



לבני אדם יש חוש שישי שנוגע לתפיסה של הגוף את עצמו. חוקרים ישראלים מפענחים כיצד הוא פועל – ואת חשיבותו
אסף רונאל עמוד 36



**המנגנון
המסתורי הזה
עוזר לגוף
להבין
את עצמו.
המדע רק
מתחיל להבין
אותו**

נערה עם עקמת, 1914. המחקר גילה שהמערכת הפרופריוספטית שומרת על הגב ישר צילום: Philadelphia, F. A. Davis company

הסיבה להיווצרות האשליה הזאת היא שהרטיט משפיע על "חיישן" קטן שנמצא בשריר הזרוע. חיישנים אלה הם חלק מהמנגנון שבעזרתו נוצרת תחושת הגוף העצמי של כל אדם. חוש זה נקרא "פרופריוספציה" ("קליטה עצמית"). חמשת החושים המוכרים משמשים אותנו כדי להבין את העולם החיצוני, ואילו החוש השישי הזה, כפי שהוא נקרא לעתים, משמש אותנו כדי להבין את עצמנו. לפרופריוספציה שתי רמות – לא מודעת ומודעת. הרמה הלא-מודעת היא זו שפועלת ללא הרף ומוודאת שמתרחשים התיקונים הקטנים שנדרשים כדי שנוכל לבצע את פעולות היומיום בצורה מדויקת. דוגמה בולטת לאופן

••• אפו של פינוקיו התארך בכל פעם שהוא שיקר. האף שלנו, בני האדם, מתארך כאשר הגוף משקר לנו לגבי עצמו. קוראים לזה "אש-ליית פינוקיו", ואחת הדרכים ליצור אותה היא להושיב אדם עם כיסוי עיניים בכיסא ולבקש ממנו לאחוז באפו. או משתמשים במכשיר קטן שיוצר רטיט כדי לגרות את שריר הזרוע (הדור ראשי). הרעידות הזעירות גורמות למוח להשתכנע שהזרוע זזה והמרפק מתיישר. מכיוון שהאדם מכוסה העיניים אוחז באפו באותה יד, המוח משוכנע שאם היד זזה, המשמעות היא שהאף מתארך. התוצאה: הנבדקים משוכנעים כי אפם השתנה כמו בובת העץ המדברת לאחר שלא דיברה אמת.

חמשת החושים המוכרים משמשים אותנו כדי להבין את העולם החיצוני. מחקר חדש שופך אור על תפקידו החשוב של "החוש השישי"

אסף רונאל





פרס נובל ומי שנחשב לאבי הנורופיזיולוגיה, הרופא הבריטי צ'רלס סקוט שרינגטון, בחיבורו מ-1906. עם התפתחות ההבנה של החוש, נחלקו החוקרים השונים בשאלה אם התפיסה העצמית הזאת של הגוף מתרחשת במקום יחיד – במוח – או ברחבי הגוף.

היום כבר ידוע כי התשובה היא גם וגם: המידע העצבי נאסף בעזרת ה"חיישנים" השוריים שפרוסים ברחבי הגוף ומועבר למוח. ד"ר רועי סלומון, שחוקר את גבולות התפיסה האנושית במרכז גונדה לחקר מדעי המוח באוניברסיטת בראיילן, מסביר כי המידע הזה מגיע לשני אזורים נפרדים במוח, בהתאם לחיבור בין מודע ללא מודע. המסלול הלא-מודע, אומר סלומון, מתחבר למוח הקטן (צרבולום), חלק קדום במוח שממלא תפקיד משמעותי בתכנון תנועות מוטוריות ושיווי משקל.

המסלול המודע מגיע אל עומק החריץ המרכזי (Central Sulcus), אזור בקליפת המוח שבו מצא בדיוק בין האונה הקודקודית לאונה הקדמית במוח. באופן מאוד מייצג, מוסיף סלומון, המסלול העצבי הזה מתחבר בדיוק בנקודה שנמצאת בין האזור שאחראי לתנועות מוטוריות מודעות לבין האזור שמטפל בחוש המישוש.

וכיצד נאסף המידע? ברחבי הגוף יש שלושה סוגי חיישנים שונים שמשדרים מידע פרו-פריוספטי: במפרקים, בחיבור בין הגידים

המולקולרית שבה נוצרת התקשורת הזאת בין הגוף למוח. למרות האופן היישומי של המחקר, אפשר לקשור אותו לנושאים כמו הקשר בין הגוף לנפש, מעין גרסה מודרנית לבלוטת האצטרובל שבה לפי הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט מתרחש החיבור בין הנפש לגוף. "מת" רגלי יוגה מכירים היטב את הנקודות שבהן נמצאים כישורי השריר, מוסיף ולצה.

מה מסתור בשרירים

אריסטו קבע בפירושו שלאדם יש חמישה חושים בלבד. אך כמו בתחומי דעת רבים, המדע המודרני נדרש להשתחרר מהרעיונות האריסטוטליים כדי להתחיל להתקדם. הרופא האנגלי בן המאה ה-17 וויליאם הארווי, שמי לא תפקיד מפתח בגילוי מחזור הדם, הבחין שהשרירים שמוזיזים את האצבעות נמצאים בעצם אמת היה. "וכך, אנו תופסים וחשים שאנו מוזיזים את האצבעות, אבל למעשה אנחנו לא תופסים ולא חשים את תנועת השרירים, שהם במרפק", כתב בספר שפורסם ב-1628.

את המושג "החוש השישי" לתיאור היכולת של הגוף לחוש את עצמו טבע הרופא, המדען וחוקר מערכת העצבים הסקוטי צ'רלס בל, יליד סוף המאה ה-18, בחיבורו מ-1826. כישור רי השריר עצמם התגלו באמצע המאה ה-19. המושג "פרופריוספציה" נטבע על ידי חתן

הפעולה של המערכת הלא-מודעת היא "רפל" קס המכה בכרך" המוכר. גם שם המכה גורמת לגירוי אחד מאותם "חיישנים" בשריר ברגל. גירוי זה יוצר במוח את התפיסה שהרגל מתכווצת כשהיא אמורה להישאר במקום; הוא שורח את ההוראה "לאזן" את התנועה בהתיישרות, וכך נוצרת הבעיטה הלא-נשלטת שנפוצה בבדיקות רופא.

כדי להבין מהי פרופריוספציה ברמה המודעת, כל שצריך לעשות הוא לעצום עיניים ולנסות להבין היכן נמצאת היד ובאיזו תנוחה היא. סיפורו של איאן ווטרמן, שב-1971 התעורר וגיילה שגופו נעלם, מבהיר עד כמה חשוב החוש הזה לכיסוס תחושת העצמי שלנו. הצעיר הבריטי בן ה-19 הסתכל וראה את גופו, אבל לא הצליח להרגיש או להזיז אותו. הבדיקות הרפואיות שנערכו לו העלו שהוא סובל מתסמונת נדירה: בעקבות הידבקות בנגיף כאזור הצוואר, מערכת החיסון של הגוף שלו תקפה והרסה את המסלולים העצביים שמעבירים את המידע של חוש המישוש והפרופריוספציה מן הגוף אל המוח.

מאז תועדו רק כעשרה מקרים של התסמונת הזאת. ווטרמן היה ייחודי בכך שהוא היה הראשון שלימד את עצמו ללכת – בעזרת חוש הראייה והוראות מודעות להגליים לזוז בלבד. כשעיניו נעצמו, הוא מעד. סיפורו יוצא הדופן של ווטרמן מוצג בספר "Pride and a Daily Marathon" של ג'ונתן קול. הדוגמה הבולטת ביותר בספר לחשיבות הפרופריוספציה היא הסיפור שמראה כיצד בעקבות הפגיעה היו שלבים שבהם ווטרמן היה משוכנע שהעצמי שלו נעלם. הוא הרגיש שאינו קיים לאחר שאיבד את היכולת לחוש את עצמו ואיבד את אותו חוש כה בסיסי, שבעברית אפילו אין לו שם.

המידע שאותו איבד ווטרמן, ועמו כמעט תחושת העצמי שלו, מגיע כאותם מסלולים עצביים מחיישנים שנמצאים ברחבי הגוף – במפרקים, בגידים ובעיקר בשרירים. החיישנים החשובים ביותר (שאחד מהם מופעל באשליית פינקווי ואחר בבדיקת רפלקס הבעיטה) נקראים כישורי שריר (Muscle Spindles). פרופ' אלעזר זר זלצר מהמחלקה לגנטיקה מולקולרית במכון ויצמן למדע חוקר היום את כישורי השריר בניסיון להבין את המנגנונים הגנטיים והמולקולריים שמעצבים את פעולתם.

במאמר שהתפרסם בסוף החודש שעבר כתב תב העת המדעי Nature Communication הראו זלצר ועמיתיו איך גנים שמשפיעים על המערכת הפרופריוספצית קשורים להתפתחות שתי הבעיות האורתופדיות הנפוצות ביותר בידיים בעולם: עקמת ודיספלזיה התפתחותית של מפרק הירך (שבגללה עוברים תינוקות באופן שגרתי בדיקת גמישות של מפרקי הידיים). מחקר קודם שנערך במעבדה שלו הראה גם כיצד אותה מערכת ממלאת תפקיד משמעותי בתהליך האיחוי של שברים בגוף.

זלצר מקדיש חלק ניכר מהמחקר שלו לאי-פיקים עם השלכות רפואיות משמעותיות, בין השאר בזכות המעורבות במחקר של שני רופאים, ד"ר רונן בלכר וד"ר ערן אסרף, שעצרו את ההתמחות הרפואית שלהם כדי לעשות דו-קטורט במעבדה שלו. אולם כדי להתקדם במחקר, נדרש זלצר קודם כל לפענח את השפה



פרופ' אלעזר זלצר. צילום: תומר אפילצ'אוס

כדי להבין מהי פרופריוספציה, או החוש השישי, כל שצריך לעשות הוא לעצום עיניים ולנסות להבין היכן נמצאת היד ובאיזו תנוחה היא. סיפורו של איאן ווטרמן, שהתעורר בוקר אחד וגיילה שגופו נעלם, מגלה כמה חשוב החוש הזה לביסוס תחושת העצמי שלנו



ד"ר רועי סלומון. כשהמוח חש חוסר ודאות, הוא גורם לנו לזוז צילום: אילן אסיין

לשרירים ובשרירים עצמם. גם שאלת החשיבות של החיישנים השונים היתה במחלוקת מדעית שנים רבות, אולם כיום מקובל לומר שכישורי השריר ממלאים את התפקיד המרכזי. למשל, עדות אחת לחשיבותם על פני החיישנים שבמפרקים היא היכולת המלאה של מטופלים שעברו השתלה של ירך מלאכותית לדעת בדיוק באיזו תנוחה נמצאת השוק שלהם ביחס למותניים.

כישור השריר בנוי מארבעה קצות עצבים שונים המתלפפים סביב כתריסר מסיבי השריר. החיישן הזעיר, שאורכו פחות מסנטימטר, עטוף ברקמה בצורת כישור שמפרידה בינו לבין שאר השריר. המבנה הפנימי והחיבור לעצבים השונים מאפשרים לכישור להתאים את האות העצבי שהוא מפיק בהתאם לשינויים באורך השריר. בשל המבנה המיוחד, כאשר השריר לא זז, הכישור גם "זוכר" את המצב הקודם שבו היה. מספר הכישורים משתנה בין שריר לשריר, מסביר זלצר, ובסך הכל יש ברחבי הגוף של בני אדם ויונקים אחרים כמה מאות חיישנים זעירים כאלה. לבעלי חיים מסדרות אחרות, הוא מוסיף, יש מנגנונים אחרים שמשימים ליצירת הפרופוריוספציה.

הבנה זו, של המנגנונים המכניים שמאפשרים את יצירת התפיסה של הגוף את עצמו, גורם בשה במחצית הראשונה של המאה ה-20. מאז המחקר של הפרופוריוספציה בכיולוגיה ובמדעי המוח, ושל כישורי השריר בפרט, נזנח. זלצר תולה זאת במהפכת הכיולוגיה המולקולרית של שנות ה-60, שכללה בין השאר את גילוי מבנה הדנ"א. "עד אז ניתנה תשומת לב רבה למעורבות של אותות מכניים בכיולוגיה, בהתפתחות ובתפקוד. כשהתחילה המהפכה המולקולרית, אנשים נשכו, במידה מסוימת, בקסמן של המולקולות, דנ"א, רנ"א וחלבונים, ועזבו את המכניקה", הוא אומר. "הכיולוגיה המולקולרית הפכה למיינסטרים, ומי שהתעסק במכניקה נחשב לשייך לעולם הישן".

לדברי זלצר, העניין בחשיבות המנגנונים המכניים החל להתאושש בסוף שנות ה-80. "בהדרגה חזרו לקבל את העובדה שבנוסף לעולם המולקולרי יש עולם מכני משמעותי מאוד. אולם כדי שהעולמות האלה יתחברו, וכדי שהמכניקה תקבל את המקום שלה, צריך להבין את המנגנון שמוסוגל לתרגם את המכניקה לאותות המולקולריים של הכיולוגיה", הוא אומר. לדבריו, המהפכה הזאת – פענוח המנגנונים שיוצרים אותות מולקולריים שונים – התרחשה בתחומים רבים של מדעי המוח והנוירוביולוגיה. אולם המערכת הפרופוריוספטית, "למרות שהיתה אחת מהמערכות הראשונות בגוף שאופיינו, לא היה מי שייצור לה את השפה

המולקולרית". במדעי המוח הנושא כמעט לא נחקר, אומר זלצר (וסלומון מבראילון מסכים). מהצד של הגוף, הוא מוסיף, יש בעולם כולו מספר מועט מאוד של מעבדות שחוקרות את תפקיד כישורי השריר במערכת הפרופוריוספטית, והמעבדה שלו היא היחידה בעולם שבוחנת גם את הקשר בין המערכת לשלד של הגוף. "אנחנו מנסים לייצר את השפה המולקולרית של המערכת הזאת, וכך אפשר יהיה להחזיר את המערכת למרכז".

כיצד הם חושפים שפה מולקולרית זו? ראית, החוקרות והחוקרים במעבדה של זלצר מכודדים את הכישורים. בהמשך הם בודקים אילו גנים מתבטאים בהם, ואז מנסים לגלות אילו חלבונים מקודד כל גן – ומה החלבונים עושים. האמצעי העיקרי שבו הם משתמשים הוא השבתת הפעולה של גנים יחידים, ובדיקה מדוקדקת לגלות מה השתנה כשהם לא פועלים. "אנחנו מנסים לאמץ הסתכלות מערכתית – לא להתמקד ברקמה הבודדת, אלא לבחון איך היא עושה אינטראקציה עם מערכות אחרות, כמו המערכת השלדית".

בתפר שבין הגוף למוח

במחקר החדש הראו זלצר ועמיתיו מה קורה כאשר גן כזה משתבש. עכברים שאצלם הגן מושבת בשלד עצמו לא פיתחו שום בעיה. אולם כאשר הגן מושבת במערכת הפרופוריוספטית בלבד התפתחה בגיל ההתבגרות עקמת, עיוות שבו החוליות בעמוד השדרה סורטות מקו האמצע, שקיים אצל כ-3% מבני האדם. "ההנחות המקובלות במחקר הן שעקמת היא המחיר של הליכה על שתיים", אומר זלצר. "אנחנו הראינו שזה קורה גם בבעלי חיים שהולכים על ארבע – ושהמערכת הפרופוריוספטית אחראית על שמירת הגב ישר".

בעיה אחרת ממנה סבלו עכברים נקראת דיספלזיה התפתחותית של מפרק הירך. זהו שינוי בוש נפוץ בהתפתחות מבנה הירכיים, המופיע אצל 0.1%-0.6% מהתינוקות, וכל תינוק בישראל נבדק בה במסגרת בדיקות הסקר בבית החולים ובטיפת חלב. כדי להסביר את הקשר בין התעוותות הצורה הנורמלית של האגן

אחד התפקידים החשובים של מנגנון הפרופוריוספציה הוא לשמור על הגוף מפני לקויות. בניסוי שערך פרופ' זלצר הושבת חלבון מסוים בשלד של עכברים, מבלי שהיו לכך השלכות רפואיות. כאשר אותו חלבון הושבת במערכת הפרופוריוספטית שלהם, העכברים פיתחו עקמת

הארץ - חנוסף הארץ		
6.76x26.83	1	עמ 39
10/07/2020	73662653-5	



לפרופריוספציה החוקר ממכון ויצמן קושר זאת לעבודה קודמת שלו. זלצר הוא ביולוג התפתחותי, וככזה הוא בוחן כיצד מרכיבים שונים בשלד ובשריר מתפתחים בזמן ההריון והגדילה הגופנית.

במחקר הקודם, הוא מספר, הוא הראה שכדי שיתפתחו מפרקים, העובר צריך לזוז ברחם – ושהתזווה מעודדת את היווצרות המפרק. "המ" שמעות של המחקר החדש היא שלא רק שצריך שתהיה תנועה, אלא צריך שהתנועה תהיה נכונה". אם יש בעיות ביכולת העצמית של עוברים וילדים שמתפתחים לחוש את גוף, פם, התנועות שלהם משתבשות. כך גם משתבשים המפרקים שמעורבים בתנועות האלה. "זו ההיפותזה: לא רק שצריך תנועה, אלא שצריך תנועה מסוימת כדי שהמפרק יתפתח באופן תקין", אומר זלצר.

להיפותזה זו, ממשיך זלצר, יש גם השלכות עמוקות יותר על הבנת הביולוגיה והאבולוציה, ולא רק בדוגמאות הפתולוגיות – במקרים שבהם משהו משתבש. המשמעות היא שהמבנה של האגן, איבר מרכזי באנטומיה, מושפע לא רק מהגנטיקה אלא גם מהתנועות עצמן של הגוף. אם המבנה של האגן נקבע על ידי התנועות של בעל החיים, המשמעות היא שהוא פלסטי – מסוגל להתאים עצמו לשינויים.

"נגיד שבחיה מסוימת היתה מוטציה ששינתה את הפעילות של השריר, את הגודל של העצם או את החיבור של העצם לשריר. המוטציה הזאת משנה את הדרך שבה החיה הולכת", אומר זלצר. אולם מכיוון שהצורה הסופית נקבעת על ידי התנועה, המשמעות היא שהאגן יכול להתאים עצמו לשינוי הזה בהליכה, "וכך לשמר את יכולת ההישרדות שלה", מסביר החוקר. וכך, בניגוד לצבע העיניים או השיער, שנקבעים מראש לפי הגנטיקה, המחקר של החוש השישי מציג דוגמה למערכת בגוף שפעילותה מגדירה את המבנה שלה. "לא הכל קבוע מראש. חלק מהגוף נותר פלסטי לשינויים", מסכם זלצר.

מקום נוסף שבו יש מפגש בין פעולה ותפקוד עם הפרופריוספציה הוא בהזדקנות. אחד המנגנונים הראשונים שנפגעים עם הזיקנה היא המערכת הפרופריוספטית. מכיוון שתהליך ההזדקנות מלווה פעמים רבות בהידרדרות של מנגנונים קוגניטיביים שונים כמו, קל להניח שחלק מהפגיעה נובע מהזדקנות המוח. אולם ייתכן כי הידרדרות המערכת הפרופריוספטית נקשרת גם לפגיעה באיכות האות שמגיע מהחיישנים ברחבי הגוף.

ד"ר סלומון מציין כי כשהמוח חש בחוסר ודאות לגבי ייצוג מצב הגוף במוחנו, הוא גורם לנו לזוז ובכך מדייק את הפרופריוספציה. נכון להיום, אי אפשר לקבוע כי מנגנון הדיוק הזה יכול לסייע גם לבלימת הנוק לפרופריוספציה עם הגיל. כדי להבין כיצד בדיוק משפיעה ההזדקנות על החוש השישי, מוסיף זלצר, יש צורך לנסח גם את השפה המולקולרית הספציפית של חוש זה ושינויי הגיל. מחקר רב נוסף נדרש כדי להגיע למסקנות נחרצות, הוא מסביר. אולם הקשר האפשרי בין פעילות גופנית לשיפור היכולת הפרופריוספטית בתחום זה, גם בגילים המבוגרים, הוא היפותזה הגיונית במערכת שנמצאת על התפר שבין הגוף למוח. ■