב בסינפסות שלנו יוצר סינפסות חדשות וחזקות שנשארות במוח במשך שנים רבות, לעיתים כמה עשורים [2]. זה יכול לסייע לנו ליצור זיכרונות לטווח ארוך. ואכן, אנו יכולים לזכור דברים במשך שנים; חשבו על הפנים של אימכם, או על חברים טובים מכיתה א'.

## מה קורה כשסינפסות לא עובדות כראוי?

מאחר שהסינפסות חשובות כל כך לתנועה, לחישה, ללמידה ולזיכרון, קל לראות כיצד בעיות עם סינפסות יכולות לגרום למחלות וללקויות [4–6] כשסינפסות לא עובדות כראוי, המוח לא יכול לתקשר בתוך עצמו ועם השרירים. הפרעות תנועה לעיתים קרובות נובעות מבעיות בצומת עצב-שריר [4]. לדוגמה, ישנה מחלה הנגרמת כשהמוליך העצבי לא מפונה החוצה מהסינפסה. אצטילכולין משוחרר בסינפסה בצומת העצב-שריר כדי לגרום לשרירים להתכווץ. אם הוא לא מפונה כראוי לאחר מכן, האצטילכולין ימשיך להיקשר לחיישני השריר. זה יגרום לכיווץ ולתנועה לא תקינים של השריר, מאוחר יותר לאובדן של הקולטנים, ובסופו של דבר לאובדן של השרירים [4].

באופן דומה, בעיות עם סינפסות יכולות לגרום לאובדן של תפיסה חושית. חירשות עשויה להיגרם כתוצאה מבעיות בסינפסות של תאי השיער באוזן שלנו, שגורמות להפעלת יתר של העצבים באוזן [5]. אם נזכרנו השמיעה שלנו מופעלים שוב ושוב, נדרשת הודעה חשמלית חזקה יותר כדי להמשיך להפעילם. כתוצאה מכך, תאי השיער באוזן בקרב אנשים עם בעיות שמיעה צריכים להרגיש צליל חזק יותר כדי להעביר את ההודעה לניורונים שמגיעים למוח [5]. במקרים של עיוורון, בעיות בסינפסות קולטן האור יכולות לגרום לתאים רגישים לאור להיעלם לחלוטין [6]. לכן, אור לא יכול להפוך לאותות חשמליים, והמידע לא נישא אל המוח.

בעיות בפלסטיות של סינפסות במוח יכולות לגרום ללקויות חשיבה ולאויזם [1, 2]. אוטיזם גורם לירידה באינטראקציה חברתית וליכולת מופחתת לתקשר עם חברים ומשפחה. נראה שאויזם עשוי להיגרם על ידי בעיות עם פלסטיות – סינפסות לא משתנות כפי שהן אמורות להשתנות כשהן בשימוש [1, 2]. כמו כן סינפסות חדשות לא נוצרות בצורה טובה כמו בדרך כלל, ולכן התקשורת בין ניורונים נחלשת. אף על פי שהגורמים לאויזם עדיין אינם ברורים, אנו יודעים שהם קשורים לגנים שלנו.

## מדוע חשוב לדעת על סינפסות?

תפקודים רבים בגופכם מבוצעים על בסיס התקשורת בין תאים שמתרחשת בסינפסות! ממש ברגע זה כשאתם קוראים את המאמר הזה, מיליארדי סינפסות שולחות אותות שחולפים ברחבי מוחכם ועוברים אל שאר גופכם. ניורונים גורמים לתנועה בשרירים שלכם דרך סינפסות בצמתי עצב-שריר, ומאפשרים לעיניכם לנוע ולאצבעותיכם לתופף! סינפסות המוח שלכם מקבלות מידע חושי מעיניכם, מאוזניכם ומהחושים האחרים שלכם, ואתם משתמשים בכל המידע הזה כדי לקבל את ההחלטות הטובות ביותר לגבי מה עליכם לעשות הלאה. הסינפסות שלכם משתנות במטרה לאפשר לכם ללמוד ולזכור את מה שאתם לומדים. אנו מקווים שהסינפסות שלכם יסייעו למידע במאמר הזה להישאר במוחכם כזיכרון ארוך-טווח!

## מקורות

1. Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. C., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., and Jackson, R. B. 2014. *Campbell Biology. 10th Edn.* Glenview, IL: Pearson Education.
2. Kennedy, M. B. 2016. Synaptic signaling in learning and memory. *Cold Spring Harbor Perspect. Biol.* 8:1–3. doi: 10.1101/cshperspect.a016824
3. Slater, C. R. 2017. The structure of human neuromuscular junctions: some unanswered molecular questions. *Int. J. Mol. Sci.* 18:2183. doi: 10.3390/ijms18102183
4. Merzendorfer, H. 2005. Muscular dystrophies: a novel player. *J. Exp. Biol.* 208:7. doi: 10.1242/jeb.01388
5. Clarkson, C., Antunes, F. M., and Rubio, M. E. 2016. Conductive hearing loss has long-lasting structural and molecular effects on presynaptic and postsynaptic structures of auditory nerve synapses in the cochlear nucleus. *J. Neurosci.* 36:10214. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0226-16.2016

6. Pottackal, J. 2015. Early events of synapse disassembly in the damaged retina. *J. Neurosci.* 35:9539. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1340-15.2015

פורסם אונליין: 30 בנובמבר 2022

נערך על ידי: Xi-Nian Zuo

מנחה מדעי: Karla Holmboe

ציטוט: Sivadas A and Broadie K (2022) כיצד מוחי מתקשר עם גופי? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.540970-he

תורגם והותאם מ: Sivadas A and Broadie K (2020) How Does My Brain Communicate With My Body? Front. Young Minds 8:540970. doi: 10.3389/frym.2020.540970

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Sivadas and Broadie 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 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.

## סוקרת צעירה

**KIRSTY, גיל: 8**

קוראים לי Kirsty ואני אוהבת מתמטיקה. אני גם אוהבת לקרוא ספרים בקינדל שלי. יש לי אחות קטנה שצעירה ממני בשלוש שנים.

## הכותבים

**ATHIRA SIVADAS**

אני סטודנטית לתואר ראשון במסלול קדם-רפואה באוניברסיטת וונדרבילט בנאשוויל, טנסי. תחומי העניין שלי נטועים בבסיס המולקולרי של הפרעות נוירולוגיות, כמו למשל אוטיזם ותסמונת דאון. אני מתעניינת במיוחד בהשפעות הסביבתיות על המבנה של המוח והפלטיות שלו. בזמני הפנוי, אני מתנדבת בצלב האדום האמריקאי. \*athira.sivadas@vanderbilt.edu

**KENDAL BROADIE**

אני פרופסור לנוירוביולוגיה באוניברסיטת וונדרבילט. חקרתי סינפסות במשך יותר מ-30 שנים לרבות התפתחות של סינפסות (סינפטוגנזה), תפקוד סינפסות (הולכה נוירולית) ושינוי תלוי-שימוש בסינפסות



(פלסטיות סינפטית). אני גם ממדל מחלות סינפטיות, כמו למשל הפרעות הספקטרום האוטיסטי.

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



**הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל**  
Hebrew version provided by



**THE SAGOL NETWORK**