

פרק 2

המוח הלומד

מושגי מפתח

- עובדות בסיסיות על המוח: גודל, תוכן, אונות ותפקודים עיקריים
- מילות מפתח
- מה כלול בו ומה לא?
- כיצד אנו לומדים וזוכרים בפועל

כדי לתקן את מכוניתך, תיקח אותה למוסך. כדי לקבל עזרה משפטית, תפנה לעורך-דין. אך, האם היית פונה למורה כדי להבין את המוח וכיצד אנו לומדים? נראה שלא. ובכל זאת, מיליוני הורים סומכים בכל שנה על כך שהמקצוענים שמלמדים את ילדיהם יודעים משהו על המוח ועל תהליכי למידה.

אם נרצה לצאת להגנתם של המורים, נאמר שאפילו חוקרי המוח עדיין אינם בטוחים ביחס לחלק מדרכי פעולתו של המוח. בנוסף, רוב בתי הספר לחינוך מציעים קורסים בפסיכולוגיה ולא בנוירולוגיה. במקרה הטוב, קורסים אלה מספקים מידע בלתי-ישיר בנוגע לדרכי הלמידה של ילדים. ההכשרה שמורים מקבלים בבית הספר עצמו מכוונת לטיפול בסימפטומים

של בעיות, ולא לבנייה של ידע על המוח. מאמרים פופולריים, מצדם, מציעים רק לעתים רחוקות את העומק או את נקודת המבט הדרושים כיום לחינוכאים.

האם נוכל לסכם את העובדות הבסיסיות הנוגעות לאופן שבו מוחנו לומד? זוהי מטרתו של פרק זה. עדיין אין בידינו תשובות לכל השאלות על המוח, אך אנו יודעים מספיק כדי לעזור לחינוכאים לעשות עבודה טובה יותר. אם נבין כיצד המוח לומד, נוכל לחלק את המשאבים החינוכיים באופן נכון יותר. כך, לא רק שנחסוך כסף, אלא גם – וזה מה שחשוב יותר – נשפר את הצלחתנו עם הילדים.

המוח האנושי

משקל המוח האנושי הוא בין 1,300 ל-1,400 גרם. רק לשם השוואה, משקל מוחו של לווייתן הזרע כמעט 8 קילוגרם! מוחו של דולפין – כ-1,800 גרם, ומוח הגורילה – כחצי קילוגרם. מוחו של כלב שוקל כ-72 גרם, המהווים 6 אחוזים בלבד ממשקלו הכולל של מוח האדם.

לבני אדם יש מוחות גדולים ביחס למשקל גופם. המוח האנושי הוא בגודל אשכולית גדולה או מלון, ומורכב בעיקר ממים (78 אחוזים), שומן (10 אחוזים) וחלבון (8 אחוזים). מוח חי הוא רך כל כך, עד שניתן לחתוך בו עם סכין חמאה.

מאפייניו החיצוניים הבולטים ביותר של המוח הם הקמטים או הקפלים שלו. קפלים אלה הם חלק מקליפת המוח (cerebral cortex; 'קורטקס' בלטינית משמעו 'קליפה'). הקורטקס הוא הכיסוי החיצוני של המוח, ועוביו כקליפת תפוז. הקפלים מאפשרים כיסוי מירבי של שטח הפנים של המוח (על ידי הכנסת יותר תאים לכל סנטימטר רבוע). למעשה, לו פרסנו ושטחנו את קליפת המוח, היינו מגלים שגודלה כגודל של עמוד בעיתון יומי – למרות שמדובר, כאמור, באיבר בגודל של אשכולית. קליפת המוח כוללת חלקים מהותיים ממערכת העצבים, ותאי העצב שלה מחוברים בכמיליון

וחצי קילומטרים של סיבי עצב. מבין כלל מיני המוחות שעל פני כדור הארץ, קליפת המוח האנושי כוללת את השטח הגדול ביותר שאין לו תפקוד ספציפי (עדיין לא זוהה תפקיד כזה; Howard 1994). תכונה זו של קליפת המוח האנושי מעניקה לבני האדם גמישות יוצאת דופן בלמידה.

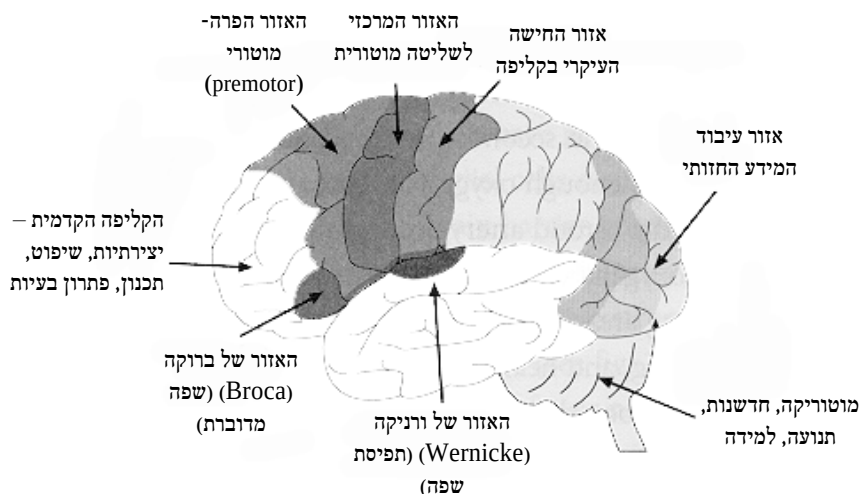
שני צדדים ללמידה

מוחנו מורכב משני חצאים (המיספרות) – שמאלי וימני – המחוברים ביניהם באגודות של סיבי עצב. האגודה הגדולה ביותר מבין אלה נקראת כפיס המוח (corpus callosum) וכוללת כ-250 מיליון סיבי עצב. חולים שכפיס המוח שלהם נותק, עדיין יכולים לתפקד בחברה. האוטוטרדה הבין-המיספרית הזו מאפשרת לשני צדי המוח להחליף ביניהם מידע באופן חופשי יותר. למרות שכל אחד מחצאי המוח מעבד דברים באופן שונה, הרי כמה מן ההנחות המוקדמות באשר למוח השמאלי והימני הן מיושנות.

באופן כללי, חציו השמאלי של המוח נוטה לעבד דברים בחלקים ובזה אחר זה. עם זאת, מוסיקאים מנוסים מעבדים מוסיקה דווקא בחצי השמאלי של מוחם, ולא בימני, כפי שעושים תלמידים מתחילים. מבין האיטרים, כמחצית משתמשים במוח הימני לעיבודים של שפה. מתמטיקאים, פותרים בעיות ושחקני שחמט מנוסים מפעילים בעיקר את המוח הימני כשהם עוסקים במשימותיהם, בעוד שמתחילים מפעילים בדרך כלל את המוח השמאלי. ימניים שולטים בפעולות מוטוריות גסות באמצעות המוח הימני, אולם פעולות עדינות יפוקחו אצלם בדרך כלל על ידי המוח השמאלי. ההמיספרה הימנית מזהה רגשות שליליים מהר יותר, וההמיספרה השמאלית מבחינה מהר יותר דווקא ברגשות חיוביים (Ornstein and Sobel 1987). מחקרים מראים שהמוח השמאלי פעיל יותר כאשר אנו חווים רגשות חיוביים. חשיבותו של מידע זה תתבהר מאוחר יותר בספר, ובשלב זה נסתפק בכך שנאמר שאבד כבר הכלח על ההטיות הישנות המתייחסות אל מוסיקה ואמנות כאל "מותרות של המוח הימני" (תרשים 2.1).

תרשים 2.1

אזורים תפקודיים מרכזיים במוח

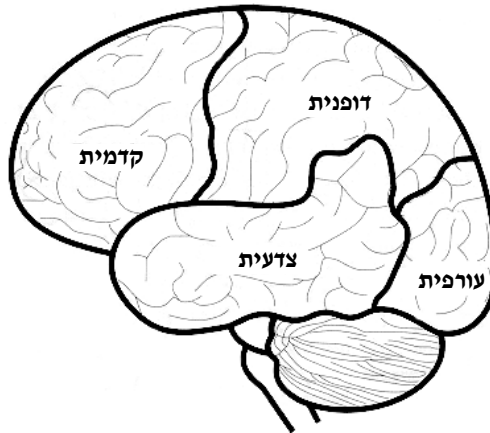


© 1989-97 by Techpool Studios, Inc. USA

מדענים מחלקים את המוח לארבעה אזורים הקרויים אונות: עורפית (occipital), קדמית (frontal), דופנית (parietal) וצדעית (temporal) (תרשים 2.2). האונה העורפית מצויה בחלק המרכזי של אחורי המוח, ותחום אחרייתה העיקרי הוא הראייה. האונה הקדמית היא האזור שסביב מצחנו, והיא מעורבת בפעולות מכוונות כמו שיפוט, יצירתיות, פתרון בעיות ותכנון. האונה הדופנית ממקמת בחלק העליון של אחורי המוח. משימותיה כוללות עיבוד של תפקודים מסדר גבוה של חישת ושמח. האונות הצדעיות (ימנית ושמאלית) מצויות מעל וסביב לאוזניים. אזור זה אחראי בעיקר על שמיעה, זיכרון, משמעות ושמח. בין תפקודי האונות יש מידה מסוימת של חפיפה.

תרשים 2.2

אונות המוח

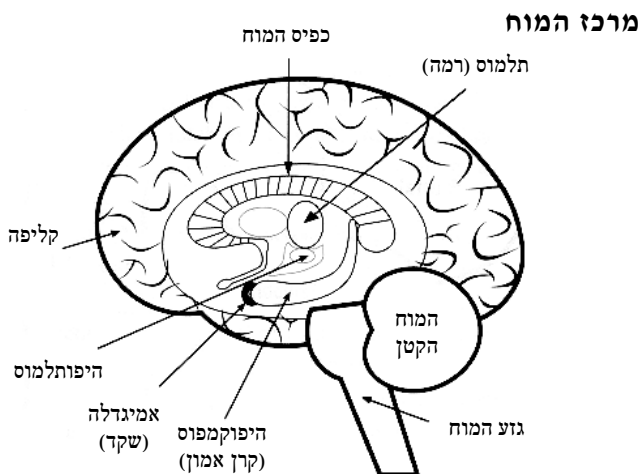


האזור שבמרכז המוח כולל את ההיפוקמפוס [קרן אמון] (hippocampus), התלמוס [רמה] (thalamus), ההיפותלמוס (hypothalamus) והאמיגדלה [שקד] (amygdala) (תרשים 2.3). אזור מרכז המוח – הידוע גם כמערכת הלימבית – תופס כ-20 אחוזים מנפחו של המוח ואחראי על רגשות, שינה, קשב, ויסות מערכות הגוף, הורמונים, מיניות, ריח וייצור של רוב החומרים הכימיים במוח. ישנם חוקרים הטוענים שאין בעצם מערכת לימבית, אלא רק מבנים ספציפיים המעבדים רגשות, כדוגמת האמיגדלה (LeDoux 1996, pp. 97–100). אחרים, כדוגמת פול מקלין (Paul MacLean), חולקים על טענה זו ועדיין מכנים את מרכז המוח "האזור הלימבי (או הרגשי)" (1990).

חוקרי המוח חולקים בדעותיהם לגבי אותו מקום במוח המאפשר לך לדעת שאתה "אתה" (מודעות). ייתכן שהוא מפורז ברחבי הקליפה או התלמוס, וייתכן שהוא ממוקם ליד המבנה הרטיקולרי שבראש גזע המוח. המוח הגדול (cerebrum) תופס כ-75 אחוז מן הנפח הכולל של המוח, אך חלק ניכר ממנו עדיין לא קושר לתכליות ספציפיות; תכופות מתייחסים אליו כאל "קליפת האסוציאציות" (association cortex). קליפת המוח וגרעינים עצביים

אחרים מורכבים מנוירונים אפורים או גופי תאים. החלק הלבן במוח הוא שכבת המיאלין (myelin) שעוטפת את הסיבים המקשרים (אקסונים ; axons). הקורטקס החושי (sensory cortex) (שמפקח על קולטני העור) והקורטקס המוטורי (motor cortex) (שאחראי על התנועה) הם רצועות דקות לרוחב החלק העליון של מרכז המוח. בחלק התחתון האחורי של המוח מצוי המוח הקטן (cerebellum), שאחראי בעיקר על שיווי משקל, יציבה, תנועה מוטורית ועל חלק מתחומי הקוגניציה (תרשים 2.3). ניסויים שנערכו לאחרונה מספקים תמיכה משמעותית למסקנה שהמוח הקטן מכיל שרידים חיוניים של זיכרון לטווח ארוך הקשור בלמידה מוטורית (Thompson 1993).

תרשים 2.3



אנרגיה ללימודים

המוח אינו יעיל מבחינת צריכת האנרגיה שלו. הוא מהווה כ-2 אחוזים ממשקל גופו של אדם בוגר, אך צורך כ-20 אחוזים מהאנרגיה שלו. כיצד מקבל המוח את האנרגיה הדרושה לו ללמידה? מקור האנרגיה העיקרי של המוח הוא הדם, שמספק לו חומרים מזינים כמו גלוקוזה, חלבונים, יסודות

כימיים שונים וחמצן. המוח מקבל כ-30 ליטר דם בכל שעה, וכ-750 ליטרים ביום. מים מספקים למוח את האיוון האלקטרוליטי הנחוץ לו לתפקוד תקין; הוא זקוק ל-8 עד 12 כוסות מים ביום כדי לתפקד באופן אופטימלי. התייבשות היא בעיה נפוצה בכיתות בבתי ספר, שגורמת לעייפות וללמידה לקויה (Hannaford 1995). תפקידה של התזונה יידון בפרק הבא, אך לעת עתה נאמר שתזונה טובה אכן מסייעת ללמידה.

חמצן, כמובן, חיוני למוח, שמשמש בחמישית מן החמצן של הגוף. הכרתנו אובדת בתוך שניות ספורות אם אספקת הדם למוחנו מופרעת. למזלנו, עורק הצוואר (carotid artery) מבטיח שדם מחומצן טרי יגיע למוח מיד לאחר שעזב את אזור הלב והריאות, ולפיכך המוח בדרך כלל אינו חסר חמצן לצורך תפקודיו הבסיסיים. רמות גבוהות יותר של קשב, תפקוד שכלי והחלמה קשורות באיכות גבוהה יותר של אוויר (פחות פחמן דו-חמצני ויותר חמצן). רבות מן התרופות המכונות "תרופות חכמות", שמשפרות עירנות, תפקוד קוגניטיבי וזיכרון, משפרות את זרימת החמצן למוח. בהתחשב בכך שרק 36 אחוזים מתלמידי בתי הספר בארצות-הברית מקבלים שיעור יומי בחינוך גופני, רב החשש שהם אינם זוכים לכמויות מספיקות של דם עשיר בחמצן.

היכן מתחילה הלמידה?

במוח ישנם שני סוגים תאים: נירונים וגליאליים. 90 אחוז מהתאים במוח הם גליאליים, אך דווקא עשרת האחוזים הנותרים – הנירונים – מוכרים לנו טוב יותר. הנירונים (ביונית: "מיתר קשת") הם תאי המוח הנחקרים ביותר. לשם השוואה, לזכור הפירות יש 100,000 נירונים, לעכבר – 5 מיליון, ולקוף – כ-10 מיליארד. לבני האדם, לעומת זאת, יש כ-100 מיליארד נירונים. במוחם של מבוגרים בריאים יש אותו מספר של נירונים כמו במוחו של תינוק בן שנתיים. מילימטר מעוקב בודד של רקמת מוח מכיל יותר ממיליון נירונים, שקוטרו של כל אחד מהם כ-50 מיקרונים. מדי יום אנו מאבדים תאי מוח כתוצאה משחיקה, מריקבון ומאי-שימוש. מדענים חלוקים בדעותיהם בשאלה כמה תאים בדיוק אובדים, אך ההערכות נעות בין 10,000 ל-100,000 ביום

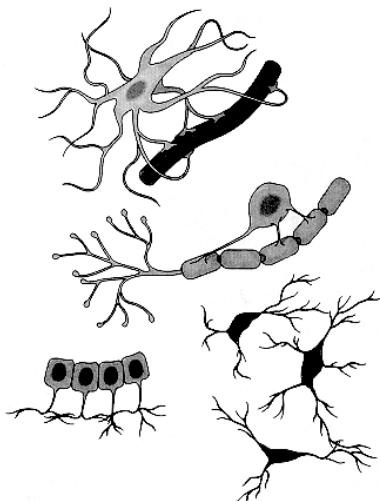
(Howard 1994). על כל פנים, לא חסרים לנו נוירונים: אפילו אם נאבד חצי מיליון ביום, עדיין יעברו מאות שנים עד ש"תאבד דעתנו" כליל.

תאי המוח הנפוצים ביותר קרויים אינטרנוירונים (interneurons), או תאים גליאליים ('גליה' ביוונית פירושו 'דבק'). תאים אלה הם חסרי גוף, ומונים כ-1,000 מיליארד. בין תפקידיהם המשווערים: בידוד הנוירונים מזרם הדם, הובלה של חומרים מזינים וניסות המערכת החיסונית. התאים הגליאליים גם מסלקים תאים מתים ומספקים תמיכה מבנית שמשפרת את יציבותו של המוח (תרשים 2.4).

תרשים 2.4

סוגים נפוצים של תאים גליאליים

תאים גליאליים הם התאים הנפוצים ביותר במוחנו: מספרם גדול פי 10 ממספר הנוירונים.

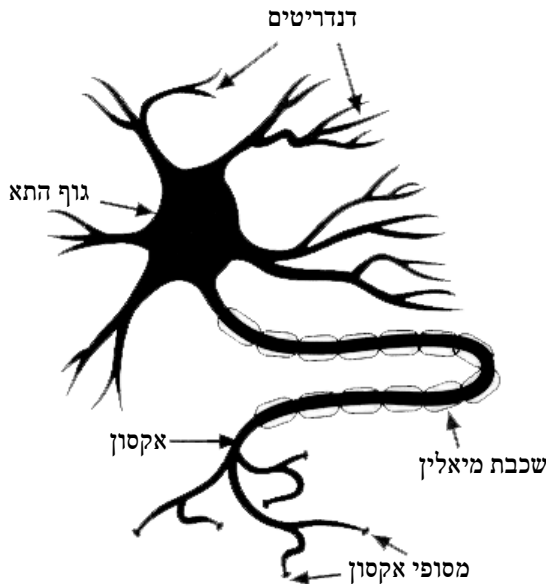


מספרם של הנוירונים במוח הוא קטן יותר, אך הם חיוניים לביצוע משימותיו. נוירונים עשויים מגוף תא קומפקטי, מדנדרייטים ומאקסונים (תרשים 2.5). הם אחראים לעיבוד מידע ולהתמרה של אותות כימיים

לחשמליים ולהפך (חשמליים לכימיים). לנוירון יש שתי תכונות מרכזיות המבחינות אותו מתאי גוף אחרים. ראשית, מחקר חדש שנערך במכון סאלק (Salk Institute) בקליפורניה, מגלה שחלק מן האזורים במוח מסוגלים לגדל נוירונים חדשים, ואכן עושים זאת בפועל (Kempermann, Kuhn and Gage, 1997). שנית, נוירון שמתפקד באופן תקין יורה, מעבד ומפיק מידע ללא הפסקה; מדובר במרכז תוסס ביותר של פעילות.

תרשים 2.5

תאי מוח (נוירונים)



גוף התא ניחן אמנם ביכולת תנועה, אך רוב הנוירונים הבוגרים אינם זזים; הם רק שולחים אקסונים כלפי חוץ. לנוירון יכולים להיות דנדריטים (סיבים) רבים, אך רק אקסון אחד. האקסון הוא שלוחה דקיקה יותר, דמוית-רגל, המתחברת לדנדריטים אחרים. רוב האקסונים מתקשרים לדנדריטים בלבד,

ובדרך כלל דנדריטים אינם מתקשרים זה עם זה. כדי שיוכל להתקשר עם אלפי תאים אחרים, האקסון מתחלק ומתפצל שוב ושוב. תפקידם של נוירונים הוא להעביר אינפורמציה, ולפיכך אף אחד מהם איננו משמש כמקבל מידע בלבד, או כתחנת קצה. גם כיוונו של המידע הוא קבוע: ברמה הנוירונית, מידע עובר תמיד מגוף התא, במוֹרֵד האקסון ועד לסינפסה. הוא לעולם אינו נע מקצה האקסון בחזרה אל גוף התא.

לאקסון שני תפקידים מרכזיים: הולכת מידע בצורת גירוי חשמלי והעברה של חומרים כימיים. האקסונים הארוכים ביותר (שיוורדים לאורך עמוד השדרה) יכולים להגיע עד לאורך של מטר אחד, אך רובם קרובים יותר לסנטימטר. ככל שהאקסון עבה יותר, כך הוא מוליך אותות חשמליים ומידע במהירות גדולה יותר. כל האקסונים הגדולים יותר עטופים במיאלין – חומר שומני שמתהווה מסביב לאקסונים פעילים מאוד. עטיפת המיאלין מגבירה את מהירות ההולכה החשמלית (עד פי 12), וגם מצמצמת את ההפרעה שנגרמת כתוצאה מריאקציות קרובות. שכבת המיאלין וצמתים לאורך האקסונים יכולים להאיץ את מהירותם של האותות החשמליים עד כדי 120 מטר בשנייה, או 320 קילומטר בשעה. האקסונים הקצרים ביותר כנראה אינם זקוקים לעטיפת המיאלין; הדבר דומה להקצאה של נתיב מיוחד לאוטובוסים לאורך קטע כביש בן כמה מאות מטרים.

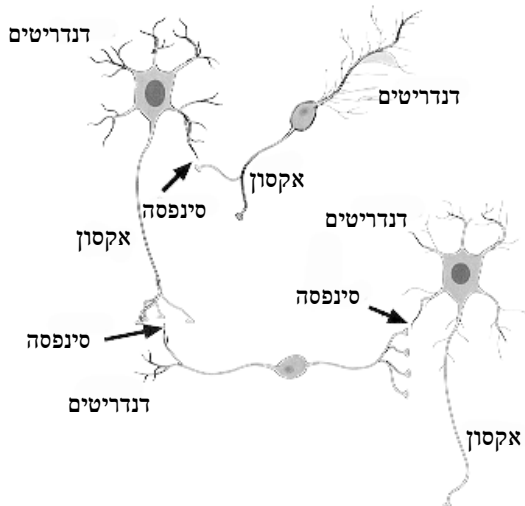
כאמור, אף נוירון איננו משמש תחנת קצה, וכל מטרתו היא רק להעביר מידע הלאה. נוירון בודד מסוגל לקלוט אותות מאלפי תאים אחרים, המצויים לעתים במרחק של מטר ממנו, והאקסון שלו יכול להתפצל שוב ושוב ולשלוח אותות לעוד אלפי תאים אחרים. עם זאת, נוירונים מתקשרים בדרך כלל בעיקר עם נוירונים קרובים להם. קשרים רבים יותר הופכים את התקשורת ליעילה יותר: בתחבורה עירונית עלולים להיווצר פקקים, אך נתיבים חלופיים עשויים לספק שסתומי בריחה. סך הריאקציות הסינפטיות שמגיעות מכל הדנדריטים לגוף התא בנקודת זמן נתונה הוא שמכריע האם אותו תא אכן "יִקְרָה". הנוירון "יִקְרָה" אם מספיק אותות יגיעו אליו ויגרו אותו. דנדריטים הם שלוחות דמויות ענפים, הגדלות כלפי חוץ מגוף התא כאשר הסביבה מועשרת.

המידע נע בתוך הנורון באמצעות אותות חשמליים, ומולך אל מעבר למוח הסינפטי שבין נורון אחד למשנהו באמצעות חומרים כימיים הקרויים נורוטרנסמיטרים (תרשים 2.6). למידה היא תפקוד חיוני של נורונים שאיננו יכול להתבצע באופן נפרד – היא דורשת קבוצות של נורונים (Greenfield 1995).

תרשים 2.6

כיצד נורונים מתקשרים:

בנתיבים של אקסון – סינפסה – דנדרית, אותות חשמליים הופכים לכימיים ומותמרים חזרה לאותות חשמליים



כיצד אנו לומדים?

למידה היא הדבר שהמוח האנושי מצטיין בו יותר מכל דבר אחר. הלימוד משנה את המוח, משום שהמוח מסוגל לחוות את עצמו מחדש בעקבות כל גירוי, חוויה או התנהגות. מדענים אינם בטוחים כיצד בדיוק הדבר מתרחש, אך יש להם כמה רעיונות באשר למה מתרחש.

ראשית, סוג מסוים של גירוי למוח מתחיל את התהליך. הגירוי יכול להיות פנימי (הברקה או סיעור מוחות), או שהוא יכול להיות התנסות חדשה, כמו פתרון של פאזל. בהמשך, הגירוי מסווג ומעובד בכמה רמות, ולבסוף נוצר פוטנציאל של זיכרון. בפשטות, משמעות הדבר היא שהחלקים נמצאים במקום, באופן שניתן להפעיל את הזיכרון בקלות. כחינוכאים, כדאי לנו להקדיש זמן להבנה של יסודות תהליך זה. כך נוכל לחלץ כמה תובנות מועילות ביחס לאופן שבו תלמידים לומדים.

הגירוי

ככל שהדברים נוגעים למוחנו – או שאנו עושים משהו שכבר ידוע לנו כיצד לעשותו או שאנו עושים משהו חדש. במקרים של חזרה על למידה מוקדמת, יש סיכוי טוב שהנתיבים העצביים יהפכו ליעילים יותר ויותר. הם עושים זאת באמצעות התעטפות במיאלין – אותו תהליך של הוספת שכבה שומנית לאקסונים. המוח הופך ליעיל יותר לאחר ההתעטפות במיאלין. שני חוקרים מבית הספר לרפואה באוניברסיטת וושינגטון, הנקה ון מיר (Hanneke Van Mier) וסטיב פיטרסון (Steve Peterson), גילו בסריקת PET שכאשר נבדקים מבצעים מטלה חדשה, אזורים רבים יותר במוחם "מאירים", בהשוואה למצב המתקבל כשהם מבצעים מטלה שנלמדה טוב יותר. מי שאינם מיומנים במטלה מסוימת משתמשים יותר במוחם, אך עושים זאת ביעילות נמוכה יחסית. תכונה זו מדגימה באיזו מהירות מוחנו מתאים ומחווט את עצמו מחדש.

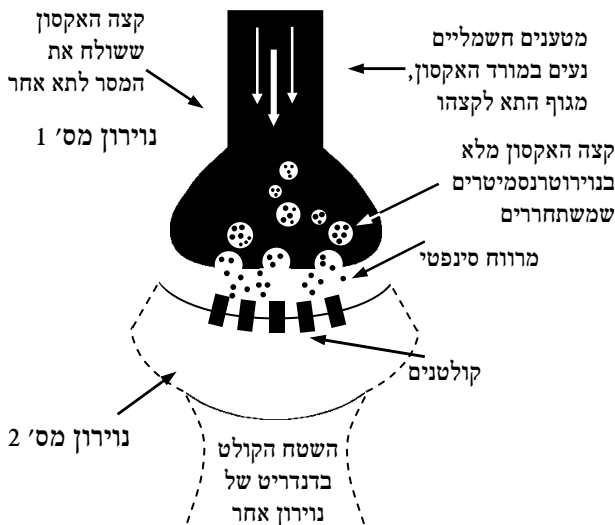
תרגול הוא ביצוע של מה שאנו כבר יודעים לעשות, בעוד שגירוי הוא ביצוע של משהו חדש. צפייה בסרט חדש, האזנה למוסיקה חדשה, שירה של פזמון חדש, ביקור במקום חדש, פתרון בעיה חדשה או יצירה של חברויות חדשות – כל אלה עשויים לגרות את המוח. כל עוד הגירוי המנטלי או המוטורי החדש הוא קוהרנטי, מופקת ממנו כמות גדולה יותר של אנרגיה חשמלית מועילה בהשוואה לזו שמספקים גירויים ישנים. הקלט מומר לדחפים עצביים, שנעים לעבר תחנות הפקה או מיון, דוגמת התלמוס שנמצא במרכז המוח. כשהתנהגותנו היא מכוונת, מוחנו מכנס יחדיו את

המידע שמגיע מכל החושים ויוצר במהירות "מפה" בהיפוקמפוס (Freeman 1995). משם מופצים אותות לאזורים ספציפיים במוח.

משעה שמידע זה נקלט, כל תא במוח פועל כמו סוללה חשמלית זעירה. הוא מונע באמצעות הפרשי הריכוז של יוני נתרן ואשלגן משני עבריו של קרום התא. שינויים במתח החשמלי מסייעים להעברת האותות הדרושים לצמיחת הדנדריטים. נוירורנסמיטרים מאוחסנים בקצות האקסון, שכמעט נוגעים בדנדריטים של תא אחר. באופן טיפוסי, הנוירורנסמיטרים הם מעוררים (כמו גלוטמט) או מעכבים (כמו גִּבְהָה). כשגוף התא שולח מטען חשמלי בכיוון האקסון, הוא גורם לשחרור הכימיקלים המאוחסנים הללו אל תוך המרווח הסינפטי, שהוא השטח שבין קצה האקסון והעוקץ של הדנדריט (כפי שניתן לראות בתרשים 2.7).

תרשים 2.7

הלמידה מתרחשת בסינפסה



לאחר שהנירוטרנסמיטרים מגיעים למרווח הסינפטי, הריאקציה הכימית מפעילה (או מעכבת) אנרגיה חשמלית חדשה בקולטני הדנדריט. האות החשמלי הופך לכימי וחוזר ומותמר לאות חשמלי, והתהליך חוזר על עצמו עד לתא הבא. בסופו של דבר, הגירוי החשמלי הנשקף, יחד עם הזרם הגובר של החומרים המזינים, מקדמים את גדילת התאים באמצעות הסתעפות של דנדריטים. הסתעפויות אלה עוזרות לנו ליצור עוד ועוד קשרים, עד שבמקרים מסוימים מתפתחים "יערות עצביים" שמסייעים לנו להבין דברים טוב יותר, ולעתים אף הופכים אותנו למומחים בנושא מסוים. כשאנו אומרים שתאים "מתקשרים" לתאים אחרים, כוונתנו בעצם לכך שהם נמצאים בקרבה כזו עד שהסינפסה "משמשת" אותם שוב ושוב, בקלות וכמעט ללא מאמץ. סינפסות חדשות מופיעות בדרך כלל בעקבות למידה.

יצירתה של למידה בת-קיימא

מבחינתם של חוקרי המוח, לימוד וזיכרון הם שני צדדים של אותו המטבע. לא ניתן לדבר על האחד מבלי להשתמש גם בשני. שהרי, בסופו של עניין, הרצון היחידה ללמידה היא הזיכרון. לרוע המזל, מתברר שחלק אחרון זה בתהליך הלמידה הוא אתגר עצום ומתסכל למדענים. בכל פעם שהם סבורים שהבינו כיצד העסק פועל, באה המציאות וטופחת על פניהם. בקיצור, הם עדיין מחפשים תשובות.

דונלד הב (Donald Hebb), הפסיכולוג הקנדי הדגול, שיצר נכונה לפני יותר מ-50 שנה שלמידה מתרחשת כאשר תא נזקק לפחות מידע מתא אחר על מנת לפעול בפעם הבאה. במילים אחרות, התא "לומד" להגיב אחרת. צוות מחקר מ-MIT בראשותם של חתן פרס נובל סוסומו טוֹנֶגָאָוָא (Susumu Tonegawa) ואריק קנדל (Eric Kandel) זיהה לאחרונה גֶן יחיד וספציפי שמפעיל את יצירת הזיכרון הקריטית הזו (Saltus 1997). פריצת דרך זו עשויה להסביר מדוע לאנשים מסוימים יש זיכרון טוב מלאחרים: הזיכרון נשלט בחלקו על ידי הגנים.

הדעה הרווחת כיום היא שלמידה בת-קיימא, או העצמה ארוכת-טווח (LTP, long-term potentiation), היא חיונית לתהליך הפיזי של הלמידה. מאז שנתגלתה ב-1973 על ידי בליס ולומו (Bliss and Lomo), בוצעו אינספור ניסויים שעמדו על המורכבות הכרוכה בה. הנה התהליך על קצה המזלג:

תא מגורה חשמלית שוב ושוב עד שהוא מעורר תא קרוב לו. אם נשלח גירוי חלש יותר לתא השכן זמן קצר לאחר מכן, מוגברת יכולתו של התא להתעורר. לפעילות עצבית יכולה להיות השפעה מעוררת או מעכבת, ודיכוי של תהליך מעכב עשוי להסתיים בהפעלה. ישנה תופעה נוספת שמסייעת לנו ללמוד – דיכוי ארוך-טווח (LTD, long-term depression), המתרחש כאשר סינפסה משתנה באופן שסיכויי הפעלה פוחתים. למידה מהירה יותר מקודמת באמצעות הפחתת הסיכויים לביצוע קישור מוטעה. דבר זה מתרחש כאשר אנו לומדים באמצעות ניסוי וטעייה (Siegfried, 1997). במילים אחרות, תאים משנים את פתיחותם לקליטת הודעות בהתבסס על גירויים קודמים. דומה שהתאים "לומדים" ומשנים את התנהגותם. בקצרה, הלמידה נעשית באמצעות שינוי היעילות הסינפטית.

למידה והתנהגות

הבנת הקישורים ברמה התאית היא אמנם מרתקת, אך למידה והתנהגות הן שונות זו מזו לעתים קרובות. גם אם למדת מתוך ספר כלשהו כיצד ללמד טוב יותר, הרי בפועל לא תמיד ישתנו דרכי ההוראה שלך. מדוע וכיצד זה קורה? כמובן, ניתן להצביע על נסיבות חיצוניות כמו לחץ-יתר או התנהגות של תלמיד. אלא שהתנהגותנו נשלטת בדרך כלל דווקא על ידי מורכבותם של מצבנו הרגשיים וזיכרונותינו. הכימיה היום-יומית של מוחנו מוסיפה מורכבות עצומה לשאלה "כיצד מוחנו לומד?".

ההתנהגויות היום-יומיות שלנו מושפעות מאוד מכימיקלים "חופשיים" אחרים במוח: מונואמינים ופפטידים. למעשה, חוקר מסוים העריך שיותר מ-98 אחוזים מכלל התקשורת הפנימית במוח ובגוף נעשית באמצעות פפטידים, ולא באמצעות סינפסות (Pert 1997, p. 139). הנוירורנסמיטרים

שהוזכרו קודם לכן – גִּבָּה וגלוטמט למשל – פועלים כמו טלפונים סלולריים ומספקים תקשורת ייעודית; לעומת זאת, החומרים האחרים פועלים כמגאפונים ענקיים שמסוגלים לשדר לאזורים נרחבים במוח. חומרים אלה הם בדרך כלל סרוטונין, דופמין ונוראדרנלין. אלה מייצרים את ההתנהגויות שבהן אנו צופים בכיתה: קשב, לחץ או עייפות. הפרקים הבאים יעסקו בכך בהרחבה, אך בקצרה ניתן לומר שהלמידה מתרחשת בעת ובעונה אחת בכמה שכבות מורכבות – מן הרמה התאית ועד לרמה ההתנהגותית.

כיצד אנו מחכימים?

אינטליגנציה היא התוצאה הסופית של למידה אצל בני אדם. ללא קשר לדרך שבה נבחר להגדיר אינטליגנציות, הרי מוח גדול יותר, או יותר תאי מוח בכל סנטימטר מעוקב, אינם מועילים. לדולפין יש מוח גדול יותר, ואילו צפיפות התאים במוחה של החולדה גדולה יותר מאשר במוח האנושי. המפתח להקצמה מצוי בפיתוחם של קשרים סינפטיים רבים יותר בין תאי מוח, ובשימורם של קשרים קיימים. הקשרים הם שמאפשרים לנו לפתור בעיות ולהבין דברים.

בכמה אחוזים מן המוח אנו משתמשים? אנו משתמשים ברוב האזורים במוח בכל יום נתון, שכן התפקודים השונים מפוזרים בו היטב. בנוסף, המוח מתאים את עצמו לאורח חיינו מיום לידתנו. בדרך כלל, הדבר פועל לטובתנו, שכן אנו מעודדים אותו להתפתח בדיוק כך שישרת את עולמנו האישי. אם אתה טוב במוסיקה, סביר להניח שתשיר, תלחין או תנגן. אם את טובה בספורט, כנראה תתאמני או תשחקי. אם אתה טוב במספרים, תבצע חישובים בכל יום. בעולם האמיתי, מוחך מתאים בדיוק בשבילך.

אלא שהסיפור שונה מאוד ברמה התיאורטית והמתמטית. מעריכים שאנו משתמשים בפחות ממאית האחוז של יכולת העיבוד המשוערת של מוחנו. כל אחד מ-100 מיליארד הניירונים שבמוח מקושר באופן רגיל ל-1,000 עד 10,000 ניירונים אחרים, אך באופן תיאורטי הם יכולים להתקשר להרבה יותר. מכיוון שלכל ניירון יש כמה אלפי סינפסות, הרי במוח כולו יש

טריליוני סינפסות. המוח מסוגל לעבד עד 10^{27} ביטים של מידע בכל שנייה (Hobson 1994). עם זאת, פול צ'רצ'לנד (Churchland 1995) מעריך שהקונפליקציה האפשרית הכוללת היא 10 בחזקת 100 טריליון. מספר זה גדול משמעותית ממספר החלקיקים הידוע לנו ביקום. מוחנו הוא, אכן, מעשה נסים. המוח הוא מה שיש לנו, ואילו השכל (mind) הוא מה שהמוח עושה. במילים אחרות, ה"שכל" איננו דבר, אלא תהליך.

האם הקישוריות העצבית הפוטנציאלית הזו יכולה להיות אחראית למה שמכונה "גאונות" אצל אנשים מסוימים? איננו יודעים עדיין. כמעט 10 אחוזים מן הילדים שמתחת לגיל 5 הם בעלי זיכרון צילומי, וכך גם אחוז אחד מן הבוגרים. בני אדם מסוימים מסוגלים לחשב מספרים עצומים, ולעתים גם לעשות זאת מהר כמו מחשב. ישנם מקרים מתועדים, שבהם נחקרים דיברו תריסר שפות או יותר, הפגינו העברה (thought transference), ביצעו קריאה מהירה או הציגו זיכרון יוצא דופן. אחרים הראו שימוש בלתי-רגיל בתפיסה על-חושית (ESP), או בראייה למרחקים, או הפגינו כשרונות מוסיקליים בגיל מוקדם (Murphy 1992). האם תכונות אלה עשויות להפוך לנפוצות בכיתותינו? האם נוכל להנדס את התפתחותם של אלברט איינשטיין חדש, של מיכאלאנג'לו, מוצארט, מרת'ה גרהאם או ביל גייטס?

לבסוף, אם למידה היא דבר שאנו מייחסים לו חשיבות, אז עלינו להעריך את תהליך הלמידה לא פחות מאשר את תוצאות הלמידה. מוחנו הוא יעיל וסתגלני ביותר, ומה שמבטיח את הישרדותנו הוא היכולת להתאים את עצמו וליצור אפשרויות חדשות. כיתת הלימוד הטיפוסית מצמצמת את אסטרטגיות החשיבה ואת אפשרויות התשובה שלנו. חינוכאים שמתעקשים להיצמד לגישות ספציפיות וב"תשובה אחת נכונה" מתעלמים ממה שקיים את המין האנושי במשך מאות שנים. בני האדם הצליחו לשרוד אלפי שנים דווקא משום שניסו דברים חדשים, ולא משום שאיתרו תמיד את התשובה האחת ה"נכונה". גישה זו איננה בריאה אם ברצוננו לגדל מוח חכם שמתאים את עצמו למציאות משתנה. הרעיון של מבחנים סטנדרטיים וצרים, שבהם צריך

למצוא חיפוש אחר חשיבה אלטרנטיבית, תשובות מרובות ותשובה נכונה, מפר את חוק ההסתגלות במוח המתפתח. חינוך איכותי מעודד תובנות יצירתיות. אז מה אפשר לעשות עם הידע הזה שיש לנו על המוח? האם מדובר בתיאוריה חסרת-ערך? לא מבחינתו של החינוכאי המקצועי. כל עוד אנו מצויים ב"עסקי הלמידה", המוח שייך לעניין. סוף-סוף למדנו מספיק כדי לנסח כמה צעדים חשובים לפעולה. תחומים רבים דורשים עדיין מחקר נוסף, אך עשרות מחקרים מספקים בסיס בהיר ואיתן דיו כדי שנוכל לתרגם לעבודה בכיתה. שתפו את תלמידיכם בדרך שבה מוחם לומד ופועל, ודברו על כך גם עם הורים סקרנים. בפרקים הבאים יוצגו פתרונות רבים לבעיות יום-יומיות. אך כדאי שתהיו מוכנים גם לשאלות רבות.