

## התמחות תפקודית במוח האדם

Josef Parvizi

המחלקה לנוירולוגיה, בית הספר לרפואה של סטנפורד, סטנפורד, קליפורניה, ארצות הברית

### סוקר צעיר

MADOC

גיל: 11



המוח ריתק אותנו במשך עידנים. חלק מהדיונים הרציניים הראשונים על מוח האדם התחילו במצרים העתיקה, היכן שמלך אלכסנדריה אפשר לבצע ניתוחים של פושעים בעודם בחיים, כדי לחקור את האנטומיה האנושית [1]. מי שביצעו את הניתוחים פתחו את עצם הגולגולת וראו את המוח בעודו חי. כאשר הם חתכו את המוח הם גילו חללים גדולים בתוכו. החללים האלה היו מחוברים אחד לשני כמו חדרים שונים באותו בית, והיו מלאים בנוזל שקוף לגמרי בעל מראה מיוחד, שכיום אנו מכירים בשם נוזל המוח והשדרה. המצרים היו נלהבים כל כך מהמצא הזה! הם חשבו שנשמת האדם שוכנת בתוך החדרים מלאי הנוזל האלה. הם ניסו להבין כיצד הנוזל נע בין החדרים האלה, מאחר שחשבו שזה עשוי להסביר כיצד פועלת הנפש האנושית.

כיום, נשמע מטופש לומר שנפש האדם קשורה לזרימה של נוזל בין חללים ריקים בתוך המוח, אבל בימים ההם הרפואה כולה עסקה בנוזלים בתוך הגוף ובאיזון ביניהם. רופאים ייחסו את בריאותו של האדם לאיזון בין סוגים שונים של נוזלים בתוך הגוף. הם חשבו במונחים של נוזלים מאחר שקדמת המדע באותם זמנים הייתה קשורה להעברת מים ממקור אל יעד מסוים, כלומר לעיר או לחווה יבשה. לא היו מכונות או מחשבים שיכלו לבנות סֶכָר, אבל היו הרבה ערוצים וגשרים מעשי ידי-אדם שדרכם אפשר היה להעביר מים ממיקום אחד לאחר. חפשו בגוגל "מוביל מים", ותמצאו תמונות מדהימות של ערוצי המים והגשרים האלה! במצרים, ביוון ובארצות המזרח התיכון השכנות לא היה הרבה גשם. לכן, אנשים נדרשו לחשוב הרבה על

נוזלים וכיצד אפשר להעביר אותם ממקום למקום. מאחר שהם חשבו כל הזמן על נוזלים, מציאת קבוצת חדרים בתוך המוח שהיו מחוברים ביניהם ומלאים בנוזל בעל מראה ייחודי הייתה עבורם פריצת דרך גדולה. הם חשבו שהם גילו את המקום שבו שוכנת נפש האדם!

כפי שאתם יכולים לראות, תיאוריות מדעיות תמיד עוקבות אחרי השיטות הרווחות באותה התקופה. כאשר השיטה היתה קשורה בנוזלים ובזרימתם, המדענים ניסו להסביר את תפקוד המוח במונחים של נוזלים ושל זרימתם בחללי המוח. כיום, השיטה הרווחת קשורה במחשבים ובחישוב, לכן הרבה מדענים מנסים להסביר את מוח האדם באמצעות השוואות לאופן פעולה של מחשב. במאה הבאה, כאשר החברה תתקדם מעבר למחשבים, דורות העתיד יצחקו על ההסברים שלנו ויחשבו שזה היה טיפשי לחשוב שהמוח פועל כמו מחשב!

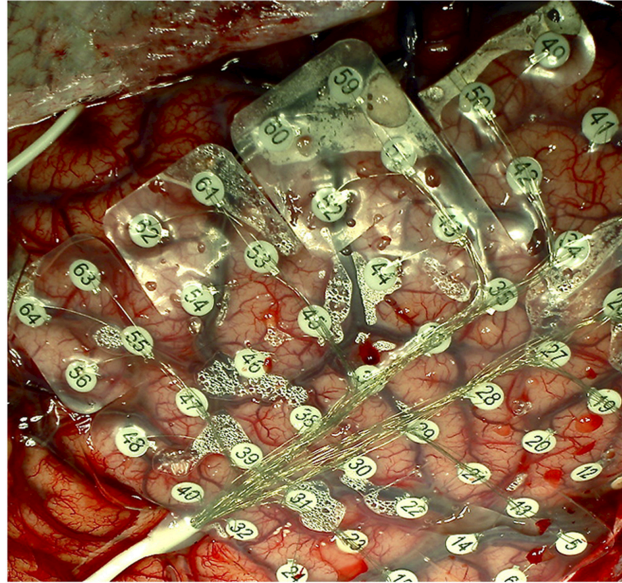
לפני שנתקדם הלאה אל העידן שלנו, הרשו לי לספר לכם על לאונרדו דה וינצ'י. הוא היה די גאון. הוא תהה לעצמו על הרעיון שנפש האדם שוכנת בחדרי המוח, שמלאים בנוזל השקוף והצלול. הוא חשב שזה פשוט לא הגיוני לשכך את נפש האדם בתוך החדרים האלה. מה עם חיות אחרות? האם להן אין מוחות עם חללים מלאים בנוזל? מה אם החללים שלהן גדולים יותר? האם היינו אומרים אז שיש להן נפשות גדולות יותר? הוא המשיך וחקר את גודלם של חדרי המוח וצורתם, והראה שגם לחיות אחרות, כמו גמלים ועיזים, יש חדרים במוח, ושגודלם אפילו מרשים יותר מאשר גודל חדרי המוח שלנו [2]. בן אדם שפוי לא היה אומר שלגמלים ולעיזים יש נפשות גדולות יותר מאשר לאנשים. אז כל הרעיון הזה חייב להיות משוגע! למעשה, ברפואה של היום אנו מסכימים עם דה וינצ'י. חדרי מוח גדולים יותר הם לעיתים סימן להפרעות פסיכיאטריות כמו למשל סכיזופרניה!

לאחר שהרעיון של חדרי מוח מלאים בנוזל נזנח, דרוש היה למצוא הסברים אחרים לשאלה כיצד המוח פועל. מדען אוסטרי בשם פרנץ יוזף גאל קידם את הרעיון שישנם מרכזים מסוימים במוח שהם בעלי תפקודים מסוימים [3]. הרעיון הזה, אשר נקרא פֶּרְנֹלוֹגְיָה, טען שאם משתמשים בחלק מסוים במוח באופן תדיר אז נעשים טובים מאוד בהפעלתו, ואותו החלק במוח גדל ויוצר בליטה קטנה בעצם הגולגולת. באו נגיד שבמוח יש מרכז שקשור במתמטיקה. אם תעסקו כל הזמן במתמטיקה, תהפכו להיות טובים מאוד בה. אתם עשויים להפוך להיות כמו איינשטיין. אם זה קורה, מרכז המתמטיקה במוח שלכם גדל במידה משמעותית. אם אחקור את עצם הגולגולת שלכם, אני אמור, לפי הפרנולוגיה, לראות בליטה קטנה בראשכם בדיוק מעל למרכז המתמטיקה. אותו הדבר תקף גם לאהבה, ליחסי מין, לרגשות, לשפה וכדומה. כך שאם תחקרו את הבליטות בעצם הגולגולת של אדם מסוים, אתם אמורים להיות מסוגלים לנחש אלה פעילויות אותו אדם מבצע בצורה טובה. אתם יכולים לקרוא לרעיון המשוגע הזה "בליטותולוגיה!" הרבה משרדים בעבר התמחו במחקר של בליטות בראשים ותיאור אופי האדם על פיהן. אם רציתם להתחתן עם מישהו, יכולתם לקחת את בן או בת זוגכם לאחד המשרדים האלה ולשאול את ה"בליטותולוגיסט" אם הבליטות שלכם מתאימות לבליטות של בן או בת זוגכם לעתיד.

הגענו רחוק מאוד מאותם ימים חשוכים של בורות. כיום אנו יודעים שחדרי המוח אינם יכולים להיות המקום שבו מאוחסנת נפש האדם. אנו גם יודעים שכל תיאוריית הפרנולוגיה אינה נכונה. המוח אינו גדל משמעותית בנפחו בעקבות שימוש באזור מסוים, ואינו גורם לבליטות בגולגולת [4]. במקום זאת, אנו יודעים שבִּינַת האדם נוצרת במוח על-ידי 100 מיליארד תאי העצב שלו. מעניין מכך אפילו יותר, שלא כמו אף תא אחר בגוף, לתאי העצב יש ענפים אשר

## איור 1

אלקטרודות על גבי המוח. מערך של אלקטרודות מושתל על המשטח החשוף של המוח אצל חולי אפילפסיה שעוברים ניתוח. כל אלקטרודה משמשת כמיקרופון ריגול שדרכו אנו יכולים לרשום את הפעילות החשמלית של קבוצת תאים במוח.



איור 1

מחברים אותם עם תאים אחרים, והם יכולים "לדבר" זה עם זה. המוח נראה תחת מיקרוסקופ כמו יער עם הרבה ענפים שמחברים בין תאים סמוכים, אבל גם שורשים שמטיילים הרחק ומחברים את התאים עם תאים מרוחקים. מאחר שתאי המוח מחוברים יחד, תפקודים מוחיים נוצרים בפעולה קולקטיבית של אזורים מחוברים. זה כמו עיר עם הרבה שכונות, וכל שכונה תלויה פחות או יותר בשכונות אחרות. אולם לכל שכונה יש אופי משלה, ובמוח אנו מכנים זאת "תפקודים בעלי התמחות אזורית", כשהכוונה היא שכל אזור במוח מתמחה בביצוע מטלה מסוימת.

עובדה מרתקת נוספת לגבי המוח היא שהתאים שלו מייצרים חשמל, ותאי המוח (תאי עצב) "מדברים" אחד עם השני באמצעות שליחת אותות חשמליים. כעת דמיינו שאתם יושבים במסוק ומסתכלים מטה על יער עבות. אתם רואים הרבה ענפים שנוגעים אחד בשני, אולם אינכם שומעים הרבה רעשים. אם תשלחו למטה מיקרופון תוכלו להתחיל לשמוע כל מיני דברים: ציפורים שרות, עלים נופלים, קופים שקופצים מסביב ויגוארים שמתהלכים באזור. אם תשתילו את מיקרופוני הריגול האלה במשך כמה ימים, אתם תלמדו הרבה דברים מעניינים על החיים ביער. זה מה שאני עושה למחייתי: אני מקשיב לצלילים של המוח ומנסה להבין כיצד המוח פועל באמצעות רישום הפעילות החשמלית מפינות שונות במוח. אם אתם מתעניינים ב"צלילים" של המוח, הקשיבו לווידיאו הזה.

לאחרונה התחלנו ללמוד הרבה על תפקוד המוח פשוט באמצעות צינות לאותות החשמליים שמיוצרים בחלקים שונים ביער המוחי. אנו עושים זאת באמצעות השתלת אלקטרודות בתוך המוח (ראו איור 1). האלקטרודות האלה פועלות כמו "מיקרופוני ריגול" שמושגלים באזורים שונים ביער. אנו מקשיבים לפעילות החשמלית ומנסים לפענח את הצופן של פעילות שזכו. כדי לעשות זאת, אנו מסירים את עצם הגולגולת וכך משיגים גישה ישירה לפני השטח של המוח.

אולם מדוע אנו עושים זאת? אם כן, ישנם חולים שסובלים מהתקפים אפילפטיים בלתי נשלטים. ההתקפים שלהם יכולים להופיע בצורת פרכוסים עזים של כל הגוף, או בתור בהייה מתונה אל החלל בלי שהם מודעים למה שקורה סביבם. המצבים החריגים האלה של תפקודים מוחיים (כלומר, התקפים) נגרמים על-ידי "ירי חשמלי" חריג של חלק מהתאים בחלק מהפינות ביער המוחי. אנו מטפלים בחולים כאלה תחילה באמצעות תרופות, אולם אם התרופות אינן עוזרות למטופל אנו שוקלים אפשרות של ניתוח מוחי. כן, הבנתם נכון. אנו פותחים את עצם הגולגולת ומשתילים מערך של אלקטרודות על גבי האזור במוח שעשוי להכיל את מרכז הפעילות של ההתקפים. אנו משתילים את האלקטרודות כמו רשת, ומחכים שחיית ההתקף תצא ממקום המחבוא שלה. ברגע שזה קורה, אנו יודעים בדיוק אלה אלקטרודות רשמו את פעילות ההתקף ראשונות, ואנו יודעים איזה אזור במוח הוא האזור של התקפי החולה. על-ידי הסרת אזור המוח הזה אנו מסירים את "תאי ההתקף", ומאפשרים למטופל להיות חופשי מהתקפים.

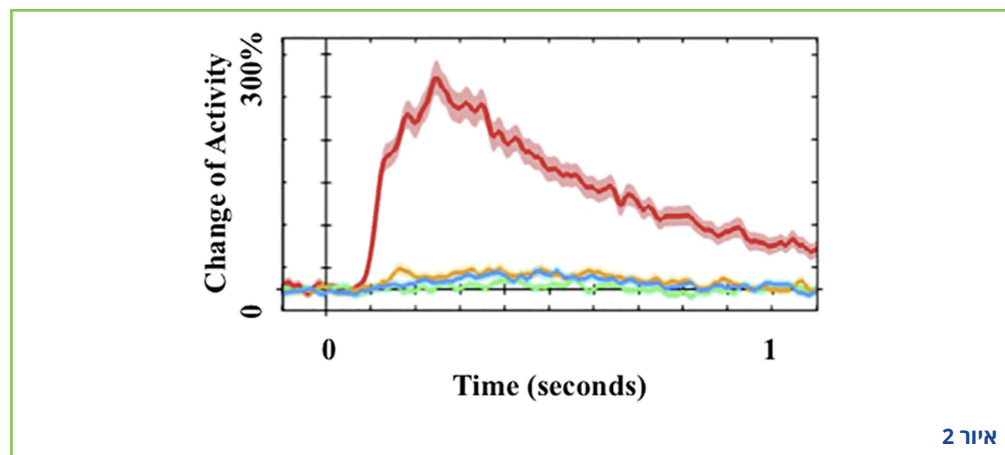
במהלך תקופת ההמתנה הזו אנו מבקשים מהמטופלים להשתתף בכמה ניסויים, שהם כמעט כמו משחקי מחשב שמשחקים ממחשב נייד. לדוגמה, מסך המחשב מקפיץ תמונות של פרצופים, גיטרות, חלקי גוף, נופים וכדומה, או מספרים ומילים דומות כמו שתיים, 2, שמיים, שבע, 7, שקע וכדומה. המטופל מתבקש לצפות בהן בתשומת לב או להקריא אותן בקול רם. אנו מקשיבים לפעילות המוח שמוקלטת מכל אלקטרודה בנפרד, ומנסים לראות אם ישנם אזורים במוח ש"אכפת" להם יותר מקטגוריה מסוימת של תמונות או מילים מאשר מקטגוריות אחרות.

רישומים בחולים האלה אפשרו לנו לבחון בדיוק מדהים את התפקוד של אוכלוסיות תאי עצב במוח האדם. במחקר שבוצע לאחרונה הקשבנו לפעילות האלקטרופיזיולוגית (כלומר הפעילות החשמלית שמקורה בתאים ביולוגיים) באזורים שונים במוח בחולה שהושטלו לו אלקטרודות בתוך המוח. כפי שדיווח בפרסום האחרון שלנו [5], מצאנו זמזום מוגבר של פעילות חשמלית בתגובה לצפייה בפרצופים בפינה מסוימת של המוח (איור 2). מה שהיה כל כך מפליא הוא ההשפעה של הפרעה לפעילות החשמלית של האזור הזה בעת שהמטופל היה ער והסתכל סביב על פרצופים או פריטים אחרים בחדר שלו. אנו יוצרים הפרעה בתפקוד של אזור המוח על-ידי שליחת אותות חשמליים בתדר של 50 הרץ (50 מחזורים בשנייה) דרך שתי האלקטרודות שנוגעות במוח. אם אתם זוכרים, תאי העצב פועלים עם חשמל. אם שולחים אותות חשמליים בתדר אקראי של 50 הרץ, זה מבלבל את התאים. התהליך מכונה "גירוי מוח חשמלי". אין זה מדויק להשתמש במונח "גירוי" מאחר שלא באמת "מגרים" את אזור המוח. פשוט שולחים לשם חשמל ומבלבלים את התאים. אם אתם מעוניינים לדעת מה קורה כאשר מגרים חשמלית את המוח באזורים שונים, הסתכלו על המאמר שלנו שמסכם את מרבית הניסויים החשובים בתחום במאה השנים האחרונות [6]. במקרה של המטופל שלנו עם גירוי חשמלי של אזורים שקשורים בזיהוי פנים, מה שראינו היה מפליא. מצאנו קבוצות של תאי עצב שהיו מופעלות באופן פרטני כאשר המטופל ראה תמונות של פרצופים. ביקשתי מהמטופל להסתכל על הפנים שלי ואז יצרתי הפרעה בתפקוד של התאים הבררניים לפנים האלה. הוא דיווח על משהו מדהים: הוא אמר שהפנים שלי התעוותו! הפכתי למישהו אחר! (אתם יכולים לצפות בווידיאו של המטופל הזה בכתבה באתר של העיתון למדעי המוח). זוהי ללא ספק דוגמה להתמחות תפקודית במוח האדם.

במחקר אחר [7], בחנו את התגובה של אוכלוסיית תאי עצב לקבוצה של סמלים כתובים: מספרים כמו "2", "6", "7"; מילים המבטאות מספרים כמו "שתיים", "שש", "שבע"; ומילים

## איור 2

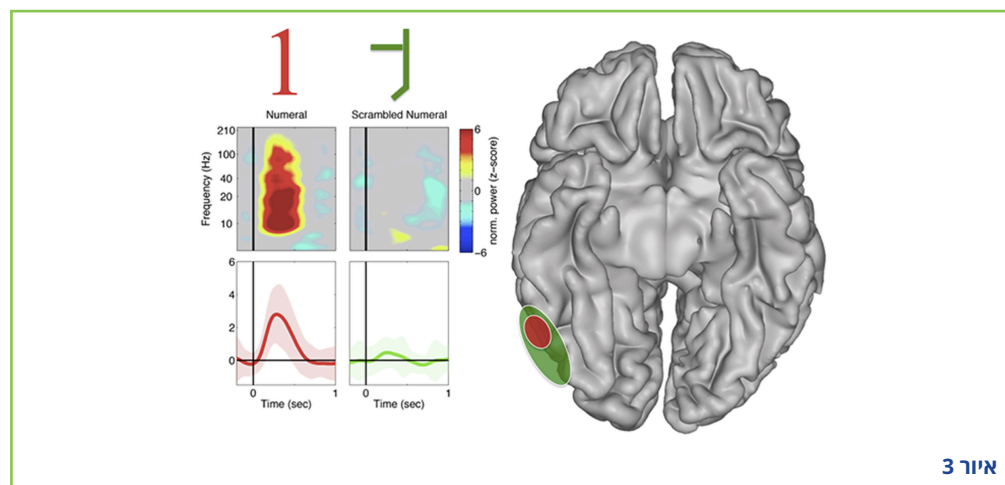
התמחות תפקודית במוח האדם. חלק מהתאים במוח מתמחים בראיית פרצופים. אם תקשיבו לפעילות החשמלית של התאים האלה, אתם תראו פעילות של 300% (באדום) כאשר מטופל מתבונן בפרצופים. כמעט ואין פעילות באזור הזה כאשר הוא מסתכל על תמונות אחרות.



איור 2

## איור 3

התמחות תפקודית במוח האדם דרך השכלה. חלק מהתאים במוח מתמחים בראיית מספרים. אולם מספרים הם תופעה תרבותית: אנו לומדים לזהות אותם רק באמצעות חינוך. אם תקשיבו לפעילות של "תאי המספר", אתם תשמעו זמזום חזק של פעילות חשמלית (באדום) כאשר המטופל מסתכל על מספרים כמו "1" אולם לא תהיה תגובה כאשר יוצג המספר "1" בצורה שבורה ומעוותת (בירוק). כפי שהוסבר בטקסט, אזור סמוך גדול יותר במוח (האזור הירוק) מגיב לכל סוג של קווים עם הסתעפויות. קופים ודאי משתמשים באותו האזור במוח כאשר הם קופצים מענף אחד בעץ לענף אחר.



איור 3

שאינן קשורות למספרים במשמעותן אך נשמעות ונכתבות בצורה דומה, כמו "שמיים", "שם", "שקע" וכדומה. באופן מפתיע, מצאנו שבמיקום מסוים במוח תאים מתחילים "לירות" אותות חשמליים כאשר מוצגים מספרים, אבל כמעט שאין שם "ירי" כאשר מציגים מילים שמבטאות מספרים או מילים דומות אחרות. כדי לבחון זאת יותר לעומק הראינו למטופלים מספרים אמיתיים (ראו באדום באיור 3 את הסמל 1) ומספרים "שבורים" או מעוותים (ראו את הסמל הירוק באיור 3). גילינו שהאזור במוח שמגיב למספרים אמיתיים ממוקם בתוך אזור גדול יותר שמגיב לכל סוג של קווים מקושקשים עם זוויות וקימורים (כמו המספר השבור בירוק). מה שאנו חושבים שקורה הוא שאבותינו הקדמונים שהתגוררו על עצים, ובני אדם בעת לידתם, קולטים ענפים שחוצים ענפים אחרים, קווים שחוצים קווים, ועבור הקלט הזה הם משתמשים באזור גדול יחסית במוח (האזור הירוק). אולם בתהליך של רכישת השכלה, אנשים מכיילים (באופן בלתי מודע) את הפעילות של קבוצה נבחרת של תאים במוח [8] (האזור האדום) להגיב לקווים עם זוויות וקימורים מסוימים שמייצגים סימנים "מיוחדים" אשר אנו מכירים כמספרים. הסמלים האלה מיוחדים מאחר שהם נראים באופן שכיח בתרבות שלנו, ויש להם משמעויות מסוימות מאוד.

בואו נגבש מסקנות על בסיס מה שסקרנו עד כה. המוח בנוי מתאים שיוצרים קשרים. תפקוד מסוים של המוח תלוי ברשת שלמה של תאים שמחברים יחדיו. בהינתן שכל אתר במוח מחובר

לקבוצה מסוימת של אזורים במוח, תאים שמתמחים בזיהוי פנים או מספרים עובדים כמו צמתים מרכזיים בתוך רשת גדולה יותר של אזורי מוח שעובדים יחד. לדוגמה, כאשר רואים פרצוף או מספר, התאים המומחים האלה "מדברים" עם תאים אחרים שמאחסנים את השמות שקשורים באותם הפנים או את המשמעות של המספרים או של הצלילים שלהם, וכדומה. כך שקבוצה של אזורים מופעלת פתאום כאשר רואים פרצוף או מספר, ואנו נעשים מודעים באופן אוטומטי למשמעות ולחשיבות שלהם. אם הפנים הם פנים של מישהו שאנו מעריצים אנו מפעילים אזור נוסף במוח שמתמחה בהפעלת רגשות של הערצה, וכדומה.

מה שעדיין לא גילינו הוא כיצד מתאפשרת התודעה האנושית. העובדה שתאים מגיבים לפנים /או מספרים זה דבר אחד, אולם העובדה שישנה חוויה מודעת לכך שזה אני שרואה את הפרצוף המסוים וחווה את ההערצה בכל מאודי, זה דבר אחר לגמרי. כיצד "ירי" של אותות חשמליים במוח קשור לחוויות פנימיות כל כך חיות? זוהי שאלה שנשארת פתוחה עבור המוחות הצעירים שלכם שמתעניינים במדעי המוח. יהיה מרתק מאוד אם תצליחו לגלות כיצד אזורי מוח שונים עובדים יחד, וכיצד התפקודים שלהם מסונכרנים ומשתלבים זה עם זה. התקדמנו הרבה מאז חדרי המוח המלאים בנוזלים ובליטות בגולגולת, אולם אנו עדיין רחוקים מהבנה של תפקוד המוח. העתיד כולו שלכם, חבריי! יש הרבה מה לגלות.

## מקורות

1. Finger, S. 1994. The era of cortical localization. In *Origins of Neuroscience*, ed. S. Finger, 32–50. New York: Oxford University Press.
2. Damasio, A. R. 1994. *Descartes' Error*. New York: Putnam.
3. Gall, F. J., and Spurzheim, J. 1819. *Anatomie Et Physiologie Du Systeme Nerveux En General Et Du Cerveau En Particular*. Paris: F. Schoell.
4. Knight, R. T. 2007. Neuroscience: neural networks debunk phrenology. *Science* 316:1578–9. doi: 10.1126/science.1144677
5. Parvizi, J., Jacques, C., Foster, B. L., Witthoft, N., Rangarajan, V., Weiner, K. S., et al. 2012. Electrical stimulation of human fusiform face-selective regions distorts face preception. *J. Neurosci.* 32:14915–20. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2609-12.2012
6. Selimbeyoglu, A., and Parvizi, J. 2010. Electrical stimulation of the human brain: perceptual and behavioral phenomena reported in the old and new literature. *Front. Hum. Neurosci.* 4:46. doi: 10.3389/fnhum.2010.00046
7. Shum, J., Hermes, D., Foster, B. L., Dastjerdi, M., Rangarajan, V., Winawer, J., et al. 2013. A brain area for visual numerals. *J. Neurosci.* 33:6709–15. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4558-12.2013
8. Dehaene, S. 2011. *The Number Sense: How The Mind Creates Mathematics*. New York: Oxford University Press.

פורסם אונליין: 11 בינואר 2019

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

ציטוט: Parvizi J (2019) התמחות תפקודית במוח האדם. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2013.00013-he

**תורגם והותאם:**

Parvizi J (2013) Specialization of functions in the human brain. *Front. Young Minds.* 1:13. doi: 10.3389/frym.2013.00013

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

**COPYRIGHT** © Parvizi 2013. 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 (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****MADOC, גיל: 11**

נולדתי בסן פרנסיסקו ואני גר כיום בעיר העתיקה של יורק, אנגליה, היכן שמזג האוויר מעניין יותר. האוכל האהוב עליי ביותר הוא פיצה, וקבוצת הכדורגל שאני אוהד היא מנצ'סטר יונייטד. אני נהנה לקרוא, לשחק במשחק המחשב Minecraft, לשחק כדורגל, לבלות עם חברים ולבקר את עבודתם של חוקרי מוח מפורסמים.

**הכותב****JOSEF PARVIZI**

אני רופא ומדען. אני עובד באוניברסיטת סטנפורד ומטפל בחולים בעלי לקויות מוחיות. אני חוקר את המוח האנושי באמצעות רישום הפעילות המוחית או גירוי חשמלי שלה, על-ידי אלקטרודות שאנו ממקמים על גבי פני השטח של המוח אצל חולים שעוברים ניתוח מוחי.



Hebrew version  
provided by

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

