

# ייצוגם של זיכרון ושל רצון בתאי המוח האנושי



## מאת פרופ' יצחק פריד

### צונאמי קוגניטיבי בפתח

**א**נו עומדים בפתחו של צונאמי קוגניטיבי. עם הזדקנות האוכלוסייה שכיחות המחלות הנירולוגיות הניווניות, כגון מחלת אלצהיימר או מחלת פרקינסון, עולה. ההסתברות לחלות במחלת אלצהיימר עולה עם הגיל ושיעורה מגיע ל-33% לאחר גיל 85. ההסתברות לדמנציה או לסימנים של ליקוי קוגניטיבי מזערי (Minimal Cognitive Impairment – MCI) בגיל 65 ומעלה היא כ-33%. הצפי של ארגון הבריאות העולמי הוא ליותר ממאה מיליון חולי אלצהיימר בשנת

2050. הכוונה כמובן למחלה המתבטאת בין השאר בהפרעות זיכרון קשות, המופיעות כבר בשלבים סימפטומטיים מוקדמים. אציין שניצני המחלה ניתנים לגילוי 20 שנה לפני התפרצות התסמינים הקוגניטיביים. תרופות למחלה אין בנמצא, אך לאחרונה חלה התקדמות־מה בתחום זה. לעומת זאת שתלים רפואיים – קוצבי מוח למיניהם – כבר משמשים לטיפול במחלות שונות, כגון אפילפסייה ומחלת פרקינסון. שתלים אלו מבוססים על הפעלת זרמים חשמליים במעגלים מסוימים במוח כדי לדכא פעילות לא תקינה של תאי המוח מחד ולהעצים פעילות תקינה שלהם מאידך. שפתו של

המחלה. כיוון שקשה לצפות מתי יקרו ההתקפים, החולים שמושתלות בהם אלקטרודות מנוטרים 24 שעות ביממה ביחידה מיוחדת בבית החולים, וכך בקרות ההתקף האפילפטי יהיה אפשר לרשום את פעילות המוח ולראות היכן מתחילה הסערה החשמלית. ניטור מתמשך מְזמן אפשרות לרישום פעילות המוח לא רק בזמן התקפי אפילפטיה אלא גם בזמן תפקודים קוגניטיביים כגון זיכרון. אלקטרודות מיוחדות רושמות פעילות גם של תאי עָצב בודדים – ניורונים – במצב מיוחד זה שבו החולים ערים ומסוגלים לדווח על תוכן התודעה – רצונות, זיכרונות, רגשות והחלטות. לפנינו אפוא מצב ייחודי של מעקב אחרי תוכן התודעה האנושית עד לרמה של תא בודד.

### מרכז הזיכרון: תאי המקום, תאי הרשת ותאי המושג

אחת ממערכות המוח המרתקות ביותר היא המערכת שנמצאת בעומק האונה הרקתית, ומרכזתה הוא מבנה עצבי שצורתו צורת סוסון ים, והיא המקור לשמו – היפוקמפוס. למעשה, כל חוויה חושית שאנו חווים תהיה זמינה כזיכרון הכרתי בעתיד רק אם תעובד במרכז זה. את אחד הקשרים המדהימים ביותר בין פעילות תא מוחי להתנהגות גילה מדען המוח ג'ון אוקיף (John O'Keefe): הוא מצא במכרסמים תאים המקודדים את מקומה של החיה בסביבתה. תאים אלה ידועים בשם "תאי המקום" (place cells). כל תא כזה מגביר מאוד את קצב הירי שלו במקום מסוים במרחב שבו מסתובבת החיה. לאחר מכן גילה צמד חוקרים נורווגים, אדוורד ומיי-בריט מוזר (Edvard and May-Britt Moser), את תאי הרשת (grid cells), באזור שמוכיל אל ההיפוקמפוס, אזור המכונה "הקורטקס האנטוריאלי" (entorhinal cortex).

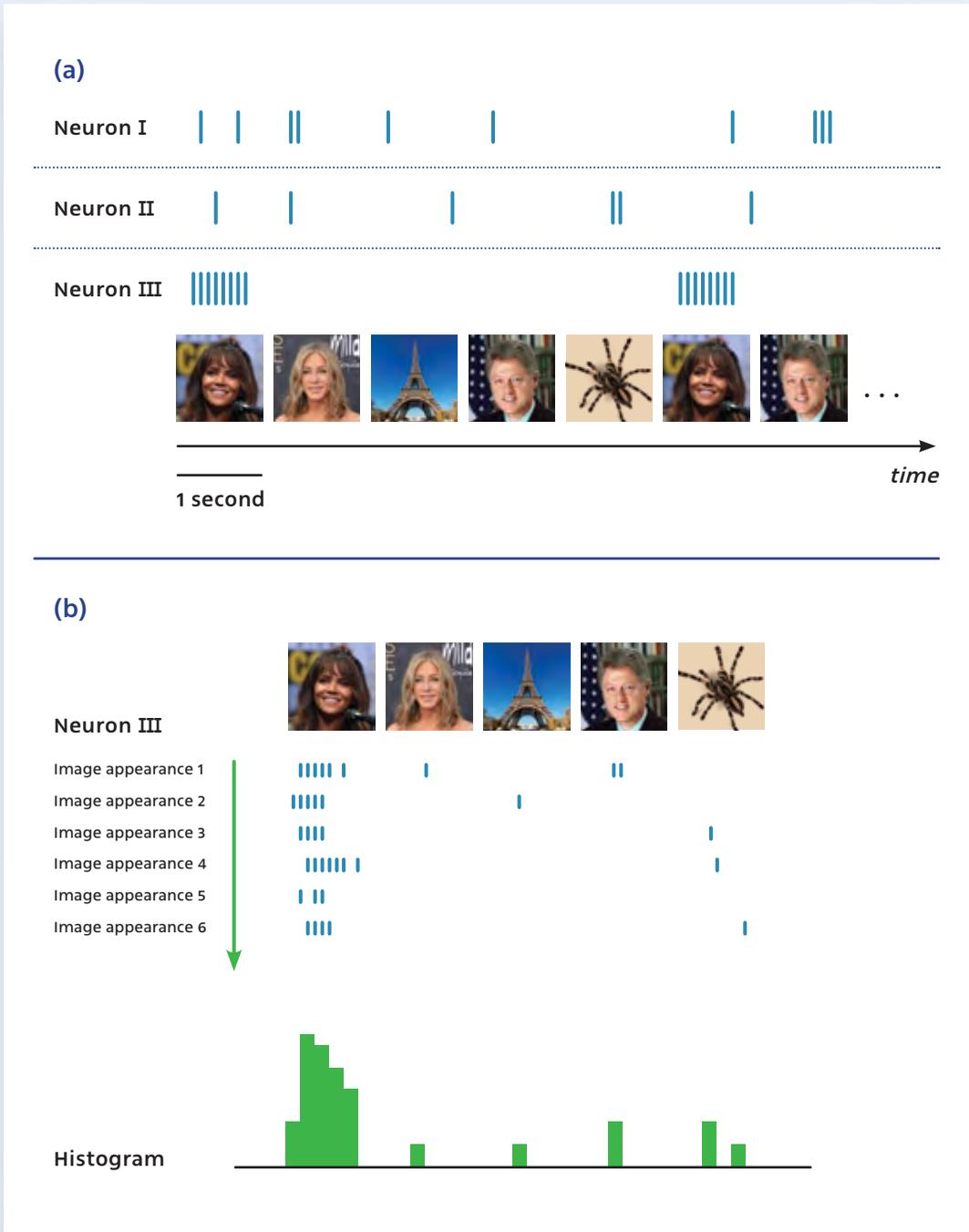


המוח היא שפה חשמלית – תאי המוח מייצרים התפרקות חשמליות הקרויות "פוטנציאלי פעולה". בלשון מדעי המוח התפרקות חשמלית זו קרויה "ירי", דהיינו התא יורה – לעיתים אף בקצב של עשרות "יריות" בשנייה. מרחב כל ההתפרקות החשמליות האלו של ביליוני תאים מייצר את הפונקציות הבסיסיות של המחשבה האנושית – זיכרונות, רצונות, תפיסה ורגשות.

### צוהר מיוחד לתפקודים קוגניטיביים – ניתוחי מוח בערות

צוהר מיוחד אל מנגנוני ההכרה האנושית נפתח לעיתים בניתוחי מוח בערות. במחצית הראשונה של המאה העשרים פיתח מנתח המוח וילדר פנפילד (Wilder Penfield) שיטה לגירוי קליפת המוח באמצעות מתן גירויים חשמליים למוח כשהמנותחים ערים. שיטה זו חשובה בעיקר משום שהיא מאפשרת לזהות את מרכזי הדיבור והשפה אצל מנותחים, שכן מידע זה חיוני לתכנון ניתוח שלא יערב מוקדים אלו ולא יפגע בהם. היו מקרים שבהם גירוי חשמלי באונה הרקתית (temporal lobe) גרם למנותחים לחוות זיכרונות מהעבר. חוויות אלו היו חזקות, והמנותחים חוו אותן כאירועים בהווה למרות ההכרה שהם נמצאים בחדר הניתוח. פנפילד הסיק מכך שבמעמקי האונה הרקתית יש מנגנון שמתיר את חרצובות העבר.

הזדמנות נדירה לחקור מנגנונים אלו מצויה היום בנסיבות מיוחדות ברפואה שבהן מושתלות אלקטרודות במוח לצורך טיפול במחלות נירולוגיות מסוימות כגון אפילפטיה או פרקינסון. במקרה של אפילפטיה קשה ובלתי נשלטת באמצעות תרופות ניתן לעיתים להשתיל אלקטרודות במוח כדי לאתר את מוקד הסערות החשמליות במוח שגורמות להתקפי המחלה, כדי שיהיה אפשר לכתור בניתוח מוח את המוקד ובכך לרפא את



**איור 1.** רישום פעילות של שלושה תאים בהיפוקמפוס בתגובה לסדרה של תמונות של אנשים שונים. תא 3 מגיב בכל פעם שתמונה של דמות מסוימת – השחקנית הלי ברי (Hally Barry) – מוקרנת. כל קו מייצג פוטנציאל פעולה של התא – מה שקרוי ירי (firing). כאשר מסכמים בלוח התחתון (b) את תגובת התא לשש חזרות של אותה תמונה, רואים בבירור שהתא מגיב סלקטיבית לאותה דמות. התא יגיב לכל קלט חושי שמסמל את הדמות הזו גם אם הקלט הוא כיתוב שם השחקנית או השמעת שמה. תא כזה הוא תא של מושג (concept cell)<sup>3</sup>. חלק מתמונות הידועים שהוצגו בניסוי הוחלפו כאן בתמונות חופשיות מזכויות יוצרים.

אחת התגליות המפתיעות שגילינו במחקר תאי המוח בחולים הנירוכיורוגיים היו תאי המושג – concept cells. תאים אלו באזור ההיפוקמפוס והקורטקס האנטורינאלי הגיבו בפעילות מוגברת לאנשים מסוימים או למקומות מסוימים. לדוגמה, באחד הנבדקים תא בהיפוקמפוס הגיב לשחקנית ג'ניפר אניסטון (Jennifer Aniston) אך לא לעשרות דמויות אחרות שהוצגו לו (דוגמה של תא אחר ראו באיור 1). כל תמונה של ג'ניפר אניסטון, אם בצבע ואם בשחור-לבן, ובכל וריאציה, הפעילה את התא. אפילו השם הכתוב של השחקנית או הקראת שמה בקול הביאו לתגובה של התא. התא הגיב אפוא בסלקטיביות לדמות אחת, אבל כל הצגה של דמות זו – בלי קשר לקלט החושי – הפעילה את התא. התא הגיב אפוא למושג המופשט ולא לקלט החושי. גם כאשר הנבדקים דמיינו את הדמות – דהיינו מצב ללא קלט חושי – פעל התא בדומה לפעילותו בזמן ראייה. בסדרת מחקרים על תאי המושג נמצא שהם פועלים בקידוד שהוא לא רק ספציפי ומופשט אלא גם מותנה בתודעה של הקלט החושי. יתרה מזו, תא שמגיב לדמות מסוימת מתחיל להגיב לכל גירוי אחר שקשור אסוציאטיבית לאותה דמות, כגון המקום שבו הייתה הפגישה עם הדמות הזו.

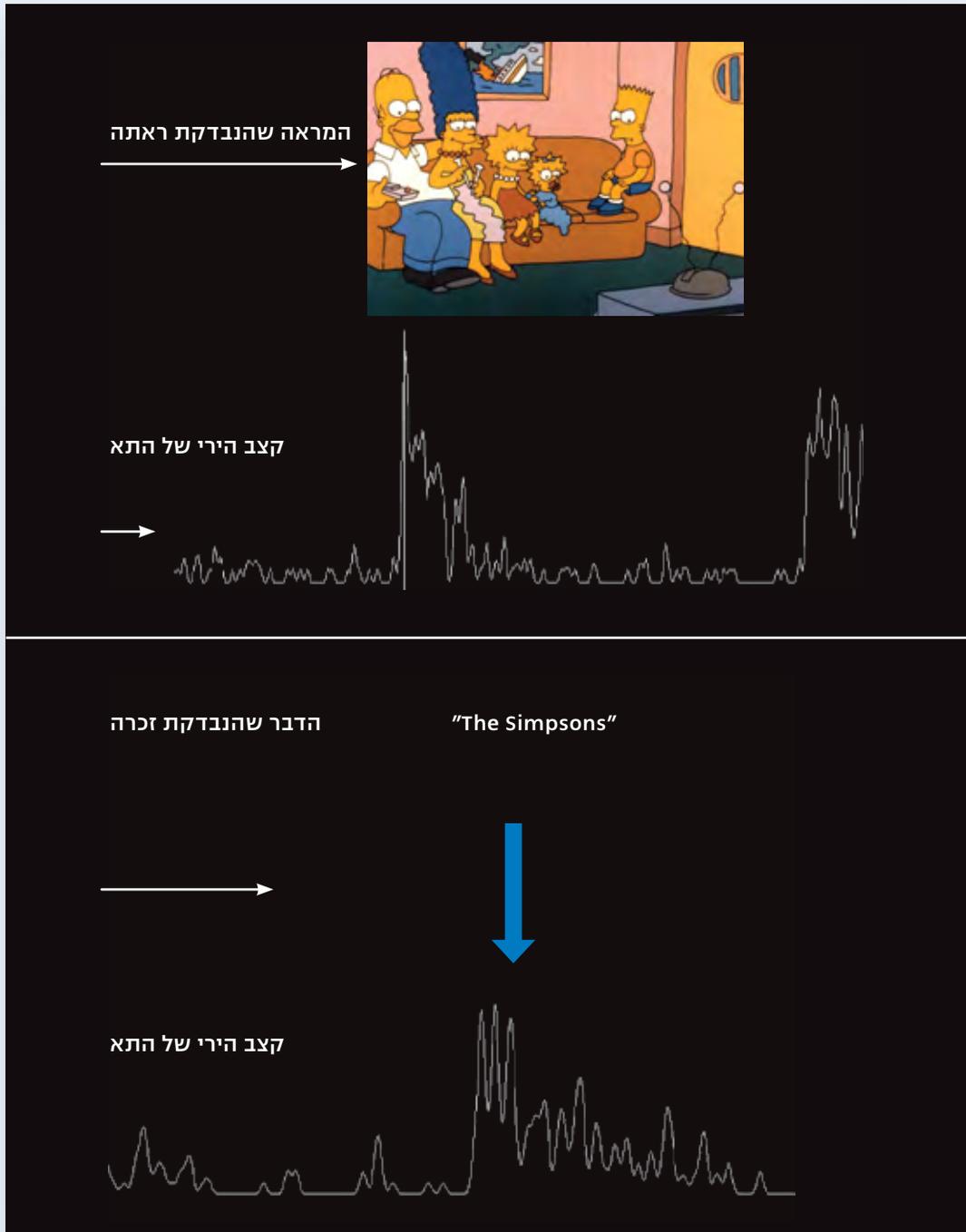
במחקר נוסף שנעשה במעבדתי, בהובלתה של ד"ר הגר גלברד-שגיב ובשיתוף פרופ' רפי מלאך ממכון ויצמן למדע, נמצא שתאי המושג פועלים גם במהלכה של אפיזודה שבה אותו מושג נוכח. לדוגמה, תא שהגיב לכל דמות מסדרת הטלוויזיה "הסימפסונים" (The Simpsons) ירה לאורך אפיזודה בת עשר שניות שבה מככבים הסימפסונים. יתרה מזאת, כשהנבדקת ניסתה להיזכר בכל האפיזודות שראתה, התא החל לירות כשנייה-שתי שניות לפני שהיא נזכרה שראתה את הסימפסונים<sup>1</sup> (ראו איור 2).



כל תא כזה מגביר פעילותו ברשת של מקומות במרחב הדו-ממדי שבו מסתובבת החיה. רשת זו היא בעלת תכונות סימטריות של משושה. המערכת המורכבת מההיפוקמפוס והקורטקס האנטורינאלי (entorhinal-hippocampal system) היא אפוא מעין נווטן (GPS) מוח, והיא הפכה לאחת המערכות הנחקרות ביותר במערכת העצבים. קיומה של מערכת דומה במוח האנושי אומת גם במחקרים במעבדתי בהובלת ארנה אקסטרום (Arne Ekstrom) וג'וש ג'ייקובס (Josh Jacobs) בשיתוף פעולה עם מייק כהנא (Mike Kahana) מאוניברסיטת פנסילבניה, באמצעות רישום פעילות באזורים אלו אצל חולים שהשתלנו במוחם אלקטרודות לצורך הטיפול באפילפסייה במרכז הרפואי של אוניברסיטת קליפורניה בלוס אנג'לס (UCLA). ואכן, גילינו את קיומם של תאי מקום ושל תאי רשת כאשר ביקשנו מהחולים לנווט בסביבה, כגון עיר זרה במשחק מחשב וירטואלי.

אם כך, סביר להניח שתאים אלו הם הבסיס ליכולתנו לנווט בסביבה ולפתח זיכרונות מרחביים, יכולת שהייתה חשובה בשדות הציד הקדומים, כפי שהיא חשובה בערים ובנופים המגוונים שבהם אנו חיים ופועלים היום. מחקר מעניין שנעשה בהדמיה בסורק מגנטי (MRI) של מוחם של נהגי מוניות בלונדון הראה שיכולת הניווט המעולה שלהם ברחובות העיר באה לידי ביטוי בנפח אזור ההיפוקמפוס במוחם. לא מן הנמנע שתלותנו הגוברת בתוכנות ניווט למיניהן ובנווטנים איננה תורמת לתפקוד ההיפוקמפוס במוחו של האדם במאה העשרים ואחת.

אזור ההיפוקמפוס במוח האנושי אינו מוגבל לתפקודי זיכרון מרחבי. ההיפוקמפוס הוא תחנה עליונה שאליה מתנקז עולם החושים, ובו למעשה האובייקט שבעולם החיצוני כבר אינו דומה למכלול הפוטונים שנופלים על הרשתית. האובייקט פה הוא כבר אובייקט מנטלי (mental object).



**איור 2.** למעלה: ירי תא מושג (concept cell) בהיפוקמפוס בזמן שהנבדקת ראתה קטעי וידאו קצרים. בכל פעם שראתה קטעי וידאו של "הסימפסונים" (The Simpsons) הגיב התא בירי לאורך הקרנת הקטע (neuronal firing). למטה: לאחר שהנבדקת נתבקשה להיזכר בקטעים שראתה, אותו התא החל לירות כשנייה ויותר לפני שהיא דיווחה על זיכרון הקטע של "הסימפסונים". התא החל לירות אפוא לפני שהזיכרון פרץ אל המודעות. התמונה שהוצגה בניסוי הוחלפה כאן בתמונה חופשית מזכויות יוצרים.

כשירגיש רצון לעשות זאת, ולציין בשעון שעמד מולו את זמן הופעת הרצון. העולה ממחקר זה הוא שלפני תחושת הרצון כבר יש פעילות חשמלית מוחית שמקדימה אותו ולמעשה מנבאת אותו. כדי להביא את התופעה הזו לרמה התאית רשמנו מִתָּאִים באונה המצחית והרקתית בזמן שנבדקים נתבקשו לבצע פעולות רצוניות כהזת אצבע, אך לדווח מתי חשו ברצון לביצוע הפעולה. נראה שעוד לפני תחילת הרצון כפי שחשו ודיווחו הנבדקים החלו תאים באזור העזר המוטורי בהגברת קצב הירי, ואליהם הצטרפו בהדרגה עוד ועוד תאים באזור זה, ובנקודה מסוימת חשו הנבדקים את הרצון שבעקבותיו כ־200–300 מילי-שניות לאחר מכן בוצעה התנועה, בדומה למה שמצא ליבט. נראה אפוא ש"מקהלה" של תאים באזור זה, שאליה מצטרפים בהדרגה תאים נוספים, מגיעה ל"קרבנדו" שהוא לבסוף הביטוי ההכרתי לרצון. בדומה לזיכרון, שם ראינו פעילות של תאים בודדים במעמקי האונה הרקתית שעולה בהדרגה לפני מודעות לזיכרון, כאן אנו רואים פעילות של תאים באונה המצחית, אשר מתרחשת שניות לפני המודעות לרצון. האם באמצעות רישומים מהמוח נוכל לקרוא החלטות ורצונות ואף לעשות זאת לפני שהנבדקים מודעים למחשבותיהם? תופעה זו מתנגשת לכאורה עם הרגשתנו הסובייקטיבית של חופש הרצון, שכן היכן מתרחשת החלטתנו אם איננו מודעים לה? ומי באמת בשליטה פה? במחקר שעשינו במרכז הרפואי תל אביב ע"ש סוראסקי – איכילוב, בהובלת עמרי פרץ ובשיתוף פעולה עם פרופ' חזי ישורון מאוניברסיטת תל אביב, הראינו שניתן לפי אותות חשמליים במוח לנבא החלטתו של נהג לפנות ימינה או שמאלה בצומת – לא רק לפני הפנייה עצמה אלא אף לפני שהנהג החליט בתודעתו לאן יפנה<sup>2</sup> (ראו איור 3).



ממחקר זה נובע שאותם תאי מושג שיורים בזמן החוויה החושית – כגון צפייה באירוע – הם שיורים גם ממש לפני שאנו נזכרים באותה חוויה. אם כן, התא נכנס לפעולה עוד לפני שהזיכרון צף לו בתודעתנו ללא שום חשיפה חושית לחוויה עצמה. ברמת האוכלוסייה של תאים אלו נראה שיש עלייה הדרגתית בקצב הירי לפני פריצת הזיכרון אל התודעה.

### רצון חופשי?

בכל רגע של חיינו הערים אנו מצויים בממשק שבין זיכרון לרצון. ראינו ששפת הזיכרון היא שפה חשמלית. גירויים חשמליים באונה הרקתית יכולים לעורר זיכרונות מסוימים, ותאי מוח במעמקי אונה זו באזור ההיפוקמפוס וסביבתו, שירו בזמן חוויה חושית, מתחילים לירות לפני שהזיכרון של החוויה צף בהכרתנו.

במחקר על גירויים חשמליים בחולים שהושתלו בהם אלקטרודות מסיבות קליניות מצאנו שגירוי חשמלי באזור שבעומק האונה המצחית קרוב לקו האמצע יכול לעורר רצון לפעולה – כגון הזזת אצבע. אזור זה, שנקרא אזור העזר המוטורי (Supplementary Motor Area – SMA), הוא בעל תפקיד חשוב בייזומן של פעולות מוטוריות, ואכן נזק באזור זה בשני צידי המוח עלול לגרום לאובדן היכולת ליזום פעולות.

כמו כן ידוע שלפני פעולה מוטורית רצונית ניתן לרשום מהקרפת פוטנציאל חשמלי איטי שמתפתח שנייה או שתיים לפני הפעולה, הקרוי readiness potential. חוקר בקליפורניה בשם בנג'מין ליבט (Benjamin Libet) הראה שפוטנציאל חשמלי זה מתחיל למעשה מאות מילי-שניות ויותר לפני הרצון עצמו כפי שחש אותו הנבדק שנתבקש פשוט להזיז אצבע

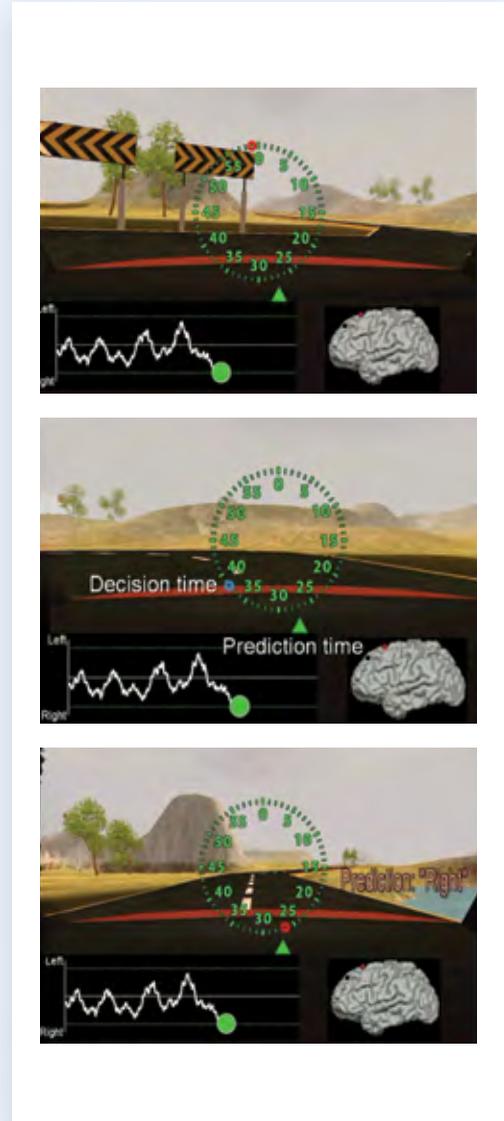
## שתלי המוח החדשים

בעשורים האחרונים חלה התקדמות רבה במה שקרוי גירוי מוחי עמוק (Deep Brain Stimulation - DBS). זוהי טכנולוגיה רפואית המשתמשת בשתלי מוח שמפעילים גירויים חשמליים במעמקי המוח, ותחילתה בטיפול בהפרעות תנועה בחולים נירולוגיים, כגון חולי פרקינסון או חולים הסובלים מרעד קשה (essential tremor). עד היום טופלו כבר מאות אלפי חולים בשיטה זו, ובהצלחה. בשנים האחרונות הופעלה שיטה זו גם במחלות פסיכיאטריות, כגון דיכאון קשה.

**האם ניתן להשתמש בגירוי חשמלי גם לשיפור תפקודים קוגניטיביים, ובעיקר זיכרון?**  
 במחקר שפרסמנו ב־2012 הופעל גירוי חשמלי במערכת ההיפוקמפאלית בזמן שנבדקים – חולים שבמוחם הושטלו אלקטרודות לאיתור מוקד אפילפסייה – למדו לנווט בעיר וירטואלית במחשב. החוקרים מצאו שגירוי בזמן הלמידה באזור האנטורינאלי ולא בהיפוקמפוס שיפר את הזיכרון המרחבי למיקומם של אתרים בעיר. הגירוי החשמלי ניתן אפוא בזמן הקידוד, דהיינו קליטת האינפורמציה, והביא לידי שיפור ביצועי הזיכרון כפי שנבדקו מאוחר יותר. במאמר אחר הראינו שגירויים עדינים – בעוצמה של 50 מיקרואמפר – הספיקו לשיפור זיכרון לפרצופים ולדמויות.

חלק חשוב במנגנון הזיכרון קורה בשינה, ודווקא בשינה העמוקה ביותר המאופיינת בגלים איטיים. בזמן הגלים האיטיים מתרחשת במוח תופעה חשמלית מדהימה: קבוצות תאים גדולות נכנסות לפעילות חשמלית ויוצאות ממנה כמקהלה אחת, מעין מצבים של on-off. בזמן זה מתרחש דו-שיח חשמלי בין ההיפוקמפוס לקליפת המוח, שבו מועברת האינפורמציה שנקלטה בזמן ערות מההיפוקמפוס אל מאגרים יציבים יותר בקליפת

מחקר זה מצביע לא רק על יכולת קידוד עצבי לקרוא מחשבות אלא גם על יכולת לקרוא מחשבות עוד לפני הופעתן בתודעה.



**איור 3.** רישום מהאונה המצחית בזמן שהנבדק נוהג במשחק מחשב ומתקרב לצומת. השעון מראה את הצפי לפי פעילות המוח (התמונה למטה) שניתן בזמן 25 (חץ ירוק - prediction-time) ושלפיו הנהג יפנה ימינה. הנהג מחליט בתודעתו (תמונה אמצעית) בזמן 38 (עיגול כחול - decision time), ואכן פונה ימינה בזמן 59 (התמונה למעלה). אם כן, לא רק שאנו יכולים לקרוא את מחשבות הנהג, אלא שאנו יכולים לעשות אף לפני שהנבדק מודע להן.

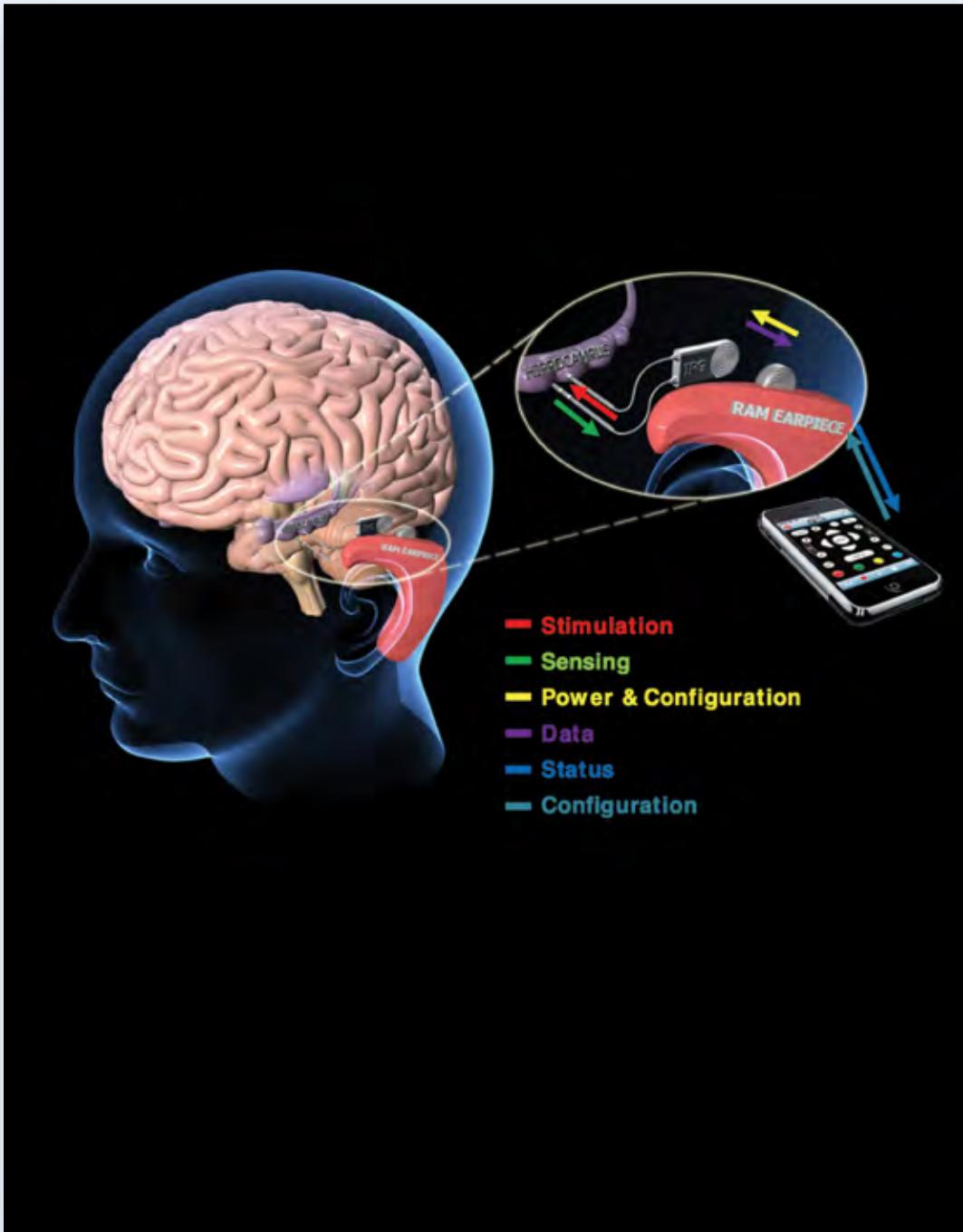
למוחקו באופן חשמלי. אם תועצם פעילות הקשורה במקום מסוים, אזי כשהעכבר יתעורר הוא ילך למקום זה, כאילו השתלנו לו זיכרון מועצם למקום זה, משל הוא "זוכר" את המיקום, אלא שבמקרה זה הזיכרון למעשה הושתל במוח. באותה דרך כבר הודגמה מחיקת זיכרון למקום מסוים בעכברים כדי שיימנעו מללכת למקום זה כשיתעוררו.

עתיד דמיוני שכזה – שבו אפשר להשתיל ולמחוק זיכרונות ואולי גם רצונות – מעלה מחשבות על עתיד דספוטי שבו ייעשה שימוש לרעה בטכנולוגיות כאלו להגבלת החופש של בן האנוש והאוטונומיה האנושית. מנגד, ניתן לחזות גם שימוש לטובה בטכנולוגיות אלו בתחום הרפואה, לדוגמה: עזרה לחולים הלוקים בהפרעות זיכרון או לחולים בעלי תסמונת פוסט-טראומטית (PTSD). בתסמונת PTSD ניתן אולי למחוק כך את זיכרון הטראומה ולנתקו מהחרדה הצמודה לו. במבט אל העתיד ניתן לחשוב על רפואת מוח שתהיה למעשה דומה למלאכתו של עורך (editor), מעין עריכה עצבית, ותאפשר לערוך זיכרונות ואולי אף רצונות. אם נתבונן בהתפתחויות הצפויות במודולציה של זיכרון ופיתוח עזרי זיכרון או שתלי זיכרון, ניתן לחזות כמה שלבים בעריכה זו: השלב הראשון הוא קידוד (decoding), ופירושו שאנו מזהים את החתימה העצבית של פונקצייה קוגניטיבית, כגון זיכרון, מפעילות של תאים בודדים, של קבוצות תאים ושל גלי מוח – EEG – שאפשר לרושםם מתוך המוח או גם על הקרקפת. ככל שהערוצים של הפעילות רבים יותר, וכשהיא נרשמת מתוך המוח עצמו, הקידוד יכול להיות מדויק יותר; השלב השני הוא העצמה (enhancement) של הפעולה הקוגניטיבית – הפעלת גירויים שיעצימו זיכרון, רצון או תפיסה, באופן כולל; השלב הבא כרוך בהעצמה או בהחלשה – החדרה או מחיקה – של זיכרון, של תפיסה, של רצון או אף של רגש באופן ספציפי לתוכנם.

המוח, שאכן ישמשו בסיס לזיכרון לטווח ארוך. על בסיס זה תהינו אם אפשר לשפר את הטמעת הזיכרון במוח באמצעות חיזוק הקשר או הסנכרון של פעילות קליפת המוח וההיפוקמפוס. לשם כך הפעלנו גירוי חשמלי באונה המצחית בתיאום זמנים עם מצבי ההפעלה של מקהלת תאי העצב לפי מקצב הגלים האיטיים בהיפוקמפוס. גירוי חשמלי מורכב כזה, התלוי במשוב ממקום אחר במוח, קרוי closed loop – מעין לולאה סגורה שבה גירוי ומשוב תלויים זה בזה. ואכן, כאשר הופעל גירוי חשמלי בדרך זו, הראינו שהזיכרון, כפי שנבחן לאחר השינה, השתפר והיה טוב מזה שבשנת לילה ללא גירויים חשמליים.

מחקר זה, בהובלת ד"ר מאיה גבע-שגיב במעבדתי בשיתוף פעולה עם פרופ' יובל ניר מאוניברסיטת תל אביב, מצביע על אפשרות לפיתוח מכשירי עזר לזיכרון, מעין מקבילה מוחית למכשיר שמיעה או לשתל (cochlear implant) שמחליף את שבלול השמיעה, שהוא איבר השמיעה שלנו המצוי באוזן הפנימית.

שתל זיכרון כזה יסייע להעצמת הזיכרון בכללותו, אך האם ניתן להרחיק לכת ולדמיין מכשיר עזר שמעצים זיכרונות מסוימים או אף משתיל אותם? ואולי אף מסוגל למחוק זיכרונות אחרים? פעולות אלו, הדומות לפקודות paste-delete, אינן עוד נחלת מדע דמיוני בלבד. בזמן השינה העמוקה – שנת הגלים האיטיים – מתרחשת תופעה חשמלית שבה הייצוג החשמלי של זיכרונות מסוימים עובר מעין "שידור חוזר", מה שקרוי replay, שיכול להיות מהדורה דחוסה של הפעילות החשמלית המקורית. בעכברים ישנים ניתן לזהות שידור חוזר כזה, לדוגמה בפעילות תאי המקום בהיפוקמפוס אשר קודדו מקום מסוים בסביבה שבה הסתובב העכבר בזמן ערות. אכן, ניתן לזהות פעילות זו בזמן אמת בשלב השינה העמוקה, ובזמן הזיהוי להתערב ולהעצים שידור חוזר זה או להחלישו ואף



**איור 4.** תרשים של שתל עזר לזיכרון (memory aid) עתידני. השתל כולל אלקטרודות באזור ההיפוקמפוס, אשר קולטות פעילות (sensing) ומפעילות גירויים חשמליים (stimulation). השתל כולל העברה של הספק (power) ונתונים (data) באופן אלחוטי (wireless). הוא כולל גם התקן חיצוני המורכב על האוזן ובו רכיבים לאבטחת מידע ולדחיית ארטיפקטים וכן סוללה קטנה. Based on design for UCLA DARPA RAM [Restoring Active Memory] project [I. Fried, PI]; illustration courtesy of Dejan Markovic

מלאכותית מרחיבות את המרחב הקוגניטיבי האנושי ומטשטשות את הגבולות שבין המוח לבין סביבתו החישובית. יש לשקול את ההשלכות האתיות של התערבות חיצונית בפונקציות שהן הבסיס לאוטונומיה של האדם ולקיים דיון בפקוח על פיתוח טכנולוגיות אלו ועל השימוש בהן ובאסדרה (רגולציה) בעניינן. הנושאים שיהיו במרכז הדיונים בעתיד טכנולוגיות המוח יכללו הגנה על מידע מוחי של הפרט ועל השימוש בו, נגישותן של טכנולוגיות רפואיות מתקדמות לאוכלוסייה נזקקת ושימוש בשתלי מוח מעצימים בגבולות הרפואה ומחוץ לרפואה. ■

התפתחות הנירוטכנולוגיה מעמידה אתגרים בפני האנושות. מודולציה של רצונות ושל זיכרונות היא אולי נחלת העתיד הרחוק, אך ממשקי מוח-מכונה מתפתחים במהירות. ממשקים אלו יכולים כבר היום להשתמש בפעילות של המוח כדי לתקשר ישירות עם הסביבה ולאפשר לאנשים משותקים להזיז עזרים בסביבה, ולהפעיל תקשורת מילולית. חברות כגון Neuralink מפתחות טכנולוגיות שמאפשרות כריית מידע מהמוח בעשרות ערוצים בשידור אלחוטי דרך מאות אלקטרודות זעירות ובמינימום פולשנות. האפשרויות להכלאת ממשקי מוח ושתלי מוח עם טכנולוגיות של בינה

## מקורות

- 1) Gelbard-Sagiv, H., Mukamel R., Harel, M., Malach, R., Fried I. Internally generated reactivation of single neurons in human hippocampus during free recall. *Science* (2008) 322:96-101.
- 2) Perez, O., Mukamel, R., Tankus A., Yeshurun H., Fried I. Preconscious prediction of a Driver's Decision Using Intracranial Recordings, *Journal of Cognitive Neuroscience*. (2015 Mar) 11:1-11.
- 3) Suthana N., Fried, I., Percepts to recollections: Insights from single neuron recordings in the human brain. *Trends Cognitive Science* (2012) 16:427-436.

## להעשרה

- 1) Fried, I. Neurons as will and representation. *Nature Reviews Neuroscience* (2022) 23(2):104-114.
- 2) Geva-Sagiv, M., Mankin, E. A., Eliashiv, D., Epstein, S., Cherry, N., Kalender, G., Tchemodanov, N., Nir, Y., Fried, I. Augmenting hippocampal-prefrontal neuronal synchrony during sleep enhances memory consolidation in humans. *Nature Neuroscience* (2023) 26(6):1100-1110.
- 3) Quiroga, R. Q., Fried, I., Koch, C. Brain cells for grandmother. *Scientific American* (2013) 308(2):30-35.
- 4) Suthana N., Haneef Z., Stern J., Mukamel R., Behnke E., Knowlton B., Fried I. Memory enhancement and deep-brain stimulation of the entorhinal area. *New England Journal of Medicine* (2012) 366:502-510.