



המוח

יחידת לימוד מנושא גוף האדם בדגש הומיאוסטזיס
לתלמידי הביולוגיה בחטיבה העליונה



פיתוח וכתובה: ד"ר אורה כהנא

עריכה מדעית: ד"ר עידו מגן

ייעוץ פדגוגי: רות מנדלוביץ

ניהול הפרויקט: ד"ר רונית רוזנשיין

ייעוץ אקדמי: פרופ' ענת ירדן

עריכה דידיקטית: אסנת יוטקו-צרפתי, דבורה שפירא

עריכה לשונית: ענבל גיל, נדין קלברמן (פרק "מסביב לשעון")

עיצוב עטיפה ועיבוד תמונות: זיו אריאלי

עימוד: אבי טל

תרמו בעצות והערות: ד"ר זוהר סנפיר, מרים פלדשר-ברקוביץ, ד"ר מיכל מנדלוביץ

אין להפיץ, לשכפל, להעתיק, למכור, לשדר, לפרסם, או לאפשר לאחרים לעשות כן בכל דרך אחרת בתכנים נשוא תקליטור/אתר זה לרבות באתרי אינטרנט אחרים, בפרסומים אלקטרוניים, בפרסומים מודפסים וכדומה, לכל מטרה בין שהיא מסחרית ובין שאינה מסחרית שאינה לצורך שימוש אישי ופרטי, אלא אם ניתנה רשות כתובה וחתומה לכך בכתב על ידי המרכז למורי הביולוגיה במכון ויצמן למדע.

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

שבט תשע"ו

פברואר 2016

תוכן עניינים

5	המוח הוא המבנה המורכב ביותר בגוף
7	מבנה המוח
7	גזע המוח
7	המוח הקטן
8	מוח הביניים
8	המוח הגדול
9	קליפת המוח
9	הקשר בין גודלו של המוח לאינטליגנציה
10	אזורי תפקוד במוח
10	מרכזי בקרה של תפקודים במוח
11	איך מגלים תפקוד של אזור במוח?
12	זיהוי אזורי תפקוד פעילים במוח
14	הצצה אל תוך המוח (הרחבה)
14	דימות המוח
15	טומוגרפיה ממוחשבת (CT)
15	דימות בתהודה מגנטית (MRI)
17	דימות תפקודי
17	דימות תפקודי בתהודה מגנטית (fMRI)
17	טומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים (PET)
18	אופטוגנטיקה
19	העברת המידע ועיבודו
19	תקשורת חשמלית ותקשורת כימית במערכת העצבים
20	עיבוד המידע במוח ובמוח השדרה
20	תגובת הרפלקס
21	העברת המידע ועיבודו במוח צורכים אנרגיה רבה
21	מחסום דם-מוח
22	המוח הוא עירום

23	שינויים במוח במהלך החיים
23	שינויים במספר תאי העצב
23	שינויים בקשרים שבין תאי העצב - תהליכי למידה וזיכרון
25	הפרעות בפעילות המוח
25	הפרעה לפעילות נירורטרנסמיטרים
25	הפרעת קשב, ריכוז והיפראקטיביות (ADHD)
26	שימוש בסמים
26	סמים ממריצים
27	התמכרות - הפעלת מסלול הגמול
28	קפה - לשתות או לא לשתות? (חקרשת)
30	סמים מרגיעים ומשככי כאבים
30	האם המוח חש כאבים?
31	הפרעות בפעילות המוח (הרחבה)
31	הפרעות בזרימת הדם במוח
31	שבץ מוחי
32	הפרעות בפעילות החשמלית במוח
32	אפילפסיה
33	פגיעה בתאי המוח
33	פרקינסון
35	טרשת נפוצה
36	אלצהיימר
38	מסביב לשעון (הרחבה)
38	השעונים הביולוגיים מכוונים את המקצב היממתי
40	מערכת השעונים הביולוגיים באדם
40	לשם מה דרוש השעון המרכזי?
42	מחזור שינה וערות
43	הפרעות בשעון הביולוגי
44	יעפת (גי'ט לג)
45	עבודה במשמרות לילה
45	זיהום אור
47	הפרעות בתזמון השינה

המחקר ששופך אור על המוח

גלובס, 15/01/2015

תארו לכם את המחזה הבא: דיסקוטק מלא אנשים החובשים כובע שקוף ומתוכו יוצא סיב אופטי. בכל אחד מהסיבים מתרחשת מסיבה של אורות, והנוכחים מתנהגים באופן מוזר, כאילו כוחות חיצוניים מניעים אותם לכאן ולכאן. והנה, עם הזמן מתגלה דפוס: כל מי שכובעו מואר בוורוד רוקד במעגלים בקוטר זהה; מי שכובעו מואר בכחול עוצר ובוהה באוויר כאילו נזכר במשהו חשוב; כל מי שכובעו מואר בירוק מסתובב ופונה לחבק את חבריו.

נשמע כי מסיבת הדיסקו המשונה הזאת לקוחה מסרט מדע בדיוני, אבל כבר היום אפשר לצפות בה ביו-טיוב, בגרסת העכברים. עכברים המתנהגים באופן החשוד הזה אינם מחוברים לאלקטרודות המשפיעות על תאי מוחם; האור בלבד הוא הגורם לשינוי בהתנהגות שלהם. בשנים האחרונות הצליחו חוקרים להשפיע על עכברים בעזרת אור, במגוון דרכים: בחלק מהעכברים הצליחו לקבע זיכרונות, אצל אחרים מחקו זיכרונות ובקבוצה נוספת הצליחו לשנות את חוויית הזיכרון - ממפחיד לנעים, ולהפך. השינוי התחולל רק בפרק הזמן שבו האור דלק ולעתים גם מיד לאחר שנכבה. כעבור זמן העכברים חזרו לעצמם.

זוהי האופטוגנטיקה, משדות המחקר הכי מלהיבים בתחום חקר המוח. היא מאפשרת להגדיר קבוצה מסוימת של תאי מוח ולשתול בהם מידע גנטי, כך שיוכלו להגיב לתדר מסוים של אור. כאשר מאירים את המקום, קבוצת תאי העצב הזאת מתנהגת כמו שאנחנו רוצים. בעתיד התחום עשוי לסלול את הדרך להבנת מחלות כמו הפרעת קשב, פרקינסון ואוטיזם ולהציע טיפולים מתקדמים לאפילפסיה. עוד על השיטה תוכלו לקרוא בעמ' 18.

צפו בסרטון קצרצר המדגים השפעה על התנהגות עכבר באמצעות אלומת אור כחול שכוונה אל מוחו.

על מנת להבין כיצד אפשר לכוון התנהגות של בעל חיים בעזרת הארה של המוח נצא למסע בנבכי המוח. נכיר את המבנה של המוח ואת תפקודו, ונתוודע לתגליות מרתקות מחזית המחקר, שמאפשרות היום לחקור ולסייע בתחומים רבים הקשורים בתפקוד המוח.

המוח הוא המבנה המורכב ביותר בגוף

המוח נחשב לאיבר המורכב ביותר בגוף. הוא מווסת תהליכים המתרחשים בגוף ומתאם ביניהם. מיליוני האותות המגיעים אל המוח בכל רגע ורגע מביאים חדשות על הנעשה בסביבה הפנימית ובסביבה החיצונית



איור 1: רשתות תאי העצב במוח (אילוסטרציה)

של הגוף. המוח מעבד את המידע הזה, מנתח אותו ומחולל אגב כך תגובות, רגשות, זיכרונות, מחשבות, או תכניות המוליכות לקבלת החלטות. כל אותה עת המוח עסוק גם בפיקוח על הנשימה, על הרכב הדם, על טמפרטורת הגוף ועל תהליכים רבים אחרים המתרחשים בגוף. כל עיבוד של מידע מתרחש באזור מיוחד לכך במוח, וביצוע כל משימה מצריך שיתוף פעולה מצד אזורים שונים. שטף הפעולה מתאפשר הודות לקשרים עצביים בין חלקי המוח השונים. הפרדוקס הגדול של המוח הוא שהכלי שמאפשר לנו לחשוב ולדעת הוא בין החידות הכי גדולות של האנושות, ואנו יודעים עליו מעט מאוד. מפתיע לדעת שבימי קדם סברו כי מרכז התודעה של גוף האדם נמצא באיברים שונים, כמו הלב והכבד. רק עם התפתחות הפיזיולוגיה המודרנית במהלך המאה התשע-עשרה, התחזקה ההכרה בתפקודו

המרכזי של המוח. חקר המוח התפתח מאוד במאה השנים האחרונות. עם זאת, גבולות יכולת המוח האנושי אינם ידועים, וחוקרים מניחים כי המוח הוא המבנה המורכב ביותר ביקום. המוח כולו מורכב מכמאה מיליארד (10¹¹) תאי עצב המאורגנים ברשתות מסועפות. כל אחד מתאי העצב יכול ליצור מגע עם 1,000 עד 10,000 תאי עצב אחרים. תפקודי המוח הם רבים, וכולם מבוצעים בדרך אחת ויחידה; תאי עצב מעבירים ביניהם אותות חשמליים וכימיים, ומכלול האותות הללו הוא הפעילות המוחית לסוגיה הרבים והשונים כל כך, החל ממטלות שגרתיות של ניהול משק בית וכלה בתפקודים הגבוהים ביותר של חשיבה ותודעה. כיצד קורה הדבר?

אנו יודעים כיום על מבנהו של תא עצב בודד ועל דרכי פעולתו. מוכרת לנו גם התקשורת הכימית המתרחשת בצמתים העצביים, אולם עדיין נסתרת מעינינו הדרך שבה רשתות שלמות של תאי עצב פועלות בסנכרון. בעזרת אמצעי הדמיה התקדם המדע באופן ניכר כל כך, עד שרבים מאזורי המוח מופו ואפשרו להרחיב את התגליות, האבחונים והטיפולים. אולם עדיין רב הנסתר על הגלוי.

ברור כיום כי אין ביכולתו של תחום יחיד במדע ובכלים העומדים לרשותו כדי להשיב על השאלות הרבות הנוגעות למוח; וחקר המוח העכשווי הוא מפעל שיתופי שכמה וכמה תחומים מדעיים נוטלים בו חלק. רק גישה רב-תחומית, המשלבת ביולוגיה מולקולרית, טכניקות חדשות להפעלה מדויקת של יחידות תפקודיות במוח ושיטות חדשניות לניתוח נתונים - תוכל לקרב אותנו להבנה עמוקה יותר של פעולת המוח.

פרויקט המוח האנושי

"פרויקט המוח האנושי", שיצא לדרך באוקטובר 2013, הוא פרויקט בינלאומי ענק שבו משתתפים מאות חוקרים ממוסדות מחקר שונים באירופה, ובהם ארבעה מוסדות מיישראל. הפרויקט הוא המחקר המרוכז הגדול ביותר שנערך אי-פעם בתחום המוח. הוא משול בחשיבותו המחקרית לפרויקט הגנום האנושי. הפרויקט מציע גישה חדשה, רחבה ומאחדת-תחומים, שמטרתה לפצח את החידה הגדולה: כיצד חלקיו של המוח יוצרים במשותף מוח מתפקד.

אירופה נאלצת להוציא כיום סכומים אדירים, כ-80 מיליארד יורו לשנה, על טיפול במחלות מוח. נוסף על כך, העלות הגבוהה של פיתוח תרופות למחלות הקשורות למערכת העצבים, והיעדר הישגים משמעותיים בטיפול במחלות אלה, מרפים את ידיהן של חברות התרופות, ורבות מהן עוזבות את התחום. זה הרקע להכרזה כי חוד החנית המדעי בעשור הקרוב באירופה נמצא במדעי המוח. תקציב של כ-1.2 מיליארד יורו מהאיחוד האירופי נועד לגייס מדענים מתחומי מדע שונים ומהנדסי מחשבים לפיתוח כלים חדשים, שיאפשרו ליצור מחשב-על אשר יחקה את פעילות המוח, יסייע לחקור מחלות של מערכת העצבים וידמה טיפולים תרופתיים.



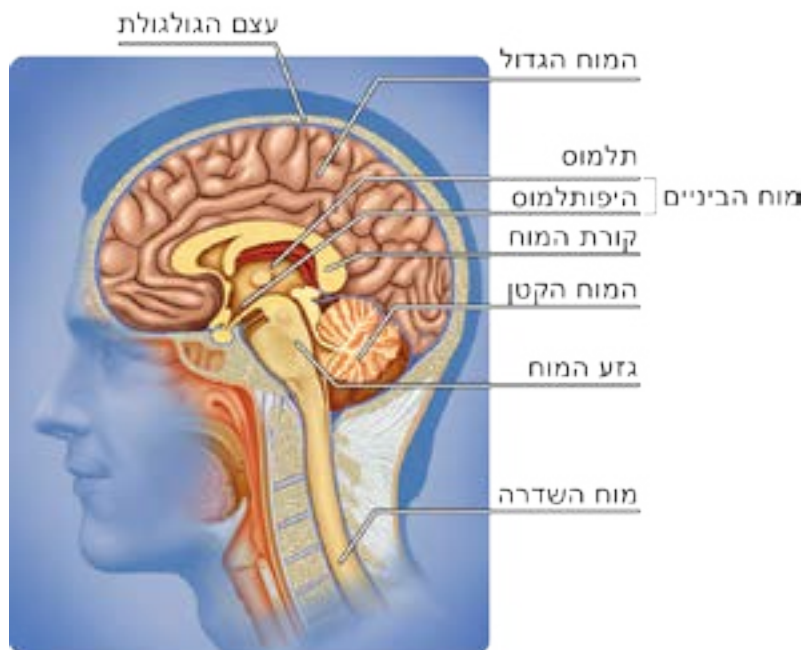
[מיזם ענק לחקר המוח האנושי שנולד בישראל יתקצב ב-1.2 מיליארד יורו](#)

מיזם מדעי שמקורו בישראל נבחר להוביל את תכנית המחקר האירופית בעשור הקרוב. מיזם המוח האנושי, שאחת ממטרותיו היא למפות את המוח על גבי מחשב, מנוהל כיום במכון הטכנולוגי של לוזאן (EPFL) על ידי פרופ' הנרי מרקרם, לשעבר חוקר במכון ויצמן.

מבנה המוח

המוח הוא גוש רך מאוד של חומר, ומשקלו אצל אדם בוגר הוא כ-1.5 קילוגרמים. המוח מוגן מפגיעה על ידי עצמות הגולגולת ועטוף מכל עבר בשלוש שכבות של קרומים. השכבה החיצונית הקשיחה היא מעטה מגן חזק. שני הקרומים הנוספים הם רכים יותר, וביניהם נמצא נוזל מוח השדרה. נוזל מוח השדרה מעניק הגנה נוספת למוח הודות לפעולתו כבולם זעזועים בעת תנועה.

בדומה למוחם של יונקים אחרים, מוח האדם מורכב מהחלקים האלה: גזע המוח, המוח הקטן, מוח הביניים והמוח הגדול. חלקים אלה שונים אצל היונקים השונים ביחסי הגודל ביניהם, אולם זהים או דומים מאוד בתפקודים שלהם.



איור 2: מבנה המוח

גזע המוח

גזע המוח הוא החלק העליון של מוח השדרה. הוא נקרא גזע המוח מפני שמ"גזע" זה צמח והתפתח המוח הקטן מאחור והמוח הגדול מלפנים. רצף של תאי עצב ועצבים נמשך מגזע המוח לתוך החוליות של עמוד השדרה, ויוצר את מוח השדרה. גזע המוח הוא מעין צומת עצבי המעביר גירויים לחלק העליון של המוח ומקבל משם פקודות מוטוריות להפעלת הגוף. נוסף על הסיבים העצביים העוברים דרכו קיימים בו גם מרכזים חיוניים - מרכזי הפיקוח על הנשימה, קצב הלב, לחץ הדם, ערנות, רעב, ויסות טמפרטורת הגוף, ויסות רמת הסוכר בדם ועוד. תפקודים אלה הם בסיסיים מאוד ואחראים על עצם הקיום. בגלל מיקומו של מרכז הנשימה, כאשר תאי גזע המוח מתים, אין מה שיפעיל את מערכת הנשימה, ומצב זה מוגדר כמוות.

המוח הקטן

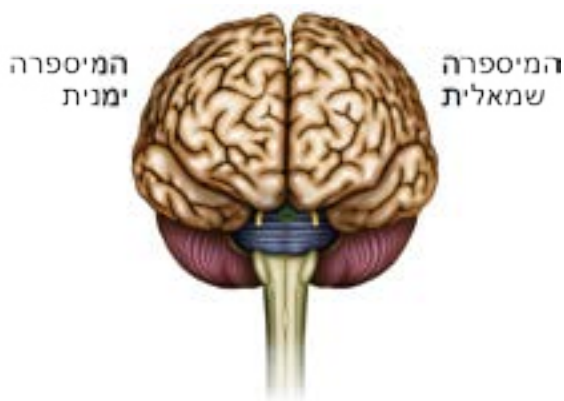
המוח הקטן ממוקם בחלקו האחורי של המוח מתחת למוח הגדול. תפקודו המרכזי של המוח הקטן הוא בתכנון ותיאום התנועה של האדם ובשמירה על שיווי המשקל. הוא מעבד מידע הקשור ליציבות הגוף ולמיקומו במרחב. תכונה נוספת אופיינית למוח הקטן היא היכולת לשמור מיומנויות שנרכשו לאורך זמן. אחרי שלומדים לרכוב על אופניים פעם אחת אפשר לחזור ולרכוב בנקל גם אחרי שנים.

מוח הביניים

מוח הביניים "מוסתר" מתחת למוח הגדול וחלקיו העיקריים הם התלמוס וההיפותלמוס. מוח הביניים קולט מידע על אודות גירויים המגיעים מאיברי החושים ומתאי החישה, מעבד מידע זה ומעביר חלק מהמידע החושי אל מרכזי עיבוד אחרים במוח הגדול. הוא מעבד תחושות פנימיות כמו רעב וצמא, ורגשות כמו כעס והנאה. נוסף על כך, הוא מפקח על מרכזי הבקרה של תפקודים חיוניים לגוף, כמו פעולת הלב והנשימה.

המוח הגדול

המוח הגדול תופס את רוב נפח הגולגולת והוא מפותח יותר באדם מאשר בכל יצור אחר. המוח הגדול מורכב משני חלקים שצורת כל אחד מהם דומה לחצי כדור ונקראת המיספירה (hemisphere). ההמיספרות ממוקמות מעל חלקי המוח האחרים ומופרדות זו מזו באמצעות חריץ גדול. ההמיספרות מקושרות ביניהן באמצעות אזור של חומר לבן המכונה "קורת המוח" (או כפיס המוח), אשר מכיל צרורות של אקסונים החוצים בין שני צדי המוח. בקורת המוח יש מעל 200 מיליון אקסונים. הקורה מאפשרת מעבר מידע בין ההמיספרות ופעילות הרמונית של המוח.



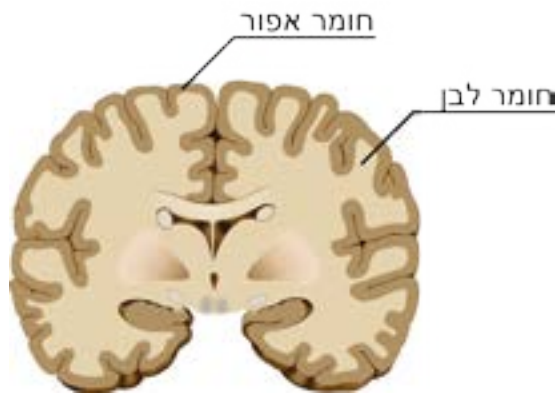
איור 3: המיספרות המוח הגדול, מבט מלפנים

כל המיספירה אחראית על צד אחד של הגוף, אולם מסיבות שאינן ברורות ההמיספרות פועלות באופן מוצלב, כך שצדו האחד של המוח אחראי על הצד הנגדי של הגוף. ההמיספירה הימנית מקבלת מידע מצד שמאל של הגוף ושולטת על התנועות בצד שמאל של הגוף, וההמיספירה השמאלית מקבלת מידע מצד ימין של הגוף ושולטת על התנועות בצד ימין של הגוף. לדוגמה, קלט שמגיע מהאוזן הימנית עובר עיבוד בהמיספירה השמאלית של קליפת המוח. יוצא מן הכלל הוא חוש הריח, שם אין הצלבה בעיבוד המידע, ומידע מצד מסוים של הגוף מעובד באותו צד של המוח.

מקור הצלבת ההמיספרות הוא כנראה בתולעים

תופעת הצלבת ההמיספרות והגוף מתהווה במהלך ההתפתחות העוברית, שעה שתאי עצב מכוונים באמצעות גורמי גדילה שמושכים אותם לצד מסוים. המקור של תופעה זו הוא ככל הנראה בתהליכים אבולוציוניים, ויש כמה תאוריות המסבירות מדוע גופנו נבנה בצורה כזאת. לפי אחת התאוריות, זהו מנגנון הישרדותי שמקורו ביצורים נחותים. כאשר תולעת חשה בחומר רעיל, היא מכופפת את גופה לכיוון ההפוך לחומר זה, על ידי כיווץ שרירים בצד המנוגד לחומר הרעיל. על מנת להפעיל את השרירים בצד זה שמנוגד לרעלן, המידע מצד הרעלן חייב להצטלב לצד השני ולהפעיל את השרירים. על פי התאוריה, מנגנון הישרדותי זה של הצלבות לאורך קו האמצע עבר במהלך האבולוציה ליצורים עילאיים.

המבנה של המוח הגדול הוא סימטרי ברובו, ואזורים מקבילים בשתי ההמיספרות לרוב אחראים על אותם תפקודים ומערכות. עם זאת, האנטומיה והקישוריות בתוך שתי ההמיספרות אינן זהות, וקיימת התמחות של כל המיספירה לתפקודים מסוימים, באופן שגם עשוי להשתנות מאדם לאדם. ההמיספירה השמאלית לרוב דומיננטית בתפקודים הקשורים לשפה, והימנית לרוב דומיננטית בהקשר של תפיסה מרחבית. עם זאת, החלוקה הפשטנית הזאת אינה נכונה לכלל האוכלוסייה, ובכל מקרה מדובר בהתמחות של המיספירה מסוימת ולא בהפרדה מוחלטת של התפקודים המוחיים בין ההמיספרות. צבען של ההמיספרות מבחוץ הוא אפור וחלקן הפנימי הוא לבן. החומר האפור של ההמיספרות מורכב מהגופים של תאי העצב. החומר הלבן מורכב מאקסונים של תאי עצב המקשרים בין אזורים שונים, למשל, בין



איור 4: החומר האפור והחומר הלבן במוח

ההמיספרות או בין המוח הגדול למוח השדרה. את צבעם ואת מראה השעווה שלהם מקבלים האקסונים מציפוי שמנוני - המיאלין - שגם מבודד את העצב וגם הופכו למוליך מהיר יותר.

קליפת המוח

חלקו החיצוני של המוח הגדול נקרא קליפת המוח. ההבדל הבולט ביותר במבנה המוח של בעלי חיים שונים הוא גודלה של קליפת המוח ביחס למשקלו הכולל של הגוף. שונות זו משקפת את ההבדלים הגדולים בין בעלי החיים ביכולת עיבוד המידע. המוח

הגדול מיוחד באדם, הן מבחינת גודלו ביחס לגודל גופו של האדם, והן מבחינת ריבוי הקפלים וריבוי תאי עצב הנמצאים בו. קליפת המוח באדם עתירה בפיתולים ובחריצים עמוקים. הקפלים נוצרו בתהליך האבולוציוני, שבמהלכו נפחה של קליפת המוח גדל בהרבה מהנפח של חלל הגולגולת. הקפלים והפיתולים הרבים מאפשרים לקליפת המוח להידחס בצפיפות רבה אל תוך הנפח המצומצם של הגולגולת. באופן זה הקפלים מאפשרים להגדיל את שטחה פי שלושה.

עובייה של קליפת המוח מגיע לשלושה מילימטרים בלבד, אבל מצויים בה כ-75% מכלל מאה מיליארד תאי העצב של המוח. קליפת המוח היא המפקחת העיקרית על האותות המתקבלים במוח. היא קולטת את האותות, מפרשת אותם, פועלת בהתאם להם, ובמקרה הצורך שומרת אותם לשימוש מאוחר יותר. בקליפת המוח נמצאים גם כל התפקודים השכליים הגבוהים, כמו זיכרון, כישרונות שונים ורגשות.

הקשר בין גודלו של המוח לאינטליגנציה

עם השנים נעשו ניסיונות רבים לקשור בין תכונות המוח בבעלי חיים, לרבות מבנהו, גודלו והמורכבות שלו, לבין היכולות השכליות של בעלי החיים, בעיקר תוך השוואת תכונות אלה לתכונות המוח האנושי. גישה אחת רואה בנפח או משקל של המוח מדד ליכולות שכליות מורכבות יותר. למעשה, מוח האדם איננו הגדול ביותר בעולם החי באופן מוחלט. מוחותיהם של כמה לווייתנים ופילים גדולים יותר, אך זאת במידה רבה בשל גופם הגדול בהרבה. בקרב אוכלוסיית האדם הקשר בין גודל המוח ליכולותיו הוא חמקמק מאוד. לאיינשטיין היה מוח רגיל בגודלו, אולי אפילו מעט קטן מהממוצע.

גישה אחרת מתמקדת בגודל המוח ביחס לגודל הגוף. ביונקים ובעופות המוח גדול משמעותית, יחסית לגודל הגוף, מאשר בשאר קבוצות החולייתנים. גידול זה מושג בעיקר בזכות התפתחות רבה של המוח הגדול. גודלו של המוח הגדול עומד בהתאמה לאינטליגנציה הגבוהה יותר של יונקים ועופות, ובעיקר ליכולתם ללמוד צורות התנהגות חדשות. ככל שבעל חיים נמצא בשלב גבוה יותר בסולם האבולוציוני, המוח הגדול הולך וגדל בהדרגה, ומגיע לשיא גודלו בבני אדם. במוח הגדול יש מרכזים תפקודיים של עיבוד מידע ובקרה מתקדמים יותר בהשוואה למרכזים בחלקים אחרים של המוח. בקליפת המוח מצויים המרכזים הקשורים ליכולות השכליות הגבוהות ביותר.

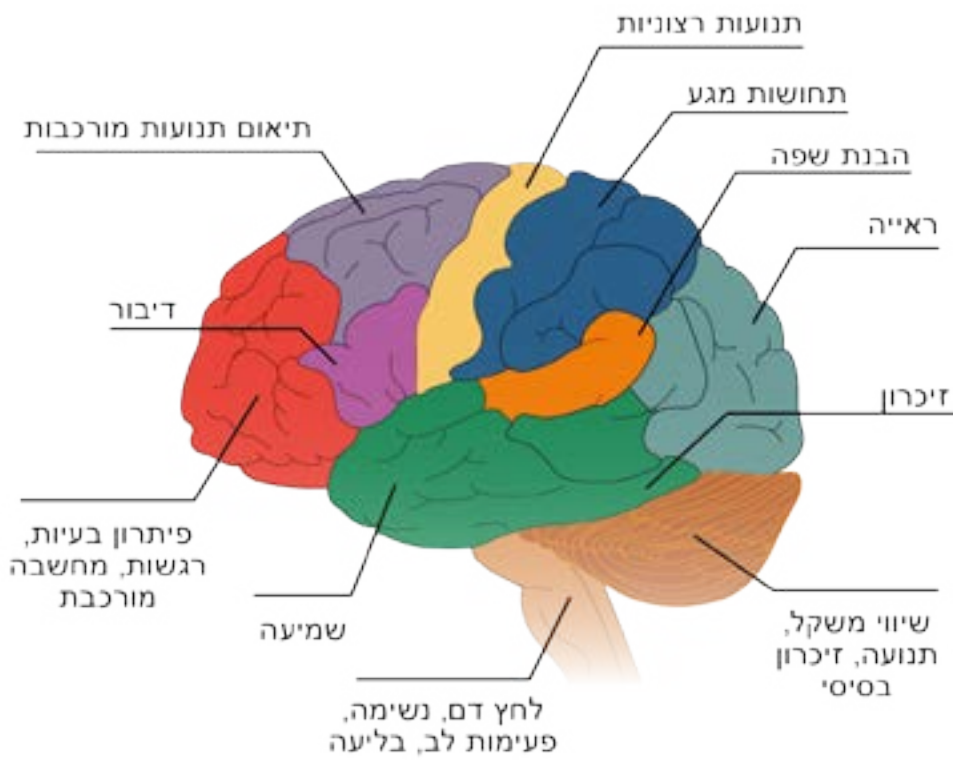
גישות נוספות להערכת האינטליגנציה מתמקדות בגודלם של אזורים ספציפיים במוח, כמו קליפת המוח המפותחת מאוד בבני אדם, או ביחס בין גודלו של המוח בעת הלידה לבין גודלו בפרט הבוגר. יחס זה אמור להעיד על שיעור הלמידה של בעל החיים במהלך התפתחותו.

מוח של ציפור? זאת מחממה

"מוח של ציפור" היה מאז ומעולם ביטוי לגלגני. התפיסה המקובלת גורסת שלציפורים יש מוח פשוט. אבל תפיסה זו הולכת ומתערערת בעקבות מחקרים על התנהגותם של עורבים, תוכים וציפורים אחרות, שלכאורה מפגינים אינטליגנציה לא פחותה מזו של שימפנזים.

אזורי תפקוד במוח מרכזי בקרה של תפקודים במוח

כמו שראינו, לחלקי המוח השונים יש תפקודים שונים. לכל אזור יש התמחות ייחודית בעיבוד המידע המגיע אליו ובתגובה על מידע זה. חוקרי מוח הצליחו למפות במוח מאות אזורים שתפקידיהם ידועים. אפשר להצביע בדיוקנות על אזורים האחראים לתנועות רצוניות, לתחושות גופניות, לשמיעה, לראייה, לריח, לטעם, וכן לעיבוד ופירוש של מידע הנקלט במוח.



איור 5: אזורי בקרה במוח

איברי חוש ותאי חישה בגוף קולטים גירויים מהסביבה החיצונית ומהסביבה הפנימית. הגירויים מתורגמים לדחפים עצביים, ואלה מגיעים באמצעות מערכת העצבים ההיקפית לאזורים מיוחדים במוח. כך גירויים שמקורם בעיניים מגיעים למרכז ראייה, הנמצא במקום מסוים במוח, וגירויים שמקורם באוזן מגיעים למרכז השמיעה, הנמצא במקום אחר במוח. אזורים אלה מעבדים את המידע, מפענחים אותו - ונותנים הוראות הגורמות לשרירים או לבלוטות לבצע פעולות שונות בתגובה למידע שנקלט. כל המרכזים הללו הם ריכוזי ענק של תאי עצב

מקשרים. תאי העצב המקשרים הם האחראים להפיכת הדחפים העצביים לתחושות, למחשבות, או לרגשות. האזורים במוח השולטים בתחושות גופניות, בראייה, בשמיעה ובריח מבצעים ניתוח פשוט של המידע הנכנס. הם מזיהים תחושות כמו מגע עדין או קור, גירויי ראייה פשוטים כמו צבע, ותכונות יסודיות של צלילים כמו עוצמה וגובה. יכולתנו להכניס סדר במידע הזה נובעת מעיבוד נוסף שנעשה באזורים שונים בקליפת המוח. הפעולות של זיהוי אדם מוכר ברחוב וקריאת ברכה לעברו נתפסות כפשוטות ומידיות. אבל כדי להוציאן לפועל, יש תיאום בין מרכזים רבים במוח:

1. הדמות נקלטת על ידי תאי תחושה ברשתית העין, המגיבים לצבע ולבהירות.
2. הדחפים החזותיים שנקלטו ברשתית העין מועברים לאזור הראייה בקליפת המוח המבחין רק במרכיבים בסיסיים של גירויים חזותיים, כמו קווי מתאר חיצוניים, ניגודים בין אור וצל ותנועה.
3. המידע עובר לאזור סמוך בקליפת המוח הראייתית שמקשר בין פיסות מידע נפרדות ומפיק מהן דמות שלמה. האדם מזהה תחילה את הדמות הנצפית כגוף של אדם, ובהמשך הוא מזהה את האדם עצמו.
4. המידע עובר לאזור סמוך המפענח את משמעותו של גירוי הראייה.
5. אזור אחר ממיר מידע חזותי לשפה, ומקשר שם מתאים לפניו של אדם שהוא רואה.
6. אזור קדמי ליד העין מעלה רגשות מן הזיכרון, כמו למשל, אם האדם שאנו רואים חביב עלינו.
7. אזור קדמי במוח מסדר את המחשבות ברצף ועוזר להחליט כיצד לנהוג; האם לברך את האדם או להתעלם ממנו.
8. אם מחליטים לברך, אזור נוסף מעצב את המחשבות הבאות לידי ביטוי מילולי.
9. אזור אחר אחראי לתכנון המילים שנשמיע בקול, והוא גם מתאם את התנועות המיוחדות שיש לבצע כדי להגות את המילים.
10. אזורים ששולטים בתנועת השפתיים, הלשון והלוע מפעילים את שרירי הדיבור.
11. סיבי עצבים תנועתיים מעבירים פקודות לאיברים ולשרירים המאפשרים לדבר ולומר שלום.

איך מגלים תפקוד של אזור במוח?

העדויות הראשונות לתפקודים של האזורים השונים במוח התקבלו מבדיקות שנעשו בבני אדם שמוחם נפגע ממחלה או מחבלה. על פי מהות הפגיעה פענחו החוקרים את האזורים במוח האחראים על החשיבה, הזיכרון, הראייה ועל תפקודים רבים אחרים. כאשר יכולת תפקודית מסוימת נפגעת בגלל פגיעה במוח, אפשר להסיק שהאזור הפגוע אחראי על התפקוד הזה.

הדוגמה הבולטת לפענוח כזה היא התאונה שקרתה לפיניאס גייג'. סיפור חייו של גייג' הפך לציון דרך חשוב בקישור שבין תפקוד אזור מסוים במוח לבין יכולות אנושיות מורכבות כמו קבלת החלטות, חשיבה ושיקול דעת. גייג' עבד כמנהל עבודה בהנחת מסילות רכבת במדינת ורמונט שבארצות הברית. בשנת 1848, במהלך אחד הפיצוצים שנדרשו לצורך סלילת המסילה, קרתה תאונה. חומר הנפץ התפוצץ והעיף לעבר גייג' מוט שחדר דרך ארובת העין שלו ופגע בו בקדמת המוח. למרבה המזל, גייג' החלים מהפגיעה הקשה, אך אישיותו השתנתה בעקבות התאונה. מאדם אחראי ושיקול הוא הפך לרגזן, עצלן, חסר אחריות וחסר שיקול דעת, ובסופו של דבר פוטר מעבודתו. הטרגדיה של גייג' שימשה הוכחה לקשר שבין התפקוד התקין של קדמת המוח לבין תכונות אישיות כמו קבלת החלטות ושיקול דעת.

דוגמה בולטת נוספת לקישור בין קליפת המוח ליכולות אנושיות גבוהות מצא הניורולוג הצרפתי פייר פול ברוקה (1824-1880). ברוקה בדק אנשים שאיבדו את יכולת הדיבור וגילה שכולם נפגעו באותו אזור בהמיספרה שמאלית, שקרוי כיום על שמו: אזור ברוקה.

במחצית הראשונה של המאה העשרים פיתחו חוקרי מוח טכניקות לזיהוי תהליכים המתרחשים במוח, באמצעות מדידה של זרימת הדם וחילוף החומרים במוח. אבל מגבלה חשובה אחת גרעה מעילותה של חדירה כזאת אל תוך המוח: היא הייתה פולשנית, מסוכנת ולעתים קטלנית. הנבדק שעבר בדיקות כאלה עלול היה ללקות בשבץ,

להתעורר ואפילו למות. למזלנו, הבעיה לא קיימת היום, הודות לבטיחותן של טכניקות לא פולשניות שהסיכון בהן מועט. כיום, באמצעות הטכנולוגיה המתקדמת של מכשירי הדמיה כמו ה-fMRI או פליטת פוזיטרונים (PET), אנו יכולים לחקור את המוח החי והבריא בפעולה. הסורק הממוחשב ממפה את פעילות המוח בזמן שהנבדק חושב, מתבונן, מקשיב, מדבר או כותב. על שיטות אלה תוכלו לקרוא בעמ' 17.

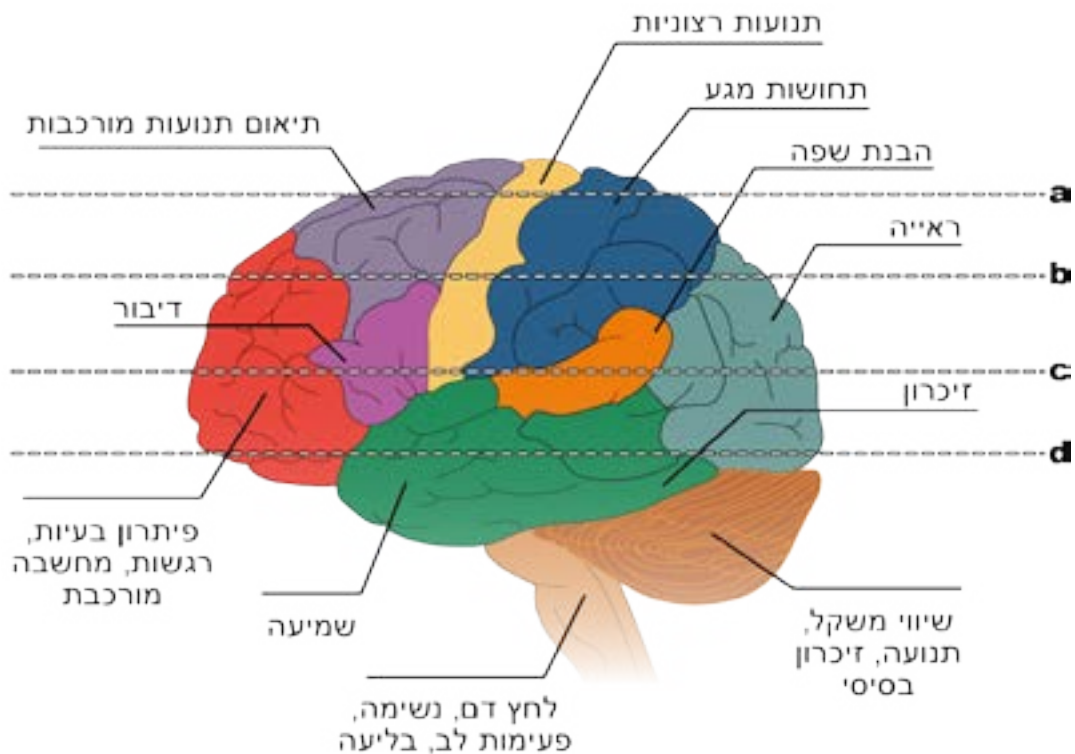


זיהוי אזורי תפקוד פעילים במוח

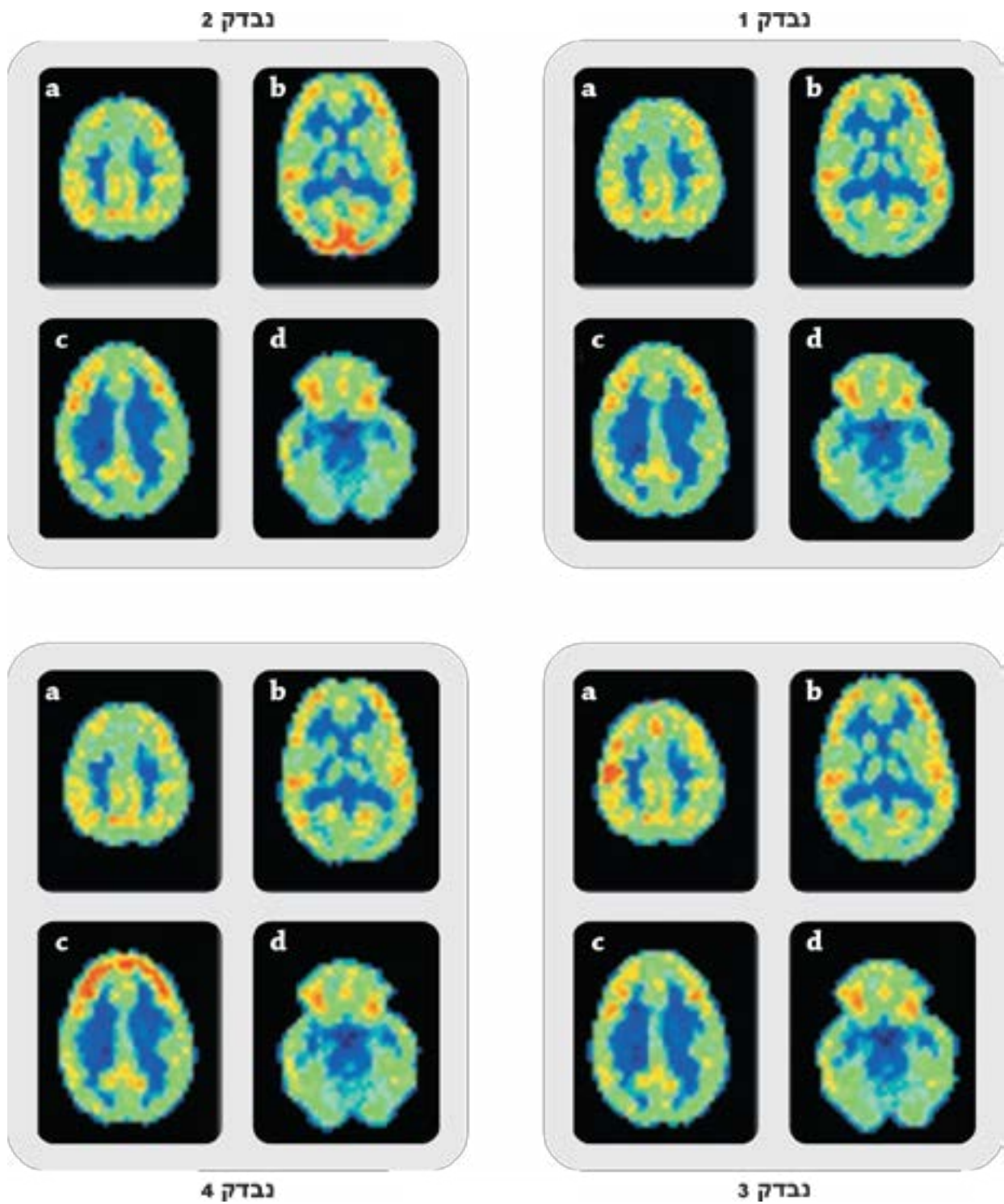


בפעילות זו תלמדו לזהות אזורי תפקוד פעילים במוח במהלך פעילויות שונות, בעזרת פענוח תמונות הדמיה של המוח. ההדמיה נעשתה בשיטת טומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים (PET). בהדמיה זו השתמשו בגלוקוז רדיואקטיבי שניתן לנבדק כדי לזהות אזורים פעילים במוחו. אזורים פעילים במוח צורכים אנרגיה רבה יותר בהשוואה לאזורים פחות פעילים ולכן צורכים יותר גלוקוז מסומן רדיואקטיבי. הריכוזים השונים של הגלוקוז המסומן ברקמות המוח מעובדים לצבעים שונים בעזרת מחשב. האזורים הפעילים ביותר נראים בצבע אדום. אזורים צהובים הם פחות פעילים מהאזורים האדומים, אולם פעילים יותר מהאזורים הירוקים. האזורים הפעילים במידה הפחותה ביותר נראים בצבע כחול. עוד על השיטה תוכלו לקרוא בעמ' 17.

נבדקה פעילות המוח של ארבעה אנשים. נבדק מס' 1 התבקש לא לעשות פעילות כלשהי ולשהות במנוחה. כל אחד מהנבדקים האחרים התבקש לעשות פעילות כלשהי. במהלך פעילותו של כל נבדק נעשו הדמיות שנלקחו בארבעה חתכים שונים של המוח (a, b, c, d). לכל נבדק צולמו ארבע תמונות הדמיה (איור 7); בחלק העליון של כל תמונה נראה הצד הקדמי של המוח, ובחלקה התחתון - צדו העורפי.



איור 6: ארבעה חתכי ההדמיות במוח של הנבדקים



איור 7: הדמיות PET של ארבעה נבדקים

<http://science.education.nih.gov/supplements/nih2/addiction/guide/pdfs/master1.1.pdf>

שאלות

התבוננו בתמונות ההדמיה של מוח הנבדקים באיור 7 וענו על השאלות האלה:

1. מדוע לא הסתפקו המדענים בהדמיה אחת ועשו ארבע הדמיות לכל נבדק?
2. השוו את תמונות ההדמיה של כל אחד מהנבדקים 2, 3 ו-4 לתמונות ההדמיה של נבדק 1 (שהיה במנוחה) וכתבו באיזו הדמיה (a, b, c, d) חל השינוי הבולט ביותר בכל נבדק.

3. תארו את השינוי בצבעי ההדמיה שמצביע על השינוי הבולט והסבירו מדוע הצבע השתנה.
4. כל אחד מהנבדקים התבקש לבצע אחת מהפעולות האלה:
- לקפוץ על רגל ימין כמה פעמים;
 - להתבונן בתמונה;
 - לפתור בעיה בחשבון.
- היעזרו באיור 6 ורשמו איזו פעולה ביצע כל אחד מן הנבדקים (2, 3, 4-ו). הסבירו כיצד אפשר לפענח זאת מההדמיות.
5. תארו כיצד הייתה משתנה ההדמיה של הנבדק שקפץ על רגלו הימנית אילו קפץ על רגלו השמאלית? וכיצד הייתה משתנה ההדמיה אילו קפץ בו זמנית על שתי רגליו? הסבירו את תשובתכם.
6. אם אחד מהנבדקים היה מתבקש להקשיב למוזיקה, באיזו הדמיה (a, b, c, d) היה חל אצלו השינוי הבולט ביותר? הסבירו את תשובתכם.
7. לפי הדמיה של נבדק 1, האם המוח פעיל בשעת מנוחה? הסבירו את תשובתכם.



כיצד המוח האנושי פועל?

האנימציה (באנגלית) ממחישה את התפקודים השונים של המוח. באיור השמאלי אפשר להפעיל את האזורים הנמצאים בקליפת המוח הפעילים בתפקודים השונים, ובאיור הימני את האזורים הפעילים הנמצאים מתחת לקליפת המוח. הפעלת התפקודים השונים מלווה בהסברים על מרכזי התפקוד.

הצצה אל תוך המוח (הרחבה)

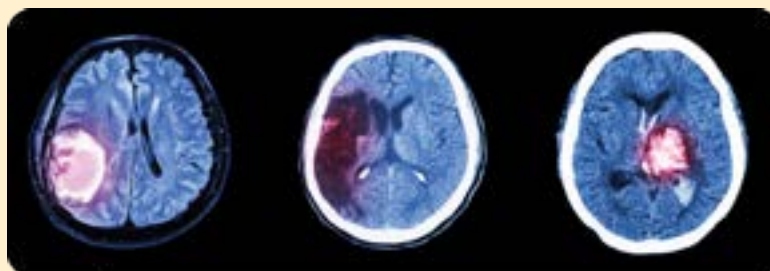
דימות המוח

עד לאחרונה, על מנת לחקור את המוח, נטלו חוקרים מוח מאדם לאחר מותו, פרסו אותו לפרוסות, צבעו את הפרוסות וצילמו אותן. רק באופן זה הם הצליחו לאסוף מידע על מבנה המוח ועל שינויים שהתרחשו בו עקב מחלות או פגיעות. לשיטה זו הרבה מגבלות, כולל חוסר היכולת לחקור את המוח כאשר הוא פעיל. היום, ההתפתחות הטכנולוגית מאפשרת למדענים להשתמש בשיטות דימות על מנת ללמוד על המבנה של המוח ועל תפקודו בזמן פעילות. דימות (imaging) הוא תהליך יצירת דמות או צורה של עצם. דימות רפואי הוא בדיקה לא פולשנית שבה מתוארים גרפית חלקים פנימיים של גוף הנבדק. טכנולוגיה זו משמשת לאבחון רפואי, למחקר ולסיוע בעת פעילות פולשנית. הדימות יכול להיות מבני או תפקודי.

טומוגרפיה ממוחשבת (CT)

רופא שרוצה לבדוק אם אדם לקה בשבץ או אם יש לו גידול במוח, שולח אדם זה לבדיקות של דימות מבני של המוח - לטומוגרפיה ממוחשבת (CT) או לדימות בתהודה מגנטית (MRI). בשיטות אלה אפשר לזהות גידול ושבץ בשל השינויים שאלה גורמים לרקמות המוח.

שיטת הטומוגרפיה הממוחשבת (CT - Computerized Tomography) עושה שימוש בקרני רנטגן בשילוב עיבוד ממוחשב, על מנת להפיק תמונה תלת-ממדית של איברים בגוף. בדיקת CT של המוח מבוססת על סדרה ארוכה של צילומי רנטגן הנעשים בזוויות שונות ועל הדמיה ממוחשבת של פנים המוח. בניגוד לצילום הרנטגן, המבליט רקמות צפופות (כגון עצמות), התמונה המתקבלת מסורקת CT מספקת הדמיה מפורטת גם של רקמות רכות. ניתוח ממוחשב של לוח הצילום מאפשר לבודק לבנות תמונת הדמיה של חתכי רוחב דרך המוח, מעין פרוסות של המוח. פרוסות אלה מראות קטעים של עצמות הגולגולת וכן את החומר האפור והחומר הלבן של המוח, את כלי הדם, את הנוזל המוח-שדרתי וכן פגמים נוירולוגיים רבים.



גידול
במוח

שבץ
מוחי

דימום
מוחי

איור 8: תמונות CT של נזקים במוח

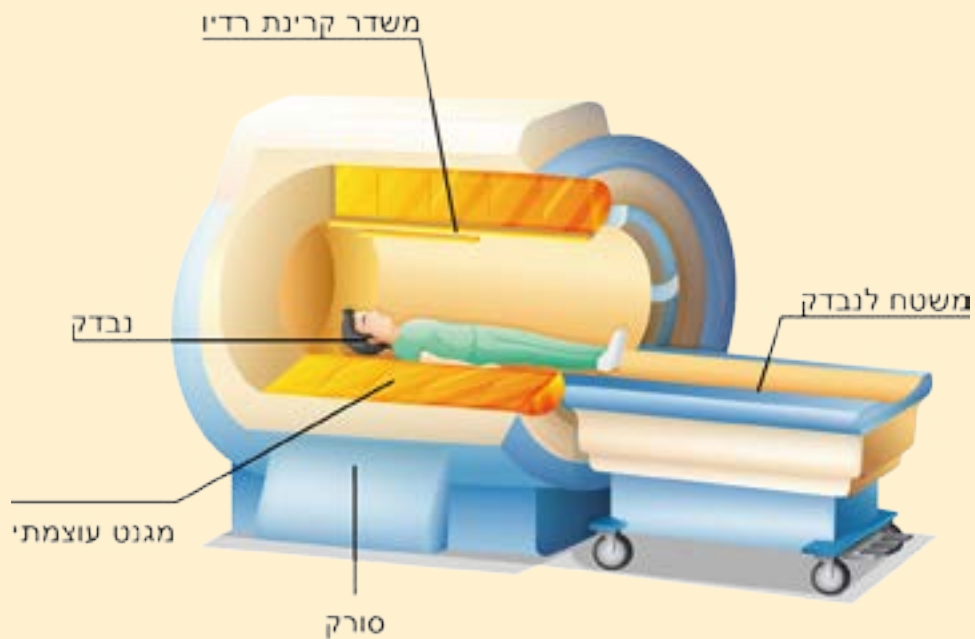


[מכון "דימות" בית חולים שיבא](#)

הדגמה של מכשיר ה-CT והסבר על בדיקות CT ראש.

דימות בתהודה מגנטית (MRI)

בדימות בתהודה מגנטית (MRI - Magnetic Resonance Imaging) מתקבלות תמונות באיכות גבוהה של איברים פנימיים ומבנים בגוף, ללא שימוש בקרני רנטגן או בקרינה מסוג אחר. לצורך יצירת ההדמיה מכניסים את הנבדק לתוך מגנט עוצמתי בעל יכולת מגנטית הגבוהה פי 30 מהשדה המגנטי של כדור הארץ (איור 9). באמצעות קרינת רדיו, מכשיר ה-MRI מייצר שוני בתנועת הפרוטונים המצויים באטומי המימן בגופנו. פרוטונים הנתונים בשדה מגנטי חזק ומושפעים מגלי רדיו פולטים בתגובה גלי רדיו בעלי תדר ייחודי. מכשיר הסריקה מאתר את גלי הרדיו האלה, והמחשב מתרגם אותם לתמונות של המוח, שהן מפורטות יותר מאלה המתקבלות בשיטת CT. המחשב עושה זאת באמצעות חישוב השינויים בתנועת הפרוטונים.



איור 9: מכשיר MRI

סורק MRI יכול לייצר תמונות חדות מכל סוגי הרקמות כמעט. רקמה עם פחות אטומי מימן כמו העצם תופיע כהה בעוד שרקמה עם הרבה אטומי מימן כמו שומן תופיע בהירה. באמצעות MRI אפשר לזהות פגיעות מוחיות כמו גידולים סרטניים או מחלות כגון טרשת נפוצה.



איור 10: תמונות MRI של המוח



[איך ה-MRI פועל?](#)

הסבר על שיטת ההדמיה בטכניקת MRI תמצאו בשני סרטונים בקישור הזה. הסרטון הראשון מסביר את עקרונות הפעולה של שיטת ההדמיה והסרטון השני מדגים איך הבדיקה נעשית בפועל.

דימות תפקודי

כאשר רוצים לבדוק את המוח בזמן פעולה, משתמשים בטכניקות של דימות תפקודי (PET או fMRI). שיטות הדימות התפקודי מבוססות על ניטור השינויים החשמליים והכימיים המתרחשים במוח במהלך פעילות, שהדימות המבני לא יכול לזהות.

התצפיות של החוקר האיטלקי אנג'לו מוסי, שחי בסוף המאה התשע-עשרה, היו הראשונות שבדקו תהליכים במוח תוך כדי התרחשותם. במהלך המחקר שלו נתקל מוסי בברטינו, איכר ששנים אחדות לפני כן סבל מפגיעה קשה בראשו, עד שעצמות הגולגולת שכיסו את אונות מצחו נהרסו. דרך הפתח שנוצר, שהיה מכוסה בעור וברקמה סיבית בלבד, הצליח מוסי לצפות ישירות בפעילות במוחו של ברטינו. יום אחד הבחין מוסי שעוצמת הפעילות התגברה שעה שנשמעו צלצוליו של פעמון הכנסייה המקומית המכריז על שעת צהריים. ברגע של השראה שיער מוסי שהצלצולים מזכירים לברטינו את חובתו לדקלם חרש את התפילה. התופעה סיקרנה את מוסי, והוא ביקש מברטינו להכפיל 8 ב-10. הפעילות גברו כשברטינו השיב לשאלה. מניסוי פשוט זה הסיק מוסי כי זרימת דם במוח מאפשרת מדידה עקיפה של תפקוד המוח בעת פעילות מנטלית. על בסיס תגליותיו של מוסי התפתחו שיטות טכנולוגיות שונות המאפשרות מעקב אחר תהליכים המתרחשים במוח.

דימות תפקודי בתהודה מגנטית (fMRI)

דימות תפקודי בתהודה מגנטית (Functional Magnetic Resonance Imaging) מתאר את מה שהמוח עושה במשך זמן מסוים, משניות ועד דקות. הטכניקה מבוססת על העיקרון שלפיו פעילות המוח גורמת לשינויים בזרימת הדם, להתפרקות חשמליות ולהיווצרות שדות מגנטיים.

שיטת fMRI מבוססת על שוני באות המגנטי המתקבל מהמוגלובין הנושא חמצן בהשוואה להמוגלובין נטול חמצן. כאשר אזור מוחי כלשהו פעיל, צריכת החמצן שלו גוברת, ולכן כלי הדם מתרחבים ומספקים לו כמות מוגברת של המוגלובין עשיר בחמצן. מכשיר רב עוצמה, היוצר שדה מגנטי סביב המוח, קולט את השינוי המקומי בהרכב ההמוגלובין באזור המוח הפעיל, ומספק מידע על משך הפעילות המוחית ומיקומה. מכיוון שמולקולת ההמוגלובין בתאי הדם האדומים מכילה ברזל אפשר לזהותה בתוך השדה המגנטי. בדיקת fMRI של המוח בעת הקלדה על המחשב, למשל, מראה פעילות מוגברת באזורי המוח הקשורים לחשיבה (בעיקר האזורים הקדמיים), ובאזורים הקשורים לראייה ולתנועת האצבעות על מקלדת המחשב. שיטה זו נחשבת לאחת השיטות הטובות כיום למעקב אחר פעילות מוחית ומיפוייה.

טומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים (PET)

טומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים (Positron Emission Tomography) היא טכניקה נוספת לדימות תפקודי. בטכניקה זאת מחדירים לגוף חומרים רדיואקטיביים, כמו גלוקוז או חמצן הנקלטים על ידי רקמת המוח. אזורים פעילים במוח צורכים אנרגיה רבה יותר בהשוואה לאזורים פחות פעילים ולכן צורכים יותר גלוקוז או חמצן מסומנים רדיואקטיבית. מכיוון שאטום רדיואקטיבי אינו יציב הוא מתפרק תוך כדי פליטת פוזיטרונים. הסורק הממוחשב קולט את הקרינה הנפלטת מהרקמה, וזאת בעזרת חיישנים המקיפים את הנבדק. מזווית הפליטה אפשר לדעת היכן היה החומר הרדיואקטיבי. בשיטה זו אפשר לדעת מה הייתה צריכת החמצן או הגלוקוז של המוח באזורים שונים ומכאן לחשב את פעילות המוח באותו אזור. הריכוזים השונים של החומר המסומן ברקמות המוח מעובדים לצבעים שונים בעזרת המחשב. האזורים הפעילים ביותר נראים בצבע אדום. אזורים צהובים הם פחות פעילים מהאזורים האדומים אולם פעילים יותר מאלה הירוקים. האזורים הפעילים במידה הפחותה ביותר נראים בצבע כחול (ראו איור 7). שיטת PET משמשת למחקר בלבד, בעוד ששיטות הדימות בתהודה מגנטית משמשות למחקר ולאבחונים רפואיים.

אופטוגנטיקה

הכלים המדעיים הקיימים לחקר המוח כוללים חומרים כימיים, שימוש במניפולציות גנטיות, ושימוש באלקטרודות, שהשפעתם אינה ייחודית. חומרים כימיים ומניפולציות גנטיות משפיעים על כל המוח, ואילו אלקטרודות מעוררות את כל תאי העצב הסמוכים אליהם, ללא אבחנה בין סוגי תאי עצב. מגבלות אלו היוו בעיה מהותית בעבור חוקרי המוח. החלום של כל חוקר מוח הוא האפשרות לעורר או להשתיק תא עצב בודד ולבדוק את מסלול ההולכה העצבית וההשפעה על האורגניזם. הפתרון לכך נמצא בפיתוח טכנולוגיה שנקראת אופטוגנטיקה.

אופטוגנטיקה היא שיטה להפעלת תאי עצב באמצעות אור ובאמצעות מניפולציות גנטיות. פיתוח טכניקת האופטוגנטיקה ממחיש את החשיבות הטמונה בשילוב פיתוחים בתחומים שונים במדע לקבלת רעיונות יצירתיים. בתחילת שנות התשעים גילו חוקרים גרמניים שהאצה החד-תאית קלמידומונס מתחילה לזוז בתגובה להארת אור כחול, מנגנון שמאפשר לה לנוע לאזור האור ולבצע פוטוסינתזה. לאורך השנים הראו שפעולה זו נובעת מחלבון ממשפחת האופסינים. קליטה של פוטון באורך גל מסוים משנה את מבנה החלבון. החלבון משמש תעלת יונים בממברנה ושינוי המבנה גורם לפתיחת התעלה ומעבר של יוני נתרן אל תוך התא. החוקרים החדירו את הגן של החלבון לתאי עצב, בשיטות של הנדסה גנטית. כשחשפו את המערכת העצבית לאור כחול, הם גרמו להפעלת תאי העצב שבהם הגן התבטא. כך, בעזרת סיבים אופטיים ומניפולציות גנטיות, אפשר להפעיל תאי עצב בודדים באזורים ספציפיים שרוצים לחקור. התחום הוסיף להתפתח בעזרת גילוי תעלות מעכבות המגיבות לאור צהוב, שבעזרתן אפשר להשתיק את פעולת תא העצב. בעכברים כבר הצליחו חוקרים לשחזר זיכרונות וחוויות עבר, ובעתיד התחום עשוי לסלול את הדרך להבנת מחלות כמו הפרעת קשב, פרקינסון ואוטזם ולהציע טיפולים מתקדמים לאפילפסיה.

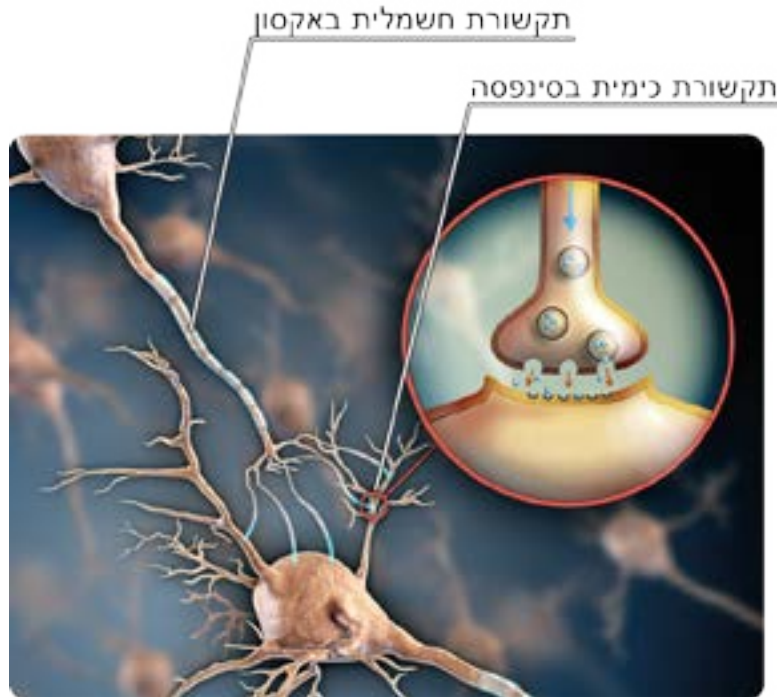


1. [המחקר ששופך אור על המוח](#)
הכירו את האופטוגנטיקה, אחד מתחומי המחקר החמים ביותר היום, העוסק בגירוי תאי מוח באמצעות אור.
2. [סרטון](#) מצוין מבית היוצר של Nature. הסרטון (באנגלית) מסביר באופן מוחשי ומובן את טכניקת האופטוגנטיקה בהפעלת תאי עצב ובהשתקתם.
3. [ויהי אור](#)
התפתחויות מרתקות בתחומי מחקר שונים ורחוקים הבשילו בתחילת המאה העשרים ואחת לכלל סינתזה המאפשרת שליטה בפעילות המוח באמצעות אור. תיאור המהלך ההיסטורי ששיאו בהפעלת תאי מוח של בעלי חיים באמצעות קרני אור, והאפשרויות (הכמעט בדיוניות) הגלומות במחקרים אלו.
4. [מאירים/מעירים את המוח](#) - שליטה בהתנהגות בעלי חיים באמצעות אופטוגנטיקה.
5. [אופטוגנטיקה](#): השתלת רכיבי מוח בבני אדם.

העברת המידע ועיבודו

תקשורת חשמלית ותקשורת כימית במערכת העצבים

תאי עצב תחושתיים הקולטים גירוי כלשהו מעבירים את המידע למרכזי הבקרה במוח שחל בהם עיבוד המידע. כאשר אנחנו מזהים אזורי בקרה פעילים במוח, המשמעות היא שבעת הזיהוי, מידע עובר בתאי העצב באזורים אלה ומעובד בהם. המידע עובר במערכת העצבים באמצעות תקשורת חשמלית ותקשורת כימית. לכל פעולה ממגוון הפעולות, התחושות והמחשבות שלנו יש ייצוג חשמלי-כימי באזור מסוים במוחנו, וברשת עצבים מסוימת באזור זה.



איור 11: מעבר הדחף העצבי בתקשורת חשמלית ובתקשורת כימית

כל תא עצב הוא מעבד חשמלי זעיר, אשר קולט גירויים מהסינפסות הקשורות אליו. בעקבות קליטת הגירוי, תא העצב מייצר דחף עצבי בדמות סדרה של אותות חשמליים קצרים המופיעים בזה אחר זה. הדחף העצבי הוא למעשה אזור של מטען חשמלי המתקדם לאורך האקסון.

המידע בין תאי העצב עובר בתקשורת כימית. כאשר אות חשמלי מגיע לקצה האקסון של תא העצב (תא עצב מעביר), משתחררים חומרים הנקראים נוירוטранסמיטרים. הנוירוטранסמיטרים עוברים את הסינפסה ומתחברים לחלבונים מיוחדים - קולטנים - על גבי תא העצב הסמוך (תא עצב קולט). שינוי זה גורם לתא העצב הקולט ליצור בעצמו אות חשמלי ולהעבירו הלאה לתאים אחרים. ההשפעה של הנוירוטранסמיטרים מתרחשת במשך זמן קצר בלבד, שלאחריו הם מורחקים מהמרווח הסינפטי. לנוירוטранסמיטרים שונים יש מנגנוני סילוק שונים. חלקם נהרסים על ידי אנזימים ואחרים עוברים ספיגה חוזרת בידי חלבונים נשאים המחזירים אותם לתוך תא העצב מעביר הגירוי. הספיגה החוזרת מאפשרת להפסיק את האות במהירות הנדרשת וכן למחזר את המולקולות של הנוירוטранסמיטר.

באמצעות האותות החשמליים והכימיים מועבר אפוא המידע לאורך מסלולים של תאי עצב המחוברים ביניהם. המידע עובר במערכת העצבים מתאים הקולטים גירוי אל מרכזים במוח, וממרכזים אלה לחלקים מרוחקים של הגוף, שם התגובה לגירוי יוצאת לפועל.

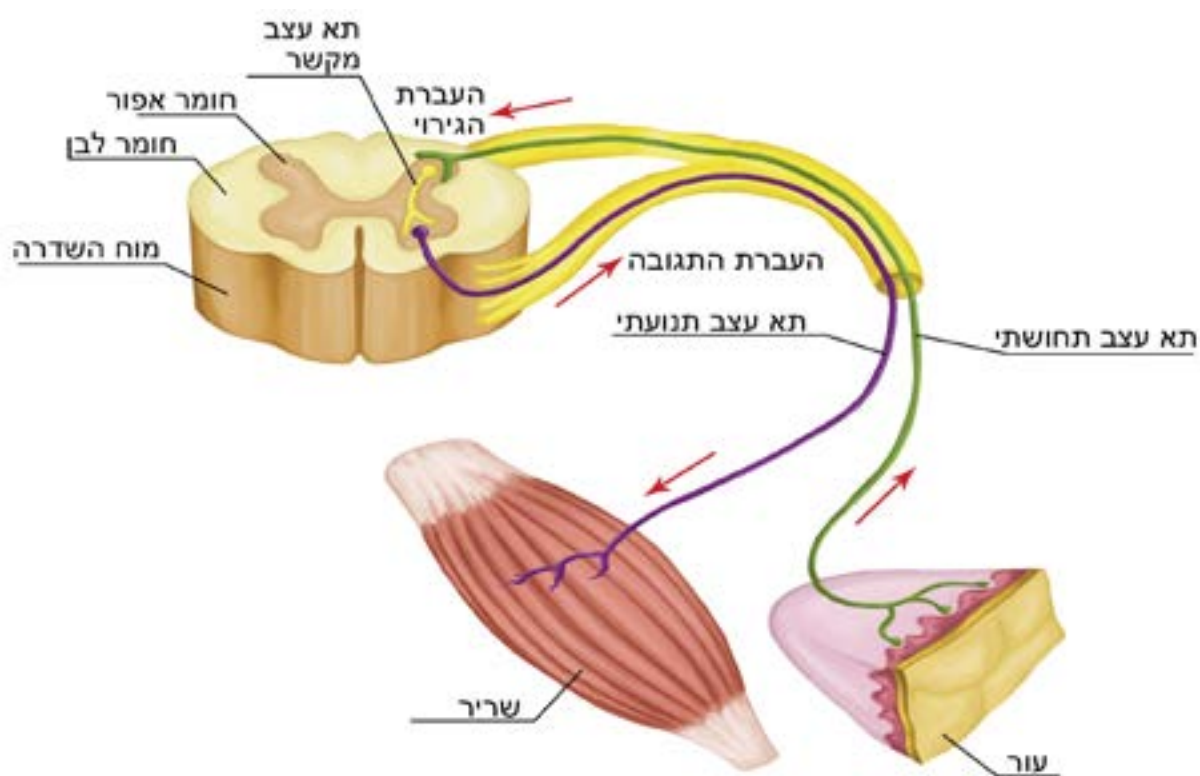
על מבנה תאי העצב ועל העברת המידע בהם תוכלו לקרוא בספר הלימוד "[ביולוגיה של האדם](#)" בעמודים 131-135.

עיבוד המידע במוח ובמוח השדרה

המידע המגיע למוח מתאי החישה מתורגם לתחושה שאופייה נקבע על פי האזור במוח שאליו הוא הגיע. לדוגמה: מידע על גירוי אור מגיע אל מרכז הראייה ומתורגם לתמונה. בתגובות רצוניות, המידע המתורגם עובר עיבוד נוסף במוח, המבוסס על מידע המאוחסן בזיכרון. בעקבות תהליכי עיבוד המידע מתרחשת אינטגרציה של המידע, מתקבלת החלטה ומופעלים תאי מטרה. תהליך זה אורך זמן רב, יחסית, בייחוד במקרים שבהם איברי החישה והשרירים מרוחקים פיזית מהמוח, למשל, באזור הרגליים, ויש להוליך את האותות העצביים לאורך מרחק גדול.

תגובת הרפלקס

רפלקס (החזר) הוא תגובה אוטומטית, מיידיית ולא רצונית של הגוף לגירוי חיצוני או פנימי. בניגוד לתגובה רצונית, ברפלקס העיבוד העצבי מתרחש במסלול מהיר מחוץ למוח. הקלט החושי עובר עיבוד בתוך מוח השדרה, והפקודה אל השרירים נשלחת היישר ממנו, ללא מעורבות המוח. בצורה זו מתאפשרת תגובה מהירה יותר, שכן אין צורך להוליך את האותות אל אזורי העיבוד הגבוהים במוח ובחזרה. כאשר הגירוי חזק וכואב, כמו בנגיעה בחפץ חם או חד, הגירוי מפעיל תא עצב תחושתית המוביל את הגירוי אל מוח השדרה, ודרך תא עצב מקשר - אל תא עצב תנועתי, אשר גורם להרחקת האיבר מהגירוי. במקביל המידע מגיע גם אל המוח, אך מסלול זה נמשך זמן רב יותר. מנגנון זה מאפשר להגיב לגירויים מסוימים במהירות המרבית, כך שהמידע מגיע למוח עצמו רק אחרי שהתגובה הרפלקסיבית כבר יצאה אל הפועל.



איור 12: העברת מידע דרך מוח השדרה בתגובת הרפלקס

התגובה הרפלקסיבית היא אוטומטית ומיידיית ואי אפשר לשלוט בה באופן רצוני. עם זאת, מעגלי הרפלקס אינם עצמאיים לחלוטין, ובמקרה הצורך המוח יכול לווסת חלק מתגובות הרפלקס ולדכאן. כלומר, אם נרצה, נוכל לגעת בכוונה בסיר לוחט, בלי להסיר ממנו את היד - למרות הכאב.

ברפלקס הפשוט ביותר מעורבת רק סינפסה אחת. כזה הוא למשל רפלקס פיקת הברך, שעושים בו שימוש לאבחון בעיות במוח השדרה. כדי לבדוק את רפלקס פיקת הברך הרופא מכה קלות על גיד הנמצא מתחת לברך, וזה גורם לנבדק להניע את הרגל בתנועת בעיטה בלתי רצונית. התהליך שגורם לרפלקס מתחיל במכה המובילה למתיחה של שריר הירך, ופעולה זו יוצרת אות עצבי בתא עצב תחושתית הנכנס למוח השדרה. במוח השדרה הסיב מתחבר בסינפסה אחת, ומשם האות עובר לתא עצב תנועתי, החוזר אל אותו שריר וגורם לו להתכווץ. ההתכווצות גורמת לתנועת הבעיטה.

העברת המידע ועיבודו במוח צורכים אנרגיה רבה

המוח אינו נח

באמצע שנות החמישים של המאה הקודמת חיבר ד"ר לואיס סוקולוב (Sokoloff) סטודנט קולג' צעיר למכשיר הבודק צריכת חמצן במוח. הרופא האמריקני נתן לנבדק לנוח ולאחר מכן ביקש שיפתור תרגילים מתמטיים מורכבים. סוקולוב ציפה לצריכת חמצן גבוהה יותר בזמן הפעילות המתמטית, והופתע מכך שלא נמצא הבדל של ממש בין פעילות המוח במנוחה ובין זו שבזמן מטלה מורכבת. בדיעבד אפשר לומר שהיה זה כנראה מחקר המנוחה הראשון במדעי המוח. כיום ממצאים רבים מעידים כי פעילות המוח גבוהה באופן תמידי גם אם אין לנו מטלה מסוימת לבצע, ושצריכת האנרגיה של המוח גבוהה באופן קבוע.

המוח הוא צרכן אנרגיה מרכזי בגוף האדם. אף שמשקלו מסתכם בממוצע בשני אחוזים בלבד ממשקל הגוף, הוא צורך כ-20% מהחמצן ו-25% מהאנרגיה שהגוף כולו מייצר. ללא אספקה מתמדת של חמצן, גלוקוז וחומרים מזינים אחרים שהמוח מקבל ממחזור הדם, מהר מאוד הוא מאבד את יכולת התפקוד שלו. ארבעה עורקים ראשיים מספקים דם למוח. העורקים מתפצלים לכלי דם קטנים יותר, עד לנימים המגיעים לכל התאים במוח. גלוקוז, חמצן וחומרים אחרים עוברים אל תאי המוח מתוך הדם הזורם בנימים.

מחסום דם-מוח

מעבר של חומרים רבים מהדם אל תוך המוח מפוקח על ידי מבנה מיוחד הנקרא מחסום דם-מוח. המחסום נועד להגן על המוח מפני כימיקלים רעילים העשויים להימצא בדם. פעולתו מבוססת על החדרה בררנית של חומרים מבעד לדופנות נימי הדם אל תוך המוח. מחסום דם-מוח אופייני רק לנימים במוח ואינו קיים בנימים אחרים בגוף. התאים המהווים אבני בניין של דופן הנימים אחוזים זה בזה בצמתים הדוקים, ומפחיתים משמעותית את יכולת המעבר של חומרים דרך הרווח שביניהם. נוסף על כך, מחקרים חדשים מצאו כי לתאים שונים במערכת העצבים (תאי גליה) הנמצאים סמוך לנימי הדם יש תפקידים מרכזיים בסינון החומרים היוצאים מהנימים. מולקולה חייבת להיות קטנה או מסיסה בשומן כדי לחדור דרך הנימים. מולקולות מסיסות במים אינן יכולות לעבור את מחסום הדם-מוח, אלא אם כן יש להן נשאים מיוחדים. מלבד חמצן ופחמן דו-חמצני רק מולקולות קטנות מאוד של חומרים מזינים כמו חומצות אמיניות, גלוקוז וכמה חומרים אחרים, עוברים אל המוח. עם החומרים האלה נמנים גם חומרים משני מצב רוח כמו קפאין, ניקוטין ואלכוהול.

אמנם מחסום הדם-מוח מגן על המוח מפני זיהומים, אבל הוא גם מכביד על הטיפול בזיהומים במוח. רוב החומרים האנטיביוטיים, ובכללם פניצילין, אינם יכולים לעבור דרך המחסום, והוא מונע גם מעבר של חומרים המשמשים לטיפול בגידולים סרטניים. אחת מהדרכים להתגבר על המחסום היא שינוי המבנה המולקולרי של תרופה באופן המאפשר את חדירתה למוח. מחלת פרקינסון, לדוגמה, נגרמת בשל מחסור בחומר דופאמין במוח. הדופאמין אינו יכול לעבור דרך המחסום דם-מוח, אולם התרופה לבדופה (levodopa) מסוגלת לחדור, ובהיותה במוח היא משתנה והופכת לדופאמין.

1. המוח: חכם באנרגיה

סרטון מבית היוצר של TED על המיתוס השגוי שבני האדם מנצלים רק עשרה אחוזים מהמוח שלהם. הסרטון מלווה בכתוביות בעברית.

2. מוח חסר מנוח

מוח האדם פעיל וצורך את רוב האנרגיה דווקא בזמן מנוחה ולא בזמן ביצוע מטלות קוגניטיביות. מה החשיבות הטמונה בפעילות המוחית הספונטנית והאם אפשר לפתח באמצעותה גלאי מוקדם למחלת האלצהיימר?

3. לפרוץ את הדרך אל המוח

על שינוי הגישה בהבנת מחסום דם-מוח, ועל שיטות חדשות להחדרת תרופות למוח.

המוח הוא עירום



הטכנולוגיות החדשות והמחקר המדעי חושפים את מסתרי מוחנו ואת הדרך שבה אנחנו חושבים, מרגישים, זוכרים ומתקשרים. עכשיו משתמשים בידע זה לא רק רופאים ומדענים, אלא גם בעלי עניין אחרים, היכולים להשפיע כמעט על כל היבט בחיינו. חקר המוח מעורר שאלות מוסריות ומשפטיות, וחשוב להימנע מסכנות הכרוכות בכך ולהפיק רק את מלוא התועלת והרווחה.

ד"ר ריצ'רד רסטאק הוא נוירולוג, נוירופסיכיאטר ופרופסור לנוירולוגיה קלינית במרכז הרפואי של אוניברסיטת ג'ורג' וושינגטון, ומחבר ספרי מדע פופולרי בתחום מדעי המוח. בספרו "המוח העירום" הוא מציג ומסביר מגמות חברתיות ותרבותיות חדשות, ותמורות כלכליות, צרכניות ופוליטיות בהשפעת חקר המוח. הוא מתייחס בין השאר לסוגיות האלה:

- בדיקות שמטרתן לגלות לאחרים אחדות מהמחשבות ומהנטיות שלנו, שהיינו מעדיפים להסתירן.
 - סריקות מוח שנועדו לבדוק את התאמתנו למשרות מסוימות.
 - בדיקות המתיימרות להסביר למה אנחנו נמשכים רומנטית לאנשים מסוימים, ונרתעים מאחרים.
 - מסעות פרסום המשתמשים בסריקות מוח כדי לנבא אילו מוצרים נקנה.
 - חומרים כימיים להגברת פעילותו של המוח, שנועדו להפוך אותנו לצרכנים שאינם יודעים שובעה, שרוכשים אפילו מוצרים ושירותים שאיננו זקוקים להם.
 - יצירת פרופילים של המוח שלנו, כדי לבדוק לאיזה מועמד פוליטי נצביע.
 - בדיקת דפוסי תגובה של המוח, המגלים את הרגשות שסרטים ותכניות טלוויזיה מעוררים בנו.
- במשפטים של נאשמים בפשעים אלימים, לדוגמה, מוצגים בדרך כלל תצלומים לא נורמליים של סריקות מוח כגורמים מקלים. הטיעון "משהו לא בסדר במוח שלו, וזה גרם לו לעשות זאת", מחליף את "משהו לא בסדר איתו" המסורתי. סריקות מוח מוצעות גם כאמצעי לאבחון הפרעות קריאה ולמידה, ל"הסבר" של מחלות נפש וגם לאיתור דרכים לטיפול בהן.

על יישומים תרבותיים וחברתיים המתבססים על חקר המוח תוכלו לקרוא בקישורים האלה:

1. הקסדה שתמדוד רייטינג ליצירות אמנות
פיתוח ישראלי המבוסס על קסדות שקוראות את גלי המוח מנסה למדוד תגובות של צופים ליצירות אמנות. אפשר יהיה לפתח מנוע המלצות לצופים ולתת סוג של רייטינג למוזיאונים.
2. נקראים לסדר: מדעי המוח בבית המשפט
סריקות מוח וראיות נוירולוגיות אחרות כמעט אינן משמשות כיום את בתי המשפט. בעתיד, ייתכן שיהיה בהן כדי לשנות את תפיסת השופטים לגבי מהימנות ואחריות אישית.
3. יש לאסור שימוש בהדמיות של המוח בבתי משפט עד שתוכח אמינותן

שינויים במוח במהלך החיים

שינויים במספר תאי העצב

תינוק נולד עם כמעט מלוא תאי העצב המוחיים שיהיו לו בימי חייו. במשך שנים הדעה הרווחת הייתה שמצב זה הוא אבסולוטי, וכי כל תאי העצב במוחו של אדם נמצאים שם מאז לידתו. בניגוד ליתר התאים בגוף, חשבו שתאי העצב במוח אינם עוברים חלוקה תאית, כי חלוקה של תאי העצב עלולה לשבש ללא תקנה את הקשרים שלהם עם תאים אחרים. בסוף המאה העשרים התגלה כי תפיסה זו אינה נכונה, וכי באזורים מסוימים במוח מתקיים תהליך שנוצרים בו תאי עצב חדשים מתוך תאי גזע. משמעות התהליך וחשיבותו טרם הובררו לחלוטין. לאורך הילדות, ההתבגרות וההזדקנות פוחת מספרם של תאי העצב בצורה ניכרת. באדם בוגר מתים כ-85,000 תאי עצב מדי יום. חסרון תאי עצב מורגש רק אם רבים מהם מתים. נוירולוגים מסבירים כיום את תופעת אובדן כושר החשיבה בעת זקנה כתוצאה ממספרם הרב של תאי עצב שמתו במשך הזמן.

שינויים בקשרים שבין תאי העצב - תהליכי למידה וזיכרון

השינויים העיקריים המתרחשים במוח במהלך החיים מתבטאים בקשרים הסינפטיים שבין תאי העצב. השינויים הגדולים ביותר מתרחשים בחודשי החיים הראשונים. בשעת הלידה גודל המוח הוא כ-25% מגודלו של מוח בוגר, ובגיל שנתיים גודלו מתקרב ל-80%. המוח עובר שינויים אשר מושפעים מהסביבה והחוויות של כל אדם. אצל תינוקות מספר הסינפסות קטן במידה ניכרת מאלה שבמוח המבוגר. הן מתרבות ככל שהתינוקות לומדים וזוכרים את סביבתם. הקישוריות בין תאי העצב, שעליה מתבססת כל פעולת המוח, היא דינמית מאוד. תהליכים של למידה גורמים לסינפסות ספציפיות במוח להתחזק או להיחלש. נוסף על כך, כל העת נוצרות סינפסות חדשות או נהרסות אחרות.



איור 13: קשרים סינפטיים בין תאי עצב (אילוסטרציה)

גם ברגע זה ממש, אם המידע המובא כאן נקלט במוח, הרי המוח משתנה וצובר את המידע החדש. כוחו המיוחד של המוח הוא ביכולתו להשתנות וללמוד כל הזמן ובכך להתאים את עצמו וכתוצאה מכך את ההתנהגות שלנו לסביבה המשתנה שבה אנו חיים. מספר תאי העצב במוחנו אינו משתנה במהלך למידה. השינוי במערכת העצבית הקשור ללמידה ולזיכרון הוא בעוצמת הקשר הסינפטי בין תאי העצב ובמספר הסינפסות.

מוח האדם לומד ומשתנה על פי הגירויים שהוא נחשף להם והמשימות שעמן הוא מתמודד. די למוח בגירויים, בחזרות, ובזמן - והוא משתנה. נוצרות בו רשתות תאי עצב ומסלולים אסוציאטיביים, מתרחשת בו למידה ומתקבע בו זיכרון. באופן "ספונטני" כזה מתעצב מוחו של תינוק כשהוא לומד להכיר את העולם החושי שמסביבו, מפענח מראות, צלילים, שפה, לומד לדבר, ללכת, לשיר ומייצר אסוציאציות. למידה זו של התינוק תלויה בגירויים שהוא נחשף להם, להתנסויות שהוא מתנסה בהן ולמידת האינטנסיביות שבה הוא חווה את הדברים.

ללמוד בשינה

למוח האדם יכולת למידה והשתנות גם בזמן מנוחה או שינה. ניסויים שנערכו בתהליכי למידה בתנאי מעבדה מדדו את יכולת הנבדקים לבצע משימות שונות לאחר אימון שנמשך כשעה. מדידה חוזרת של הביצועים נערכה לאחר שנת לילה, בלי שנערך אימון נוסף בין המדידות. התוצאות מראות שלאחר המנוחה ושנת הלילה השתפרה יכולת הנבדקים לבצע את המשימה, אף על פי שלא ערכו כל אימון נוסף. תוצאה זו, שחזרה ונמצאה במעבדות רבות ושונות בעולם, מעידה כי הלמידה במוח מוסיפה להתפתח ולהתארגן זמן רב לאחר תום האימון או השיעור. תופעה זו נקראת "למידה חבויה", והיא מאפשרת לאדם ללמוד נושאים שונים ומגוונים בזמן ערות, ולהשלים את עיבודם בזמן שינה.

אדם הלומד דבר חדש, כגון שפה זרה, ואחר כך שב ונזכר בו, מבצע תהליך הבנוי משלושה שלבים. השלב הראשון הוא שלב של קליטה ורישום; האדם מבחין בחומר הנלמד. בשלב השני הוא מאחסן את המידע החדש בזיכרון. שלב זה מכונה שלב הרכישה. על פי עדויות ממחקרים, המידע מאוחסן תחילה במאגר של זיכרון לטווח קצר, ומאוחר יותר עובר חלק ממנו למאגר זיכרון ארוך טווח. השלב האחרון הוא העלאה מהזיכרון של המידע שנרכש בעבר, בפעולה שנקראת אחזור. בשלב האחזור מביאים את המידע המאוחסן ברמה לא-מודעת אל רמת המודע. איכות הזכירה של פריט מידע תלויה במספר גדול של גורמים, ובכללם מידת תשומת הלב שהוקדשה לתהליך בעת התרחשותם של שני השלבים הראשונים.

קיימים כמה סוגים של זיכרון. סוג אחד של זיכרון מאפשר לזכור היכן השארנו את המפתחות; סוג אחר אחראי לצבירה של ניסיון וידע; וסוג שלישי עוזר לזכור כיצד רוכבים על אופניים או כיצד נוהגים במכונית. כל סוג של זיכרון כרוך בפעילות של אזורים שונים במוח.

1. זיכרון גורלי

כיצד מחלות מוח ניווניות משפיעות על הזיכרונות המאוחסנים במוח?

2. תהליכי זיכרון באיזון הנכון

מחקרים מגוונים על עקרונות הוויסות של מנגנוני למידה וזיכרון במוח עשויים לשמש בסיס לפיתוח תרופות עתידיות לחיזוק ושיפור הזיכרון ואף ייתנו מענה למחלות ניווניות כמו מחלת האלצהיימר.

3. סוג מסוים של למידה אפשרי תוך כדי שינה

הקשר בין ריחות לצלילים נלמד בזמן השינה. מתברר שכאשר ריחות מסוימים מוצגים אחרי צלילים בזמן שינה, אנשים מתחילים לחוש את הריח כשהם שומעים את הצלילים בלבד - אפילו בהיעדר הריח.

הפרעות בפעילות המוח

הפרעות נוירולוגיות במוח ובמערכת העצבים אחראיות למספר רב של מחלות ומקרי מוות והן רכיב נכבד בין גורמי הנכות באוכלוסייה. בעולם המערבי, מקרים של שבץ מוחי אחראים לעשירית מכלל מקרי המוות, והם גורם התמותה השלישי בשכיחותו, אחרי מחלות לב וסרטן. הפרעות נוירולוגיות רבות אחרות, כמו טרשת נפוצה, אפילפסיה (מחלת הנפילה), שיתוק מוחי ומחלת פרקינסון - מחייבות השקעת משאבים רבים של מערכת הבריאות, הן חומריים והם במונחי כוח אדם טיפולי. חבלות ראש הנגרמות בתאונות דרכים, בתאונות ספורט, או עקב תקיפה הן הסיבה העיקרית לפגיעות נוירולוגיות באנשים צעירים.

בגלל כושרה המוגבל של מערכת העצבים לתקן את עצמה, הפרעות רבות נחשבו עד לעת האחרונה חשוכות מרפא. כיום כמה מההפרעות מגיבות היטב לטיפול רפואי. טיפול תרופתי מסייע רבות לשיפור מצבם של הסובלים ממחלת פרקינסון, ממיגרנה ומאפילפסיה. רבים מהגידולים והמומים של המוח ושל מוח השדרה אפשר להסיר או לתקן.

הפרעה לפעילות נוירורנסמיטרים

הנוירורנסמיטרים מאפשרים העברת מידע בין תאי העצב באמצעות תהליך של העברה סינפטית (ראו עמ' 19). פגיעה בתפקודם גורמת לשיבוש בהעברת המידע. הפגיעה יכולה להיות בשינוי קצב ייצור הנוירורנסמיטר בתא העצב, בשינוי ההתקשרות שלו לקולטנים בתא העצב הקולט, או בשינוי קצב הפינוי שלו. הפרעות אלה מתבטאות בדרכים שונות.

הפרעת קשב, ריכוז והיפראקטיביות (ADHD)

הפרעת קשב, ריכוז והיפראקטיביות (ADHD) היא הפרעה ההתנהגותית השכיחה ביותר בקרב ילדים ומעריכים כי קיימת אצל 3-8 אחוזים מהאוכלוסייה. ברוב המקרים היא באה לידי ביטוי לראשונה בילדות, אך אינה חולפת עם ההתבגרות ומלווה את האדם לאורך כל חייו הבוגרים. סימניה העיקריים הם ליקויים ביכולת הקשב ובשמירה על הריכוז, אי שקט, היפראקטיביות ואימפולסיביות בתגובות.

ככל הנראה הפרעה נובעת משיבוש במסלולי פעולתם של נוירורנסמיטרים אחדים ובעיקר של הדופאמין (Dopamine). חוקרים מצאו אצל הסובלים מ-ADHD רמות נמוכות של שני חלבונים הקשורים במעבר הדופאמין

בסינפסות: (1) קולטנים לדופאמין, הקולטים את הדופאמין בתא קולט הגירוי; (2) נשאים לדופאמין, המחזירים אותו לאחסון בתא מעביר הגירוי. בהיעדר החלבונים משתבש התפקוד התקין של הדופאמין. רמות נמוכות של שני החלבונים נמצאו בכמה אזורים במוח, ובייחוד באונה המצחית, האזור האחראי בין היתר לוויסות. התוצאה היא בעיה בוויסות של תנועה (היפראקטיביות), בוויסות של תגובות (אימפולסיביות) ובוויסות הכרה (הפרעת קשב וריכוז).

התרופה הנפוצה ביותר כיום להפרעות קשב, ריכוז והיפראקטיביות היא ריטלין. כ-80% מהמרשמים הניתנים לסובלים מהפרעת קשב וריכוז הם של ריטלין. ריטלין חוסם את הנשאים החלבוניים של הדופאמין ומונע את ספיגתו החוזרת. כך עולה רמת הדופאמין בסינפסה ומתאפשרת תקשורת יעילה בין תאי העצב. במהלך השנים קמו לריטלין מתנגדים רבים, וכיום התרופה נמצאת במרכזו של ויכוח ציבורי סוער בין תומכיה הרבים לבין מתנגדיה הרבים לא פחות.

שימוש בסמים

סמים הם חומרים המוכנסים לגוף שלא לצורך הזנה או ריפוי, ומשפיעים על הגוף ועל הנפש. השפעתם על המוח משנה את התייחסות המשתמש אל המתרחש סביבו, בלא יכולת של שליטה בשינוי. סמים משפיעים על מערכת העצבים המרכזית על ידי שיבוש פעילותם של נוירורנסמיטרים. לפי ההשפעות של הסמים נעשית החלוקה לסוגים שונים:

סמים מעוררים (כמו: קוקאין, מתאמפטמין, אקסטזי, ניקוטין וקפאין) מגרים תאים במוח, מגבירים ערות וממריצים. סמים ממריצים חוסמים את קליטת הנוירורנסמיטר מחדש באקסון, או פוגעים בפעולת הפירוק של הנוירורנסמיטר על ידי האנזימים (ראו עמ' 19). הם מובילים לריכוז גבוה של נוירורנסמיטרים במרווח הסינפטי, ובכך לגירוי מתמשך בתא הקולט.

סמים מרגיעים מקהים תחושות, ממתנים את התגובות לגירויים ויוצרים תחושת רוגע ונוחות. אלו הם סמים המאטים מעבר של גירויים במרווח הסינפטי ומעכבים מעבר נוירורנסמיטרים. עם הסמים המרגיעים נמנים צמח הקנאביס (שממנו מופקים מריחואנה וחשיש), אלכוהול וואליום.

סמים משככי כאבים חוסמים מעבר דחפים שמקורם בתאי חישה מיוחדים הרגישים לכאב. עמם נמנים אופיום, הרואין, מורפין ומתאדון.

סמים גורמי הזיות (למשל LSD, אקסטזי ופטריות הזיה שונות) מגרים תאים במרכזי הראייה או השמיעה במוח וגורמים לאדם לראות מראות או לשמוע קולות, אף על פי שחושיו לא קלטו גירויים אלו מן הסביבה.

חלק מהסמים הם בלתי חוקיים. סמים אחרים, כמו אלכוהול וטבק, הם בעלי מקובלות חברתית רחבה יותר וחוקיים בארצות רבות, אם כי נעשים ניסיונות להגביל את שיווקם ואת שימושם לרעה עקב הסכנה הבריאותית הטמונה בהם. השימוש בקפה ובתה ושיווקם אינם מוגבלים חוקית, מפני שהסכנה בצריכה מוגזמת של קפאין היא רק במינונים שהנם הרבה מעבר למקובל באוכלוסייה. יש גם תרופות מרשם בעלות פוטנציאל של סם.

סמים ממריצים

הקוקאין הוא סם ממריץ רב עוצמה המופק מעלי צמח הקוקה, שגדל בעיקר בדרום אמריקה. קוקאין מגיע כאבקה לבנה שלרוב נצרכת בהסנפה. שימוש ממושך בו גורם לתלות ולהתמכרות, המובילות לנזקים גופניים ונפשיים בלתי הפיכים. הקוקאין מספק למשתמשים בו תחושה של שמחה עילאית ואופוריה, התעלות חושים, ערנות וריגוש. כמו כן, הוא מפחית תחושות של כאב. הקוקאין מעורר את מערכת העצבים המרכזית להגדיל באופן קיצוני את קצב פעימות הלב, לחץ הדם וטמפרטורת הגוף.

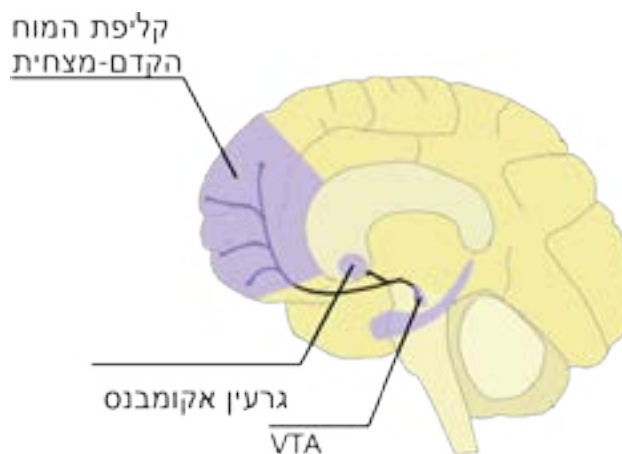
השפעתו הפסיכולוגית על המשתמשים בו מהירה מאוד, אינטנסיבית, אך קצרת זמן. התגובות וההשפעות קצרות הטווח גורמות לצורך עז לחזור ולהשתמש בסם כדי לחוות אותן שנית. הדחף לחזור לתחושה "הטובה"

הופך להיות כפיתי, עקב הפחד מהדיכאון המופיע לאחר שההשפעה האופורית פגה. משתמשים בקוקאין נוטים בדרך כלל להגדיל בהדרגה את המנה שהם צורכים; תאי עצב הם בעלי כושר הסתגלות, ומתרגלים במהירות לגירויים חוזרים ונשנים. התרגלות תאי העצב גורמת לכך שהסם אינו מצליח לעורר שוב את התחושה הראשונית. אדם המשתוקק לשחזר את החוויה הראשונית נאלץ להוסיף ולהגדיל את כמות הסם, אך ככל שהוא מרבה להשתמש בסם, הסם משפיע פחות ופחות והוא מתמכר לו.

התמכרות - הפעלת מסלול הגמול

כמו סמים מעוררים אחרים, קוקאין גורם להתמכרות בשל השפעתו על מסלול הגמול במוח שיוצר תחושה של עונג בתגובה לגירויים מסוימים. במהלך החיים התקין, מסלול הגמול משפיע על ההתנהגות בכך שהוא "מחזק" התנהגויות מסוימות ומגדיל את הסיכוי שיחזרו על עצמן בעתיד. תחושה חיובית של עונג או הנאה מקושרת עם התנהגויות הנחוצות להישרדות ולרבייה, כמו אכילה ויחסי מין.

לדופאמין יש תפקיד מרכזי במסלול הגמול במוח. הוא משמש מתווך בתהליך העברת אות החיזוק במוח ומופרש במצבים רבים, כמו ארוחה טובה או פעילות גופנית. כאשר מופיע גירוי חיובי, מופעלים תאי עצב באזור VTA בגזע המוח. תאים אלה מייצרים דופאמין ומפרישים אותו לתוך מבנה שנקרא גרעין האקומבנס במוח הגדול. גרעין זה מעורב בתהליכים שונים הקשורים לגמול ולהנאה, ולעתים אף מכונה "מרכז העונג" של המוח. גרעין האקומבנס שולח מידע אל קליפת המוח הקדם-מצחית כדי לסייע בארגון של פעולות מוטוריות וקוגניטיביות וממלא תפקיד מרכזי במסלול הגמול במוח.



איור 14: מסלול הגמול במוח

אפשר להסתכל על התמכרות כמעין הפעלת יתר של מסלול הגמול. בטווח הקצר, הפעלת המסלול גורמת לתחושה רגעית של אופוריה ולרצון עז לחזור על ההתנהגות, שבמקרה זה משמעה צריכה חוזרת ונשנית של הסם. עם הזמן מתרחשים שינויים במסלולים העצביים ובסינפסות במוח, שגורמים להתפתחות של סבילות וכן לאובדן שליטה על ההתנהגות, כך שהשגת הסם הממכר מקבלת קדימות גם על פני מחזקים טבעיים ובסיסיים כמו מזון. כמעט כל הסמים הממכרים (כמו קוקאין, הרואין, ניקוטין ואלכוהול) גורמים לשחרור של דופאמין ולהפעלת יתר של מסלול הגמול. קיימים סמים שגורמים לגירוי מהיר וחזק יותר, ולכן נחשבים לממכרים יותר. כך לדוגמה, קוקאין והרואין הם ממכרים יותר מקפאין, ולכן גם הגמילה מהם קשה הרבה יותר.



1. אילו אנשים נמצאים בסיכון להתמכרות ומה קורה במוחם?

הסובלים מהתמכרויות אינם נחשבים עוד לאוכלוסיות שוליים. מדובר באנשים נורמטיביים, המתמכרים לחומרים כגון משככי כאבים ואלכוהול, שמספרם הולך וגדל. למרות זאת, לרוב הם נותרים ללא מענה. מיהם אותם אנשים הנמצאים בסיכון, מה קורה במוחם וכיצד רפואת ההתמכרויות יכולה לסייע להם?

2. זה הכול בראש שלנו - הגמול וההנאה

3. אתרים בעברית עם מידע על סמים שונים:

<http://www.igudjr.org.il/#!info-nicotine/cili>

http://www.alsam.org.il/?page_id=38

<http://il.drugfreeworld.org/home.html>



קפה - לשתות או לא לשתות? (חקרשת)



כמה קפאין אתם צורכים ביום? קפאין נמצא במזונות ומשקאות רבים. האם אתם יודעים באילו מוצרים יש קפאין? מה גורם להרגשה המיוחדת לאחר צריכת משקאות המכילים קפאין? מדענים רבים מתייחסים לקפאין כאל הסם הפופולרי ביותר בעולם. במינונים גבוהים מאוד קפאין הוא רעיל ביותר ויכול לגרום למוות, אולם בכמויות קטנות קפאין הוא מעורר חזק. הוא יכול לשפר את מצב הרוח ולגרום לתחושת ערנות. בכמויות גדולות יותר קפאין יכול לגרום למתח, לרגזנות ולחוסר שינה. מדענים חוקרים כיצד קפאין משפיע על המוח. מחקרים רבים

נעשו על מנת לקבוע את ההשפעות הבריאותיות הנובעות מצריכת קפאין. התוצאות סותרות, ורופאים ומדענים רבים עדיין חלוקים בדעותיהם אם קפאין מועיל או מזיק.

בפעילות זו תלמדו על הקפאין ותפתחו דעה מושכלת על ההשפעות הבריאותיות שלו. תגלו מדוע מדענים מתייחסים לקפאין כאל סם, ותלמדו כיצד קפאין פועל במוח. תחקרו את תכולת הקפאין של מזונות ומשקאות שונים. תבחנו מחקרים המראים את ההשלכות הבריאותיות של צריכת קפאין.

משימה

קראו באתרי האינטרנט המוצעים כאן ובקישורים נוספים שתמצאו כדי ללמוד על קפאין. עליכם ליצור חוברת על הקפאין שתהיה כתובה מנקודת מבטו של איש מקצוע מתחום הבריאות ותהיה מכוונת לקהל מסוים. מטרת החוברת היא ליידע את קהל היעד על ההיבטים הבריאותיים של שימוש בקפאין. המטרה שלכם היא לשכנע אותם שהמסקנות שלכם על קפאין הן נכונות, ולעודד אותם להשתמש בקפאין כראוי.

תיאור התהליך

לאחר שהשלמתם את המחקר באינטרנט, החליטו מה אתה חושבים על הסיכונים הבריאותיים ועל יתרונות הקפאין.

בחרו קהל יעד בעבור החוברת שלכם. הקהל יכול להיות בני נוער, רוכבי אופניים ורצים למרחקים ארוכים, אנשים חולים במחלת פרקינסון, נשים הרות, נשים מיניקות, הורים לילדים קטנים, אנשים עם יתר לחץ דם, או הציבור הרחב. התפקיד שלכם הוא ליידע את קהל היעד שבחרתם על היתרונות והסיכונים הטמונים בשימוש בקפאין.

החוברת צריכה לכלול הסבר על מה הוא קפאין ומדוע הוא נחשב לסם. הוסיפו הסברים כיצד קפאין פועל במוח. כמו כן, מומלץ לכלול רשימה קצרה של מזונות ומשקאות המכילים קפאין ואת כמות הקפאין שהם מכילים.

החוברת צריכה להסביר את ההשלכות הבריאותיות הנובעות משימוש בקפאין לקהל הספציפי שבחרתם, ולתת עצות עד כמה השימוש בקפאין מתאים להם.

החוברת צריכה לצטט מחקר ספציפי בכל הזדמנות אפשרית.



לפניכם מבחר קטן מהקישורים שתוכלו למצוא ברשת האינטרנט.

1. [השפעות בריאותיות של קפאין - ויקיפדיה](#)
2. [קפאין - ויקיפדיה](#)
3. [קפאין: הרבה יתרונות, אבל יש גם חסרונות](#)
4. [מחשבון קפאין](#)
5. [קפאין - מיתוסים ואמיתות](#)
6. [המדריך השלם אודות קפאין - קפאין ופעילות גופנית - האמת מאחורי השמועות](#)
7. [ה-FDA החל לבדוק האם מאכלים עתירי קפאין מסוכנים לאדם](#)
8. [קפאין משפר ביצועי כושר? האמת מאחורי המיתוס](#)
9. [הקפאין שאנחנו צורכים \(ובכלל לא ידענו\)](#)
10. [קפה מפחית הסיכון לסרטן שד ב-69%](#)
11. [צריכת קפאין מאיטה את התפתחות המוח](#)

ארון התרופות שהרג את מייקל ג'קסון

לאחר נתיחה נקבע שג'קסון מת מהרעלה קשה שנגרמה ממנת יתר של סם מרדים בשם "פרופופול" ושילובו עם משככי כאבים. משטרת לוס אנג'לס דיווחה יום לאחר מותו, שמייקל ג'קסון שסבל מכאבים ומקשיי שינה, טופל בכמויות נכבדות של תרופות בקוקטייל מורכב שרקחו לו רופאיו. התרופות כללו משככי כאבים חזקים ממשפחת האופיאטים הנגזרים מאופיום שממנו מפיקים גם את ההרואין, את המורפין והקודאין, ותרופות הרגעה. לפי דיווחים, מייקל ג'קסון היה מכור כבד למשככי כאבים אופיאטיים - אוקסיקונטין ודמרול. "תרופות היו חלק מחייו של ג'קסון משנות ה-80", אמר הפרקליט של משפחת ג'קסון. והוא לא היחיד.

קוקטייל תרופות המורכב מכדורי הרגעה, משככי כאבים ממשפחות שונות, כדורי שינה, תרופות נוגדות דיכאון או מייצבות מצבי רוח נוסף על קורטוב תקופתי של תכשירים למניעת הצטננות או להקלה בגודש באף - שילוב כזה הוא מנת חלקם היומיומית של מאות מיליוני מטופלים ברחבי העולם, וגם בישראל.

מתוך 78,000 מקרי מוות בשנת 2010 שנגרמו כתוצאה משימוש בסמים בארצות הברית, יותר מ-50% נגרמו בגלל התמכרות למשככי כאבים. משככי כאבים הם בחלקם סמים רבי-עוצמה אשר מפריעים להעברת המסרים העצביים במערכת העצבים שאותם אנו קולטים ככאב. נוסף על כך שהם מונעים כאב, הם גם גורמים לתחושת התעלות ("היי").



איור 15: פרג האופיום

כאבים חזקים מאוד - המתלווים לפגיעה חמורה או האופייניים לאחר ניתוח - מחייבים טיפול בתרופות כמו מורפיום, אשר נוסף על היותן משככות כאב, הן גם מטשטשות (נרקוטיות). מורפיום משתייך למשפחה של חומרים הנקראים אופיאטים, המופקים במקור מפרג האופיום. האופיאטים פועלים פעולה כפולה: במוח השדרה הם מעכבים שחרור של נוירטרנסמיטרים מתווכי כאב, ובמוח עצמו הם מפעילים קולטנים לאנדורפינים המעורבים בשיכוך כאב ותחושה טובה. האופיאטים מחקים את פעולת האנדורפינים המיוצרים באופן טבעי במוח ובמוח השדרה, ומחלישים את תחושת הכאב. פעולה כפולה זו

הופכת את האופיאטים ליעילים מאוד בדיכוי כאב. נוסף על כך, האופיאטים גורמים לתחושת אפוריה ולהפגת חרדות.

נראה שבעולם המערבי היד קלה על ההדק בכל הקשור לצריכה של תרופות, ואנשים תופסים את השימוש בהן כדרך מהירה, נוחה, מוצדקת ויעילה להתמודד עם בעיות שונות. התמכרות חדשה זו נפוצה כדי כך שמחקרים מראים כי שיעור התמותה בארצות הברית ממנת יתר של תרופות מרשם "תמימות", כמו משככי כאבים, הוא גבוה יותר משיעור התמותה ממנת יתר של סמי רחוב וסמים מסוכנים כמו הרואין וקוקאין. בעבר הלא רחוק - בעיקר בשל בורות, חוסר ידע וחוסר ניסיון - האמינו רופאים ומטופלים שהתמכרות למשככי כאבים עלולה להתרחש רק בעקבות נטילת אופיאטים, שהם משככים נרקוטיים. אבל ככל שהתפתחה רפואת הכאב, הופרכה דעה זו. לכל תרופה מכל משפחת חומרים אפשר להתמכר, גם לאופטלגין או לאדוויל התמימים לכאורה.

האם המוח חש כאבים?

האיבר האחראי לייצר את תחושת הכאב בגופנו אינו "מרגיש" כאב בעצמו. למוח עצמו אין שום קולטני כאב ולכן אין הוא מקבל מסרים של כאב. מנתחי מוח אכן מנצלים עובדה זו ולרוב מבצעים ניתוחי מוח כשהמנתח בהכרה לגמרי, עם אלחוש מקומי בלבד. באופן כזה, המנתח יכול לשאול את המטופל שאלות ולוודא כי אינו גורם לנזק נוירולוגי ופוגע באזורים חשובים במיוחד, כמו אזורי שפה או אזורים מוטוריים.

1. מנעננת בכינור במהלך ניתוח מוח באיכילוב

נעמי אלישוב נאלצה להפסיק לנגן לפני עשרים שנה בשל רעד, וכעת, בזכות הניתוח, היא שבה לזרועות הכינור. צפו בסרטון המראה את נגינתה של נעמי בכינור תוך כדי הניתוח וקראו על הניתוח שהחזיר אותה אל הכינור.

2. ניתוח מוח ללא הרדמה

לראשונה בישראל בוצע ברמב"ם ניתוח מוח בחולה פרקינסון ללא הרדמה וללא סכין מנתחים. הטכנולוגיה החדשנית מאפשרת צריבה על ידי קרני אולטרסאונד בעומק המוח תחת הדמיה.

3. על ניתוח מוח בערות מלאה

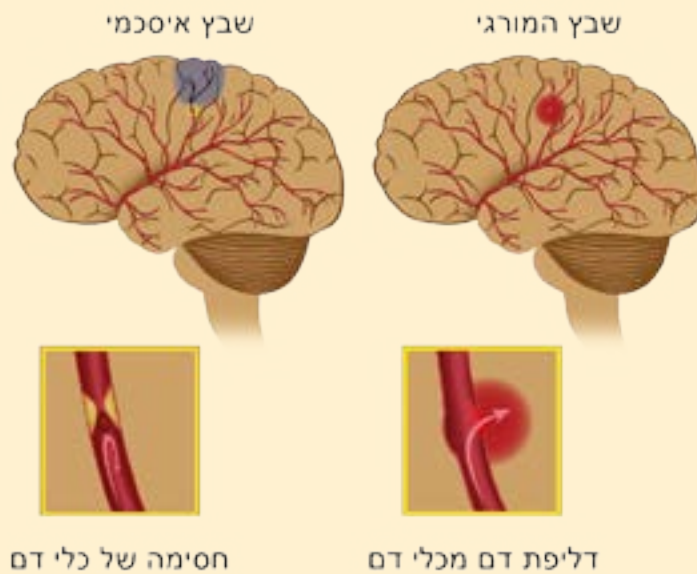
צפו בסרטון שבו פרופ' צבי רם, מנהל המערך הניירוכירורגי במרכז הרפואי תל אביב, מסביר על ניתוחי מוח בערות מלאה - השיטה מאפשרת למזער את הסיבוכים העלולים להיווצר בניתוח מוח בהרדמה מלאה ולקצר את זמן ההתאוששות.

הפרעות בפעילות המוח (הרחבה)

הפרעות בזרימת הדם במוח

שבץ מוחי

שבץ מוחי (הנקרא גם "אירוע מוחי") הוא תהליך שבו מתקיים אובדן של תפקודים במוח כתוצאה מהפרעה באספקת הדם אליו. שבץ יכול להיגרם כתוצאה מחוסר אספקת דם (שבץ איסכמי) הנובע מחסימה בזרימת הדם או כתוצאה מדימום (שבץ המורגי).



איור 16: שבץ מוחי

שבץ איסכמי נגרם עקב קריש דם החוסם עורק אשר מוביל דם למוח. הקריש יכול להיווצר באזור החסימה; או להגיע לאזור ממקום אחר בגוף, ואז הוא מכונה תסחיף, שכן הוא נסחף בזרם הדם. מקום הפגיעה במוח הוא שקובע את אופי התסמינים (סימפטומים). כך, למשל, פגיעה במרכז הדיבור משבשת את יכולת הדיבור, פגיעה באזור המוטורי משבשת או משתקת את היכולת להניע את הגפיים, ופגיעה במרכז הראייה במוח פוגעת בשדה הראייה.

שבץ מוחי המורגי נדיר יותר מאירוע מוח איסכמי ומתרחש בעקבות דליפה של דם מכלי דם במוח. דליפה כזאת היא בדרך כלל תוצאה של לחץ דם גבוה שלא טופל או של פגם בדופן כלי הדם, הגורם להחלשת הדופן ולנטייתו להתפוצץ ולדלוף.

שבץ מוחי הוא הגורם העיקרי לנכות במבוגרים בעולם המערבי, והסיבה השנייה למוות ברחבי העולם. גורמי הסיכון לשבץ כוללים: גיל מבוגר, יתר לחץ דם, אירוע קודם של שבץ, סוכרת, כולסטרול גבוה, עישון סיגריות, פרפור עליות ועוד. מבין גורמי סיכון אלה נמצא כי יתר לחץ דם הוא גורם הסיכון העיקרי.



בקרו: מכשיר לביש שיגלה אירועי שבץ מוחי

מכשיר חדש שנולד במעבדות סמסונג מבטיח לגלות אירועי שבץ על פי גלי מוח ולהציל חיים.

הפרעות בפעילות החשמלית במוח

אפילפסיה

אפילפסיה (כפיון, ובשפת העם: "מחלת הנפילה") היא הפרעה נוירולוגית שבאה לידי ביטוי, בין היתר, בפרכוסים ובעוויתות. התקף אפילפטי הוא אירוע שנגרם מהתפרצות פתאומית של פעילות חשמלית בלתי מבוקרת בתאי העצב בקליפת המוח. פעילות זאת יכולה להיות במוקד מסוים במוח (אפילפסיה מוקדית) או מפושטת על פני כל המוח (אפילפסיה כללית).



איור 17: התקף אפילפטי כללי והתקף אפילפטי מוקדי

בין התקפים לא מופיעים במחלה זו תסמינים, והחולים בה אינם חשים ברע, ומתפקדים כשגרה. לא כל התקף אפילפטי מעיד על מחלת האפילפסיה. התקפים אפילפטיים (למשל פרכוסים) חד-פעמיים יכולים לנבוע מאירועים חולפים כמו טמפרטורת גוף גבוהה אצל ילדים, ירידה דרסטית ברמת הסוכר בדם או חבלה בראש. רק התקפים אפילפטיים חוזרים ונשנים שהגורם להם אינו אירוע חיצוני חולף מוגדרים כאפילפסיה.

מאחר שאפילפסיה נגרמת על ידי פעילות בלתי סדירה של תאי המוח, התקפי המחלה עלולים לפגוע בכל פעילות המתואמת על ידי המוח. התקף יכול לגרום לבלבול זמני, לאובדן מוחלט של ההכרה, לבהייה בחלל הריק או לתנועות טלטול בלתי נשלטות של הידיים והרגליים. ההתקפים החזקים ביותר מאופיינים באובדן ההכרה, קשיון ורעד הגוף.

מן הרשת

1. [מדענים זיהו את הגורם למחלה אפילפטית קשה](#)

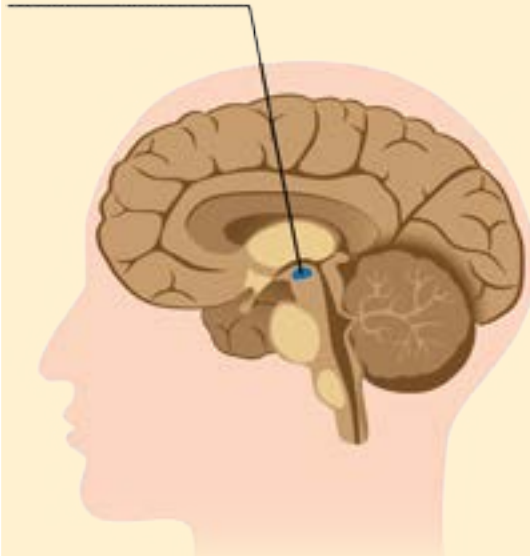
2. [תאים נגד אפילפסיה](#)

3. [בשורה לחולי אפילפסיה: קוצב שימנע התקפים](#)

פגיעה בתאי המוח

פרקינסון

אזור החומר השחור



איור 18: אזור החומר השחור בגזע המוח

מחלת פרקינסון היא הפרעה במוח הגורמת לרעד, לנוקשות שרירים ולחולשה. המחלה נגרמת מניוון מתקדם של תאים, בעיקר אלה הנמצאים באזור קטן בחלק העליון של גזע המוח שנקרא "החומר השחור" (Substantia Nigra). באופן תקין, מייצרים תאי עצב אלה את הנוירוטנסמיטר דופאמין (Dopamine). דופאמין אחראי בין היתר על העברת אותות על מנת ליצור פעולת שרירים תכליתית וחלקה. איבוד דופאמין גורם לתאי העצב לשגר גירויים עצביים בלתי תכליתיים, בהותירם את החולים ללא יכולת להוביל את תנועותיהם או לשלוט בהם באופן נורמלי. מחקרים הראו כי חולי פרקינסון מאבדים 80% או יותר מהתאים המייצרים דופאמין באזור החומר השחור.

התסמינים העיקריים של המחלה הם: רעד (רעידות בידיים, בזרועות, ברגליים, בלסת ובפנים), נוקשות בגפיים ובגו, אטיות תנועה, ואי-יציבות, או שיווי משקל וקואורדינציה

פגומים. המחלה בעלת מהלך מתמשך ומתקדם המחמיר עם הזמן. כאשר מתגברים התסמינים, חולים עלולים להתקשות בהליכה, בדיבור או בהשלמת משימות פשוטות אחרות.

נכון להיום עדיין לא יודעים מה גורם לפגיעה בתאים המייצרים את הדופאמין. ידוע שלמחלה יש יסוד גנטי, כלומר: הסיכוי לחלות בפרקינסון בקרב מטופלים שקרוב משפחתם מדרגה ראשונה (אב, אם, אח, אחות) חולה בפרקינסון, גבוה יותר בהשוואה לאוכלוסייה הכללית. בשנים האחרונות אף זוהו כמה גנים שהם גורם סיכון להתפתחות המחלה. נוסף על כך השפעות סביבתיות שונות, כמו חשיפה לחומרי ריסוס והדברה, מעלות את הסיכון לחלות במחלת הפרקינסון.

אף על פי שאי אפשר לעצור את ניוון תאי המוח המתרחש במחלת פרקינסון, אפשר לצמצם את התסמינים למשך שנים בעזרת תרופות. התרופה הנפוצה ביותר כיום היא לבודופה (Levodopa), המגבירה את ריכוז הדופאמין החסר במוחם של חולים. לבודופה הוא כימיקל פשוט הנמצא באופן טבעי בצמחים ובבעלי חיים. תאי עצב יכולים להשתמש בו כדי לייצר דופאמין ולחדש את אספקתו המידלדלת במוח. אי אפשר לתת דופאמין ישירות מכיוון שאינו חוצה את מחסום הדם-מוח. בדרך כלל חולים מקבלים לבודופה בצירוף עם חומר נוסף אשר מעכב את הפיכת הלבודופה לדופאמין עד אשר הוא מגיע למוח, וכך מונע כמה מתופעות הלוואי הנלוות לעתים תכופות לטיפול, או מצמצם אותן.

טיפולים אחרים מבוססים על גירוי של האזור הפגוע. רישום חשמלי מאזור החומר השחור במוח מגלה כי בניגוד לפעילות החשמלית הנורמלית באזור זה, אצל חולה פרקינסון הפעילות החשמלית משתבשת והופכת לקצובה: ירי צורות של אותות חשמליים בזה אחר זה. כיום בבתי חולים רבים בעולם מתבצע ניתוח להשתלת אלקטרודות. אלקטרודות אלו מוכנסות לאזור הפגוע במוחו של חולה פרקינסון, ודרך מוזרקים פולסים קצרים של זרם חשמלי בתדר גבוה, באמצעות בטרייה המושתלת מתחת לעור החולה, כמו בקוצב לב. הרעד ותופעות נוספות הקשורות למחלה נעלמים מיד עם התחלת הגירוי, והחולה מסוגל לקום, ללכת ולתפקד בצורה מוצלחת ביותר. עם הפסקת הגירוי החשמלי חוזרות תופעות המחלה. עם זאת, השתלת אלקטרודות מחייבת קידוח חורים בגולגולת והחלפת סוללה מדי כמה שנים.

טיפולים לא פולשניים חדשים הוכנסו לאחרונה כטיפולים בתסמיני המחלה. חברה ישראלית יצרה מתקן המטפל נקודתית בתסמיני הפרקינסון, על ידי צריבה ממוקדת של מרכז הרעד במוח, וזאת בלא צורך לפתוח את הגולגולת. הצריבה נעשית בעזרת גלי קול וניווט במוח, בעזרת מכשיר ה-MRI. צריבה זו מקלה מאוד על הרעד אך אינה מקלה בשאר סימני המחלה. חברה ישראלית אחרת פיתחה מכשיר המבוסס על הפעלת שדה מגנטי מעל אזורים מסוימים על פני הקרקפת. המכשיר לגרייה אלקטרומגנטית מוחית עמוקה מצליח להשפיע על תאים בעומק 7 ס"מ, ולכן הוא מתאים לטיפול בחולים המאובחנים כסובלים מפרקינסון. המכשיר מבוסס על גירוי מגנטי מוחי עמוק באזורים מוחיים המעורבים בתפקוד המוטורי, המושרה באמצעות קסדה. גירוי זה יכול להוביל לשינויים באזורי המוח המגורים הכוללים עירור רשתות עצביות, שחרור מוליכים עצביים, שינוי בתפקוד תאי עצב והשריית גמישות עצבית - היכולים להוביל לשיפור בתפקוד המוטורי בחולי פרקינסון (על שני הפיתוחים הישראליים החדשניים תוכלו לקרוא בקישורים המצורפים).



1. ניתוח מוח ללא הרדמה

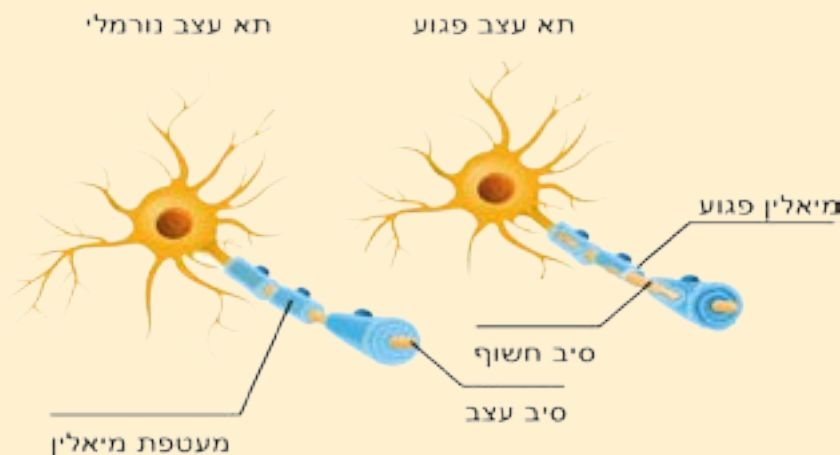
לראשונה בישראל בוצע ברמב"ם ניתוח מוח בחולה פרקינסון ללא הרדמה וללא סכין מנתחים. הטכנולוגיה החדשנית מאפשרת צריבה באמצעות קרני אולטרסאונד בעומק המוח תחת הדמיה צפו בסרטון של הניתוח שבוצע בחולה הפרקינסון

2. קסדת הפלא של עולם הביוטק הישראלי

חברה ישראלית פיתחה מכשיר בטכנולוגיה חדישה המאפשרת השפעה על תאי העצב במוח עד לעומק של כשבעה סנטימטרים, מה שמהווה מהפכה של ממש בעולם הניורולוגיה. המכשיר מבוסס על גרייה מגנטית של עצבי המוח השונים והשפעה על תפקודם.

טרשת נפוצה

טרשת נפוצה היא מחלה ניוונית של מערכת העצבים המרכזית. שמה של המחלה אינו מתקשר לתפוצתה בקרב האוכלוסייה, שאינה גבוהה, אלא לעובדה שהיא מפוזרת במוח ובמוח השדרה, שני האיברים העיקריים של מערכת העצבים המרכזית. טרשת נפוצה משתייכת למשפחת המחלות האוטואימוניות, שבהן המערכת החיסונית של הגוף מזהה מערכות שונות בגוף כגוף זר ותוקפת אותן על ידי לימפוציטים. בטרשת נפוצה, לימפוציטים מזהים חלבוני מיאלין כזרים ומובילים לתגובה דלקתית ולהרס המיאלין. המיאלין הוא החומר השומני העוטף את סיבי העצבים, מבודד אותם ומגן עליהם. כאשר מעטפות המיאלין נפגעות ומתפרקות, הדבר פוגע בהולכת הדחפים העצביים אל המוח וממנו. אם המיאלין נהרס במספר רב של סיבי עצבים, נוצר אזור פגוע המכונה לוחית טרשתית.



איור 19: תא עצב פגוע בטרשת נפוצה ותא עצב נורמלי

המיקום של הלוחיות קובע את התסמינים של המחלה. לוחיות טרשתיות במוח עלולות לגרום לשינויים באישיות, לדיכאון, להפרעות בזיכרון ובריכוז; ובשלבים מאוחרים של המחלה גם לאובדן קואורדינציה ושיווי משקל, לחירשות, לתשישות ולהפרעות בדיבור. נזק במסילות עצביות יכול לגרום לקהות תחושה, לנימול ולשינויים בתחושות. הפגיעה יכולה להיות בראייה, במערכת השתן והעיכול ובתפקוד השרירים.

הבדיקות החשובות ביותר באבחנת טרשת נפוצה הן MRI מוח ו-MRI עמוד שדרה. התמונה האופיינית המתקבלת אצל חולה טרשת היא של לוחיות טרשתיות במקומות מסוימים האופייניים למחלה.

הגורם לטרשת נפוצה עדיין אינו ידוע. אין תרופה לריפוי המחלה, אלא רק לעיכוב ההחמרה. מאחר שההשערה המקובלת היא כי המחלה היא אוטואימונית, תחום הטיפול המבטיח ביותר הוא זה הגורם לשינוי התגובה החיסונית. כמה חומרים מקבוצת הסטרואידים מקלים זמנית את התסמינים.



1. מסע בארץ הלמה

פרופ' מיכאל סלע, פרופ' רות ארנון וד"ר דבורה טייטלבוים ממכון ויצמן למדע פיתחו תרופה לטרשת נפוצה. ב-1996 אושרה לשימוש התרופה - שקיבלה את השם המסחרי "קופקסון". מאז אותה תגלית זרמו קופסאות רבות של "קופקסון" בקווי הייצור של חברת "טבע", דבר שהשפיע על הכלכלה הישראלית כולה, ותרם להתפתחותה של "טבע" לאחת מחברות התרופות הגדולות בעולם.

2. זן עכברים חדש יציל ממחלות החומר הלבן במוח

עכברים ראשונים מסוגם שיצילו חולים במחלות הפוגעות בחומר הלבן במוח ובטרשת נפוצה פותחו באוניברסיטת תל אביב באמצעות הנדסה גנטית ושימוש בתאי גזע עובריים.

3. אקסוזומים טבעיים מעוררים תקווה לתיקון נזקים במערכת העצבים

חוקרי נירולוגיה מאוניברסיטת שיקגו דיווחו לאחרונה שאקסוזומים שגודלו במעבדה עוררו יצירת מיאלין בדגימת רקמת מוח של חולדה שאמורה לדמות נזקים של טרשת נפוצה, והביאו אותה לרמה של 77% מן המצב הנורמלי.

4. תוצאות מבטיחות לטיפול חדשני בטרשת נפוצה

טיפול ניסיוני המוביל לחיזוק תאי מערכת החיסון נגד וירוס האפשטיין-בר הוביל לשיפור גדול בחולה טרשת נפוצה.

אלצהיימר

אלצהיימר היא מחלה ניוונית של המוח, המתבטאת באובדן הדרגתי של הזיכרון, ופגיעה ביכולות הקוגניטיביות, כולל יכולות ההבנה, השיפוט, החישוב, חוש ההתמצאות ועוד. המחלה גורמת גם לתשישות פיזית ולנסיגה במצב הרוח עד כדי דיכאון, ובמקרים מסוימים עלולים להתפתח גם מצבי חוסר שינה והזיות. המחלה נקראת על שמו של אלויס אלצהיימר, רופא גרמני שהיה הראשון שתיאר את סימני המחלה בתחילת המאה העשרים.

מחלת אלצהיימר מאופיינת במוות של תאי עצב ובאיבוד הסינפסות במוח, בעיקר באזורי ההיפוקמפוס וקליפת המוח, האחראים על הלמידה, הזיכרון והחשיבה. תהליך זה מוביל ליצירת חללים פנימיים ולירידה במשקל המוח. במוחם של חולים ניכרת גם ירידה בכמות הנוירורנסמיטר אצטילכולין הממלא תפקיד מרכזי בפעולת הזיכרון, ולכן מייחסים לחסר זה חשיבות רבה בהתפתחות המחלה.



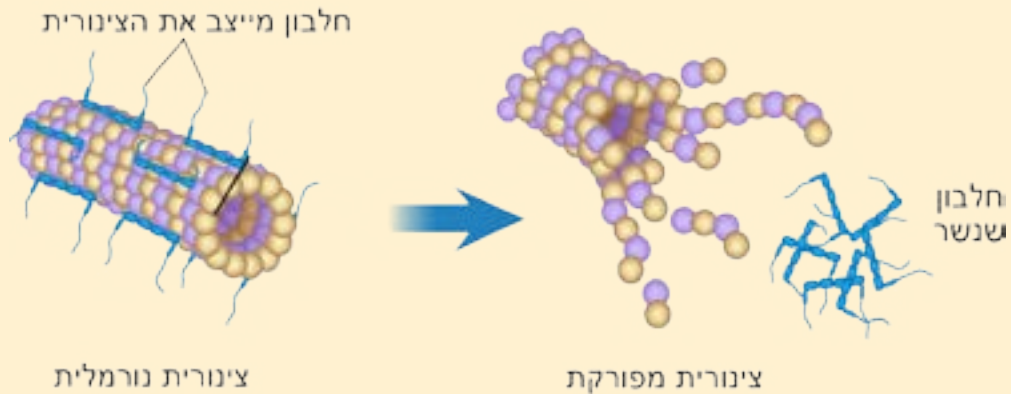
נורמלי



אלצהיימר

איור 20: מוח פגוע של חולה אלצהיימר בהשוואה למוח נורמלי

מחקרים חדשים מצאו את הבסיס להרס תאי העצב. בתאי העצב במוח יש צינוריות הולכה המעבירות חומרים מקצה אל קצה בתוך התא הארוך, וכן משמשות בעבורו שלד מבני. באנשים החולים באלצהיימר נושר חלבון מיוחד הקושר את רכיבי הצינוריות ומייצב אותן, הצינוריות מתפרקות, ובעקבותיהן קורס התא כולו.



איור 21: התפרקות צינורית בתא עצב של חולה באלצהיימר

התסמין הראשון של מחלת אלצהיימר הוא לרוב אובדן הזיכרון לטווח קצר. כאשר המחלה מתפתחת, איבוד הזיכרון נעשה קשה יותר, החולים סובלים משינויים תכופים וקיצוניים במצב הרוח ונוטים להיות מתוחים, חרדים וכעוסים בעוצמה רבה. בשלבים מתקדמים יותר של המחלה החולים נעשים אדישים לסביבה וכמעט אינם מגיבים לגירויים חיצוניים. כושר התנועה והשליטה בפעולות בסיסיות של הגוף אובדים אף הם, ובמקביל מתפתח דיכאון. תוחלת החיים לאחר הופעת המחלה נעה בין שנתיים לעשרים שנה.

בדרך כלל נעשה אבחון מחלת אלצהיימר לפי הופעת התסמינים שצוינו לעיל. אבחנה סופית ומוחלטת יכולה להיעשות רק בנתיחה שלאחר המוות, שבה אפשר לראות במוח המת משקעים צפופים, שהם מצבורים עצביים בעלי אופי דלקתי מסביב לתאי העצב, ובתוך התאים החולים אפשר להבחין בחוטים ובפקעות חוטיות סבוכות.

אלצהיימר היא מחלה כרונית, ונכון להיום נטולת מרפא. המחלה פרוגרסיבית - מצב החולה הולך ומחמיר עם הזמן. נהוג לראות באלצהיימר מחלה הפוגעת לא רק בחולה עצמו, אלא גם בסביבתו הקרובה, הנאלצת לחזות בתהליך הידרדרותו של יקירה. כמו כן, במקרים רבים מוטלת על בני המשפחה מעמסה כבדה הנובעת מהצורך לספק השגחה צמודה על החולה.

יש תרופות המאטות את קצב התפשטות המחלה, אך יעילותן מוגבלת והן אינן פועלות על כל החולים.



1. [גאווה ישראלית: החוקרת שמצאה תרופה לאלצהיימר](#)

פרופ' מרתה וינשטוק-רוזין מהאוניברסיטה העברית זוכה השנה (תשע"ד) בפרס ישראל בזכות תרופה שפיתחה המאטה את מחלת האלצהיימר. כעת, בגיל 79, היא עדיין חוקרת חומר חדש שאולי יכחיד את המחלה לחלוטין.

2. [מנגנון מולקולרי חיוני עשוי לשמש אתר מטרה לתרופות עתידיות](#)

פרופסור גוזס מאוניברסיטת תל אביב גילתה חלבון חיוני השומר על שלמות תאי העצב במוח. מקטע קצר ממנו שפותח במעבדה מראה תוצאות מבטיחות כבסיס לתרופה לאלצהיימר ולמחלות אחרות של המוח.

מסביב לשעון (הרחבה)

זה קרה כמעט בטעות, במסעדה הלונדונית היוקרתית אוקסו טאוור, שמשקיפה על התמזה מהקומה העליונה של מגדל אוקסו בעיר. המסעדה עברה שיפוץ, ושכרה את מעצב התאורה הבריטי מארק הנסמן כדי שיעזור ליצור אווירה חדשנית ומעוררת תיאבון. הנסמן החליט לחרוג מהנוהג המקובל במסעדות, של תאורה עמומה בצבעי זהוב חמים, והתקין בתקרתה נורות ותריסים מיוחדים שהציפו אותה באור כחול בהיר. הוא קיווה שהתאורה תחמיא למראה הסועדים, לא יותר. אבל קרה יותר מזה. מדי לילה, בסביבות 22:00, שעה שבה מסעדות לונדון מתרוקנות, הסועדים באוקסו התעוררו, והחלו להזמין עוד מנות ומשקאות. המנהלים גם סיפרו להנסמן שככל שהאור התחזק, הפעילות במקום הייתה שוקקת יותר.

”כלכליסט”, 17.5.12

מדוע אור כחול הגביר את פעילות הסועדים בשעת לילה?

ההסבר לכך נמצא באזור זעיר במוח שגודלו פחות ממילימטר מרובע, המתפקד ממש כמו שעון. אפשר להחזיק את השעון הביולוגי הזה מחוץ לגוף ולהמשיך למדוד את השעה במשך שבועות, ואפילו להעביר אותו מבעל חיים אחד לאחר. השפעתו עלינו עצומה, ונוגעת לכל תחום של פעילות הגוף. מחקרים בשני העשורים האחרונים מתמקדים בניסיון למצוא את המנגנון של השעון הביולוגי ביצורים שונים. בפרק זה נביא את המידע שהצטבר אודות פעילות השעון הביולוגי באדם. במהלך הפרק נענה על שאלות כגון אלה:

היכן בגוף מתבצעת מדידת זמן והיכן מצוי השעון הביולוגי?

כיצד פועל השעון הביולוגי?

למה לחלק מהאנשים קשה להתעורר בבוקר?

מה קורה כשהשעון הביולוגי מתקלקל?

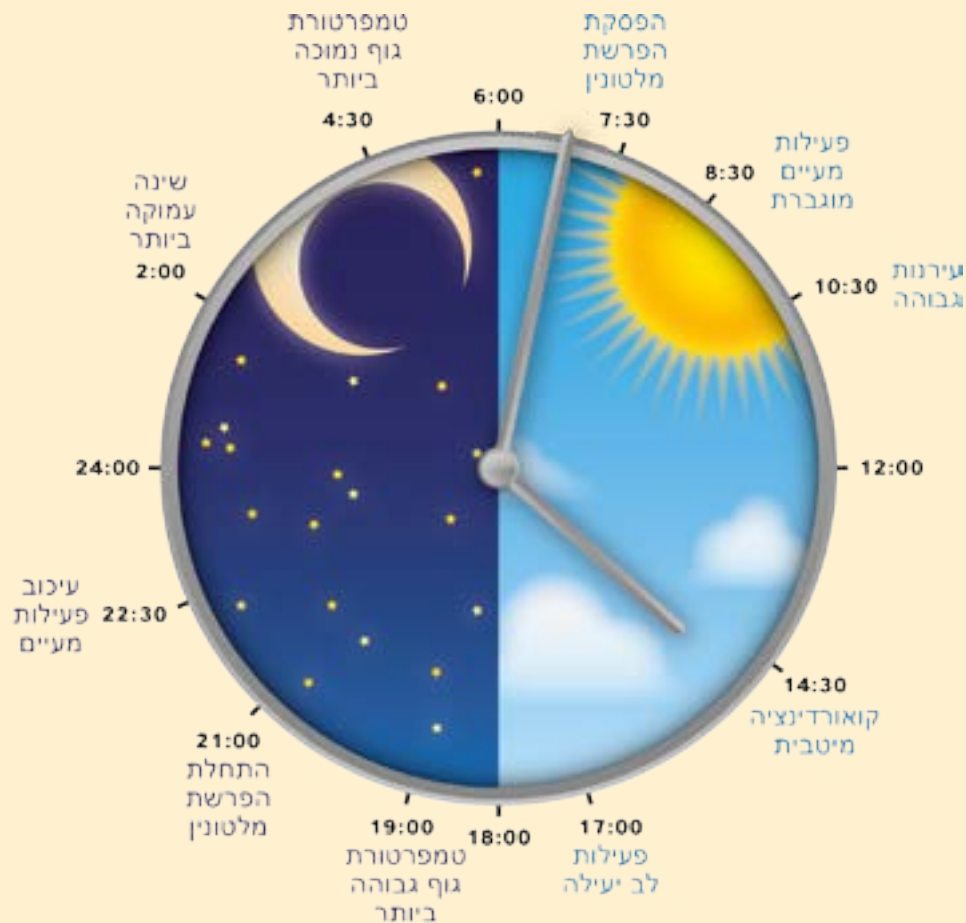
מה הוא ג'ט-לג? ומה קורה לעובדי משמרות לילה?

כיצד משפיעה תאורה מלאכותית על השינה והערות שלנו?

השעונים הביולוגיים מכוונים את המקצב היממתי

במהלך האבולוציה רוב האורגניזמים הותאמו לשינויים יומיים ועונתיים של תאורה וטמפרטורה שהם תוצאה של תנועת כדור הארץ סביב עצמו וסביב השמש. הגוף שלנו משתנה כל הזמן במשך היממה. לחץ דם שנמדד בבוקר הוא שונה מזה שנמדד בלילה. טמפרטורת הגוף, רמת ההורמונים ועוד אלפי גורמים מראים תנודות במהלך היממה. השינויים האלה בגופנו הם מחזוריים והם מותאמים להשתנות מחזורית של תנאי הסביבה במהלך היום והלילה. מחזוריים אלה מכוונים מקצבים ביולוגיים, והם קיימים במרבית היצורים החיים.

המקצב הביולוגי הנפוץ ביותר בעולם החי הוא המקצב היממתי. כמעט כל גורם פיזיולוגי בגופנו עובר שינויים במחזוריות של יממה. לדוגמה, שינה וערות, אכילה, טמפרטורת הגוף, ריכוזי הורמונים, פעילות לב ומעינים (איור 22). המקצב היממתי הפנימי ביצורים השונים שונה מעט מהמקצב של היממה הנמשך 24 שעות בדיוק. מכאן מקור שמו בלועזית צירקדיאני מהמילה הלטינית "circa diem" שמשמעותה "בערך יום". באדם אורך המקצב היממתי הוא 24 שעות ו-12 דקות.



איור 22: מקצב יממתי של תהליכים שונים באדם

תעלומת הפרשת החלבון DBP

דוגמה מובהקת לתהליך המתרחש במקצב יממתי התגלתה במקרה, כפי שקורה לעיתים קרובות במדע, במעבדתו של פרופ' אולי שיבלר באוניברסיטת ז'נבה. קבוצת המחקר שלו גילתה, כי אפשר להפיק מתאי כבד כמויות גדולות במיוחד של חלבון הקרוי DBP. אולם לאחר שהמדענים פרסמו את הממצאים בכתב-עת מדעי יוקרתי התגלה דבר חמור: הם חזרו על אותם הניסויים, אך לא הצליחו להפיק את החלבון פעם נוספת. חברי הקבוצה נלחצו מאד, אך מהר מאד נפתרה התעלומה: התברר שאת הניסויים המקוריים ביצע סטודנט שנהג להגיע למעבדה בשש בבוקר, מפני שהיה רגיל להשכים קום בבית משפחתו - משפחת איכרים שווייצריים. לעומת זאת את הסבב השני של הניסויים ביצע סטודנט אמריקאי שנהג לבלות עד שעות הבוקר, להשלים את שעות השינה במשך היום, ולהגיע למעבדה רק בשתיים בצהריים. החלבון שבניסויים היה בין החלבונים שמשתנה במקצב יממתי: בשעות הבוקר הפרישו אותו התאים בכמויות גדולות פי 100 מהכמות שהפרישו אחר הצהריים.

מגזין מכון ויצמן, 20.3.12

את המקצב היממתי ייחסו תחילה להשפעה של גורמים חיצוניים כמו אור, אולם מחקרו של החוקר הצרפתי מאיראן בשנת 1729 שינתה לחלוטין את ההבנה של התהליכים המחזוריים. בדיווחו לאקדמיה המלכותית למדעים של פריז, הוא כתב כי צמח מימוזה שהועבר לתנאי חשכה קבועה המשיך לפתוח את העלים ביום ולסגור אותם בלילה. היה זה הניסוי הראשון שהוכיח שבתנאים קבועים ללא גירוי חיצוני, ממשיכים להתקיים תהליכים מחזוריים במקצב יממתי. ניסויים נוספים בצמחים במאה ה-18 הראו שתופעות עם

מחזוריות של 24 שעות מקורן במנגנונים ביולוגיים פנימיים שעוקבים אחרי תנועת כדור הארץ. אולם, נדרשו יותר ממאתיים שנה כדי להתחיל לפענח את המנגנון הפנימי הקובע את המקצב היממתי.

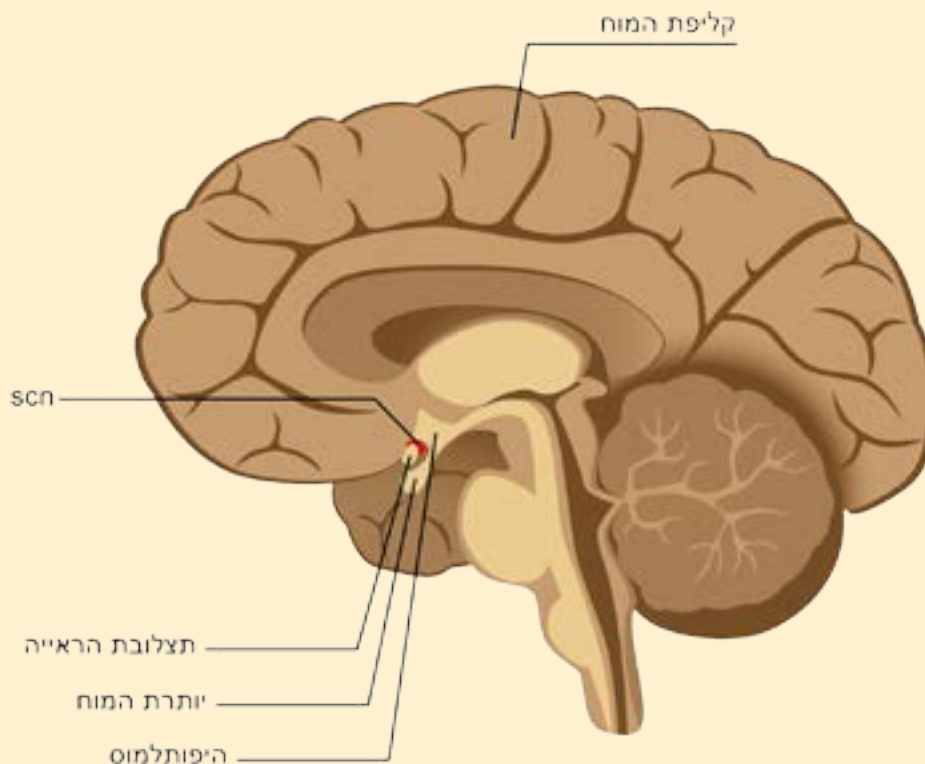
ביצורים בעלי מקצבים יממתיים התפתחו במלך האבולוציה מנגנונים הפועלים כשעונים ביולוגיים. שעון ביולוגי הוא מנגנון פנימי המשמש למדידת זמן, ומתאים את הפעילות של האורגניזם לתנאי סביבה שמשתנים באופן מחזורי. שעונים ביולוגיים קיימים במרבית היצורים החיים, כולל בעלי חיים, צמחים, פטריות ואף מינים מסוימים של חיידקים. המאפיין הבסיסי של שעון ביולוגי הוא היותו קוצב פנימי של היצור, אשר מתרחש באופן ספונטני, ולא מופעל על ידי תנאי הסביבה או גורמים חיצוניים. כפי שנראה בהמשך, גורמים חיצוניים משפיעים על השעונים הביולוגיים, אולם אינם מפעילים אותם (ראו עמ' 41).

מערכת השעונים הביולוגיים באדם

באדם, כמו בבעלי חוליות אחרים, התפתחה רשת של שעונים ביולוגיים המפוזרים בכל הגוף. הרשת הזאת מאורגנת כמערכת הירארכית שבראשה נמצא שעון ראשי במוח ששולט על השעונים הנמצאים בכל הגוף. כמעט בכל אחד מתאי גופנו יש שעון ביולוגי ששומר באופן עצמאי על המקצב היממתי. יש לנו טריליונים של שעונים מיקרוסקופיים והם נקראים שעונים היקפיים. כל השעונים הביולוגיים בגופנו, גם ההיקפיים וגם המרכזי, פועלים באותה דרך. בכל תא יש גנים מיוחדים המקודדים לחלבוני שעון במחזוריות של יממה. חלבוני השעון פועלים במנגנון של משוב שלילי. תחילה הם מצטברים בתא ולאחר מכן החלבונים עצמם גורמים להפסקת ייצורם, וחוזר חלילה. באופן זה כמות חלבוני השעון עולה ויורדת באופן מחזורי במשך היממה. השעון הזעיר בכל תא מבטיח תזמון מדויק של התרחשות התהליכים בתא בהתאם לשעה בשעון היממתי.

לשם מה דרוש השעון המרכזי?

השעון הביולוגי המרכזי ביונקים מצוי בהיפותלמוס שבמוח, באזור הנמצא מעל מקום ההצטלבות של עצבי הראייה ונקרא הגרעין העל תצלובתי - SCN (suprachiasmatic nucleus) (איור 23).

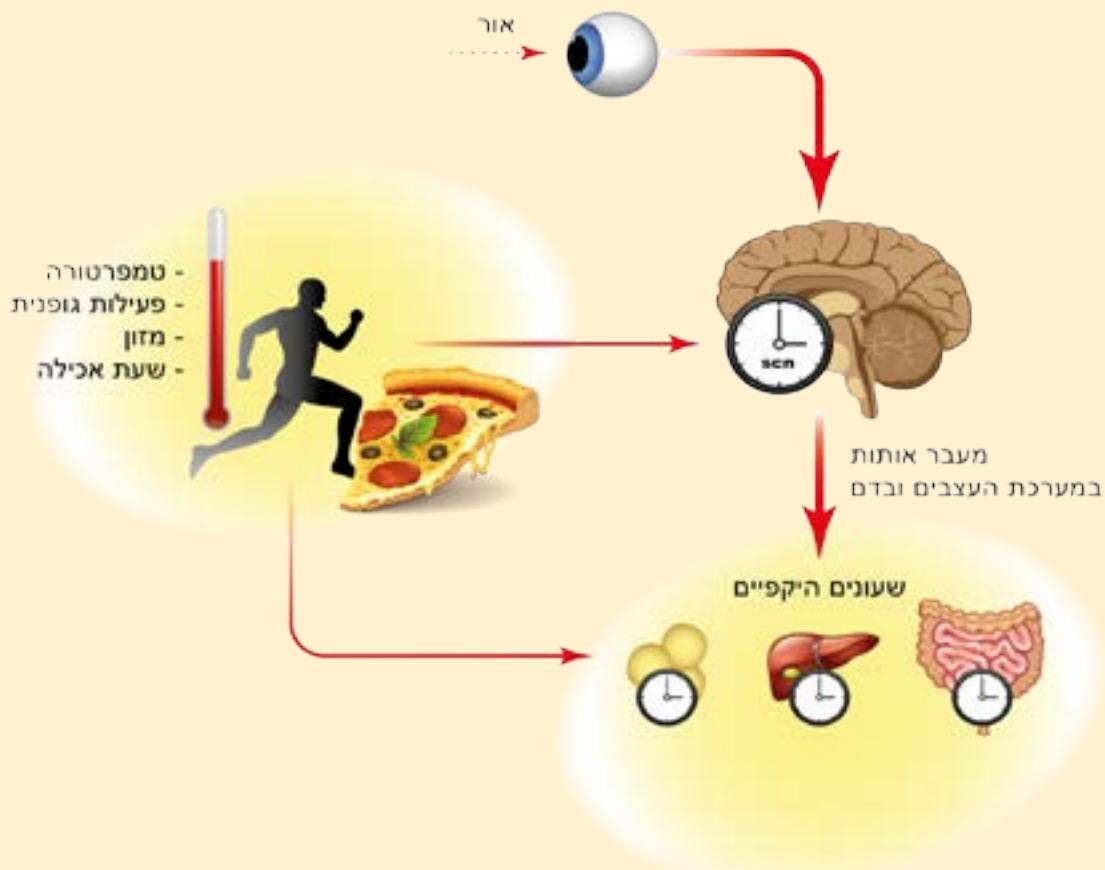


איור 23: השעון הביולוגי המרכזי (ה-SCN) במוח

השעונים היממתיים פועלים בהרמוניה כתזמורת מדויקת כאשר המנצח הוא השעון הביולוגי המרכזי שבמוח. השעון המרכזי מאפס כל יום מחדש את השעה בכל השעונים בגוף. יש צורך באיפוס כי המחזור הפנימי שונה במעט מהמחזור היממתי החיצוני. השעונים הביולוגיים פועלים באדם במחזוריות הנמשכת 24.2 שעות. אם אדם ישהה בעומקה של מערה ללא תאורה, או בכל מקום המנותק מגירויים חיצוניים, השעונים הביולוגיים ימשיכו לפעול במקצב יממתי של 24.2 שעות. השעון הפנימי נמצא באיחור קל ביחס לשעון החיצוני, והוא יתעורר כל יום באיחור של כמה דקות ביחס ליום הקודם. איחור מצטבר כזה יגרום לבסוף לשיבוש מחזוריות השינה והערות והוא יתעורר בשעות הלילה וילך לישון בשעות היום. יש צורך בגורם שיאפס ויתאים כל יום מחדש את השעונים הביולוגיים הפנימיים לשעון החיצוני.

על חשיבותו הרבה של ה-SCN ביונקים למקצב היממתי למדו מניסויים בהם הרחיקו את ה-SCN ממוחן של חיות מעבדה כמו חולדות, עכברים ואוגרים. הרחקת ה-SCN גרמה לשיבוש מחזור השינה והערות אצלם. זמן השינה הכולל של חיות המעבדה לא השתנה, אולם הוא התרחש באופן אקראי במהלך היממה.

השעון המרכזי עובר כל יום מחדש התאמות ותיקונים לשעון החיצוני בעזרת האור שנקלט בעיניים. המידע על כמות האור בסביבה נקלט בתאי גנגליון קולטי אור הנמצאים ברשתית העין. התאים מכילים קולטן לאור בשם מלאנופסין הרגיש במיוחד לקליטת אור בתחום הכחול. מידע זה מועבר דרך עצב הראייה ישירות אל תאי ה-SCN (איור 25). איתות האור מספק מידע אודות שעת היום ומסנכרן כל יום מחדש את השעה היומית בכל אחד מתאי ה-SCN. האות העיקרי שמסנכרן את השעון המרכזי הוא אמנם האור, אולם גירויים חיצוניים אחרים כמו טמפרטורה, סוג המזון, זמני הארוחות, פעילות גופנית ואינטראקציות חברתיות יכולים גם כן להשפיע, אם כי במידה פחותה, על איפוס השעון המרכזי והשעונים ההיקפיים (איור 24).



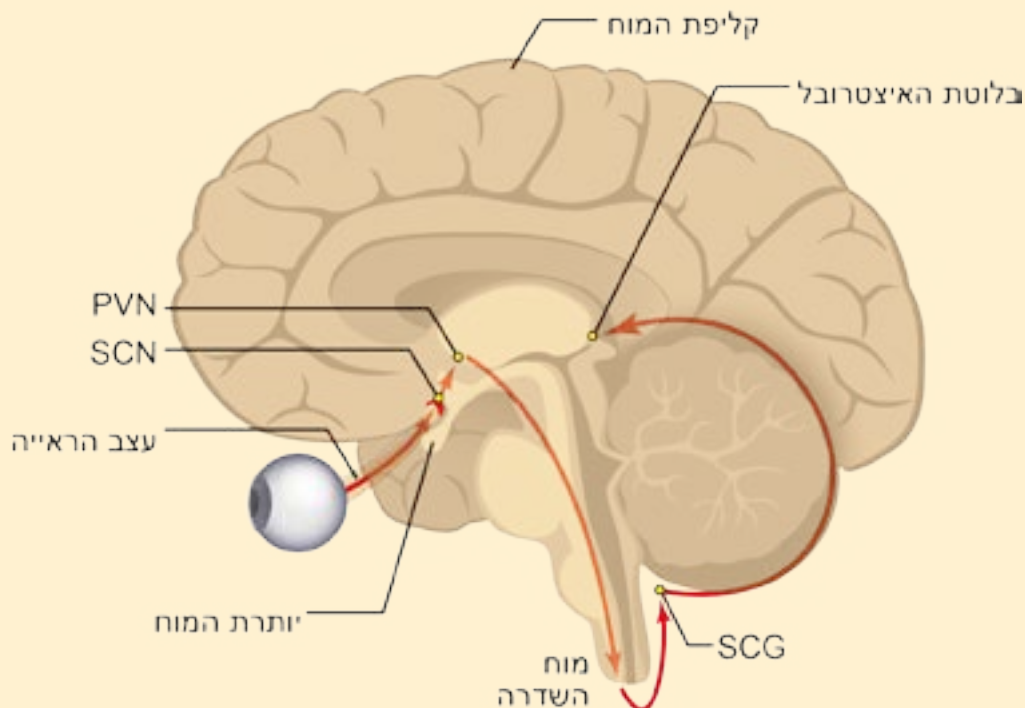
איור 24: אותות שמסנכרנים את השעון המרכזי ואת השעונים ההיקפיים

סינכרון השעונים ההיקפיים נעשה בדרכים אחדות שעדין נחקרות. ההשערה הראשונית הייתה כי העברת המידע מה-SCN, בדומה למרכזים שונים במוח, מבוססת רק על העברה עצבית באמצעות ניוטרנסמיטורים. אולם מספר מחקרים שנערכו בשנות ה-80 וה-90 הראו כי השליטה על השעונים הביולוגיים ההיקפיים מבוססת, בנוסף על מערכת העצבים, גם על אותות כימיים המועברים באמצעות הדם. לאחר שהרסו את ה-SCN בחיות ניסוי החוקרים השתילו במוחן SCN שנלקח מבעלי חיים אחרים. בכל ההשתלות לא נמצאו קישורים סינפטיים חדשים שנוצרו מהשתל. למרות שה-SCN המושתל לא יכול היה ליצור קשרים עצביים, הוא הצליח להפעיל מחדש את השעון הביולוגי באמצעות חומרים שעברו בדם. האות הכימי שנשלח על ידי ה-SCN טרם זוהה בוודאות עד כה.

מחזור שינה וערות

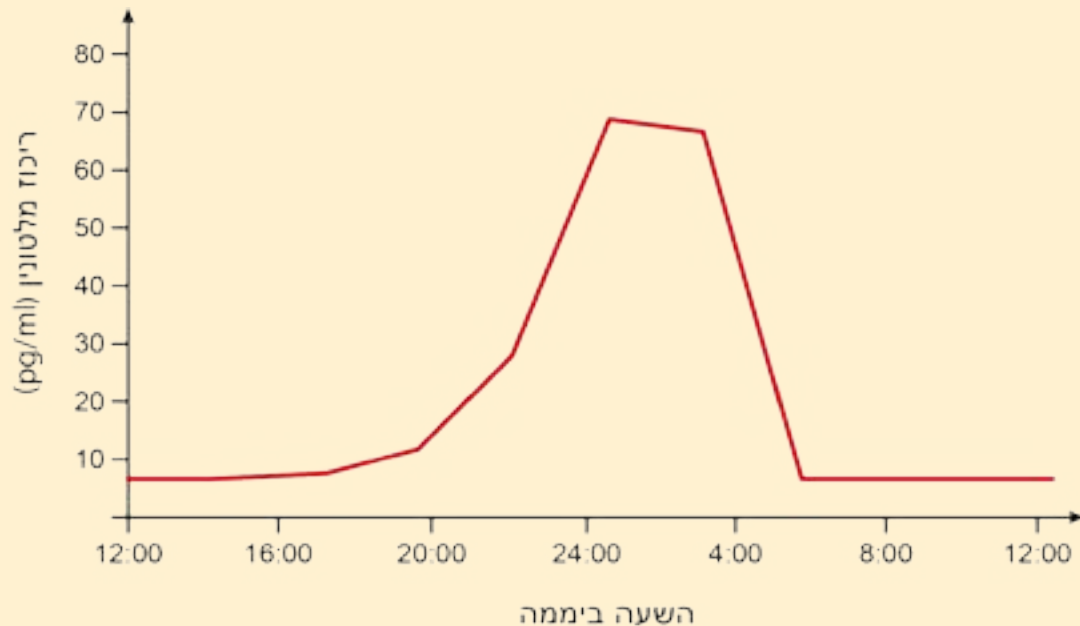
מאז ימי קדם היה ברור כי באור היום אנחנו מנהלים את שגרת החיים, בעוד שבלילה אנחנו בדרך כלל ישנים. אחד המרכיבים העיקריים בבקרה של מחזור שינה-ערות הוא השעון הביולוגי. גירוי קרני האור הנקלט ברשתית העין, עובר ל-SCN. תאי ה-SCN מעבירים לחלקים שונים במוח שדרים המווסתים הפרשה של הורמונים שונים, את טמפרטורת הגוף ומווסתים תפקודים אחרים המעורבים בתחושת העייפות והערנות.

כאשר ה-SCN נחשף לאור הראשון בבוקר הוא גורם לעלייה בטמפרטורת הגוף ולהפרשת הורמונים כמו הקורטיזול. במקביל הוא פועל להפחתה בהפרשת ההורמון מלטונין, וזאת עד לשעות החשיכה. אור גורם לדיכוי ההפרשה, ולכן המלטונין, המכונה גם הורמון החושך, מתחיל להיות מופרש רק עם רדת החשכה ופועל להשריית השינה. מלטונין מופרש על יד בלוטת האיצטרובל, שגודלה בגודל של גרגר אפונה והיא ממוקמת במרכז המוח. כאשר החשיכה יורדת מוסר עיכוב האור, ובלוטת האיצטרובל מתחילה לייצר ולהפריש מלטונין לדם. המידע שנקלט ב-SCN עובר לבלוטת האיצטרובל במסלול עצבי שעובר דרך מוח השדרה (איור 25).



איור 25: מסלול העברת אותות האור מן העין אל בלוטת האיצטרובל

הפרשת המלטונין עולה בלילה והיא בשיאה בין אחת בלילה לארבע לפנות בוקר, ומסתיימת עם עלות האור. גירוי של קרני האור מפחית באופן ישיר ומיידי את הפרשת המלטונין. הפרשת המלטונין נעשית איפוא במחזוריות יממתית וזה בא לידי ביטוי בשינויים ברמת המלטונין בדם במהלך היממה (איור 26).



איור 26: שינויים ברמת מלטונין בדם במהלך יממה

ההפרשה הלילית של המלטונין מתחילה כשעתיים לפני פתיחת "שער השינה", שהוא תקופת הזמן שהצורך בשינה בו עולה. בזמן הפרשת המלטונין רמת הקורטיזול בדם עולה וטמפרטורת הגוף יורדת, כל אלה מובילים לירידה בערנות. כאשר רמת המלטונין מגיעה לשיא - טמפרטורת הגוף היא הנמוכה ביותר והגוף כולו ערוך למצב של שינה. בשפל הפרשת המלטונין אנחנו מתעוררים. המלטונין אינו "מייצר" שינה, אך הוא מעורב בהשרייתה בלילה. בשינה במשך היום אין הפרשת מלטונין.

רמת המלטונין ומועד הפרשתו שונה בגילים שונים. בקרב פעוטות הרמות הגבוהות ביותר נמדדו בין חצות לשעה 8:00 בבוקר. אצל בני נוער ייצור המלטונין מתחיל מאוחר יותר, רק לקראת 23:00 בלילה, ונמשך עד שעות הבוקר המאוחרות. לכן יש לבני נוער נטייה טבעית ללכת לישון מאוחר יותר ולקום מאוחר יותר. כמות המלטונין פוחתת ככל שהאדם מתבגר.

מלטונין מופרש גם אצל יונקים אחרים, שם הוא עשוי לחולל ערנות דווקא, בהתאם למין החיה. אצל חיות הלילה כמו חולדות למשל, איתות למוח שהחושך ירד מבשר את השעה לצאת ולחפש מזון. הפרשת מלטונין גורמת אצלן לערנות.

הפרעות בשעון הביולוגי

פעילות בשעות הלילה כמו ישיבה מול מסך המחשב, שימוש בטלפון חכם ואכילה הן פעילויות האופייניות לחיינו. בגלל סדר יום כזה רבים מאיתנו נחשפים לאור, למזון, ולפעילויות בזמן שהאיברים והתאים בגופנו מצפים לחושך, לשקט ולשינה. במחקרים רבים התברר שיש קשר בין פעילויות בשעות הלילה להשמנה, ללחץ דם גבוה ולבעיות מטבוליות אחרות. מספר מחקרים גדל והולך מצביע על בעיה יותר רחבה ממחסור בשעות שינה, והיא שיבושים בשעון הביולוגי. מחקרים בעכברים וגם בבני אדם מראים ששיבוש בשעון הביולוגי גורם לשיבושים בתהליכים הנעשים במקצב יממתי. לדוגמה, בניסוי בו האכילו עכברים בשעות

היום, שעות בהן חיות לילה אלה רגילות לישון, הם העלו משקל רב ביחס לעכברים שהאכלו במשך הלילה (איור 27). העכברים שאכלו ביום מעט יותר מעכברים שאכלו בלילה, כך שכמות המזון לא הייתה הגורם לעלייה במשקל. מחקרים ביונקים אחרים הוכיחו גם כן שלא כמות האוכל משפיעה אלא שעת האכילה.



איור 27: שיבוש השעון הביולוגי של זמני אכילה גורם להשמנה בעכברים

פגיעה בגנים של השעון הביולוגי בכל תאי הגוף של עכברים גרמה להפרעות לא רק במחזורי שינה-ערות, אלא גם במחזוריות של אכילה, הפרשת הורמונים, טמפרטורת הגוף ובתפקודים אחרים הקשורים בחילוף החומרים.

לשיבוש זמני של השעון הביולוגי יש תוצאות בריאותיות מזעריות, כמו שינה משובשת או עייפות במשך היום. כאשר השעון הביולוגי משתבש באופן כרוני, נמצא שהוא גורם למגוון בעיות הכוללות נדודי שינה, ירידה ביכולת הקוגניטיבית, דיכאון, עלייה במשקל, דיכוי תפקוד מערכת החיסון, הזדקנות מואצת, הפרעות במערכת העיכול, מחלות לב וכלי דם, סוכרת, והגדלת הסיכון לחלות בסרטן. הגורמים לשיבוש בפעילות השעון הביולוגי יכולים להיות פנימיים-ביולוגיים או חיצוניים-סביבתיים. גורמים סביבתיים קשורים לאורח החיים המודרני שלנו. טיסות טרנסאטלנטיות בין אזורים זמן, עבודה במשמרות לילה ותאורה מלאכותית גורמים לשיבוש השעון הביולוגי ולתופעות שליליות המשליכות על בריאותנו.

יעפת (ג'ט לג)

יעפת היא הפרעה שנובעת ממעבר מהיר מאזור זמן אחד לאחר, הגורם לכך שהשעון הביולוגי של האדם אינו מותאם לשעון של הסביבה. מסעות ימיים שארכו בעבר עשרות ימים התקצרו בעידן הסילון לשעות ספורות. באמצעות הטיסה המרחקים בין אזורים הזמן קטנים באופן משמעותי ולשעון הביולוגי אין אפשרות להתאים את עצמו לאזור הזמן החדש. ההפרעה בשעון מתבטאת בייצור בלתי מבוקר של מלטונין כיוון שהשעון מתפקד על פי אזור הזמן הקודם. יש אי התאמה בין תחושות הערנות-עייפות של הפרט לבין שעות האור והחושך המקומיות. השעון הביולוגי המרכזי "מאבד שליטה" ועל כן המקצבים הנשלטים על ידי שעונים היקפיים מאבדים את הסנכרון והתזמון שלהם. השעונים הביולוגיים ההיקפיים מתאימים עצמם לזמן אזורי חדש בקצבים שונים. כל אחת מן המערכות הפיזיולוגיות של הגוף מתאימה עצמה למקצב החדש בזמן שונה, כך שמערכת אחת עשויה להיות במופע היומי בעוד שמערכת אחרת תימצא בסוף מופע הלילה. מצב זה של חוסר תיאום בזמן בין המשתנים הפיזיולוגיים השונים הוא כנראה הגורם העיקרי

לתחושה הרעה ולהפרעות הפיזיולוגיות המאפיינות את היעפת. התסמינים של יעפת כוללים בעיקר נדודי שינה ועייפות בשעות היום, אך עלולים להתבטא גם במצב רוח מדוכדך, בתפקוד גופני לקוי, בפגם ביכולת החשיבתית, ואפילו בבעיות במערכת העיכול.

לאחר שהשעון המרכזי חוזר לפעילות תקינה "ומשתלט" חזרה על פעילות השעונים ההיקפיים, חולפת אי הנוחות של היעפת. פרק הזמן שנדרש על מנת לסנכרן את כל השעונים הביולוגיים לשעון החיצוני קרוי Jet Lag. חלק מן האנשים מסתגלים מהר יחסית לשינויים, לאחרים דרוש זמן הסתגלות שיכול להימשך אף שבועיים. ככלל, ההתאוששות מהיעפת מהירה וקלה יותר ככל שהנוסע נענה למקצב הסביבתי - נחשף לאור השמש, אוכל בזמנים רגילים, ובעיקר מרבה במגעים חברתיים (המגע החברתי נחשב אות חיצוני יעיל בסנכרון השעון הביולוגי אצל בני-אדם).

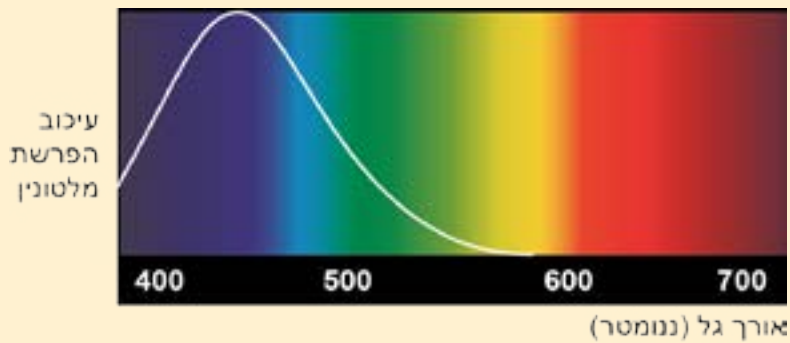
עבודה במשמרות לילה

יעפת לא נמשכת זמן רב, מפני שבסופו של דבר כל הכלים בתזמורת חוזרים לנגן בתיאום. אבל בפני עובדי משמרות, עכברי מועדונים, סטודנטים ו"ציפורי לילה" אחרים עומדת דילמת זמנים חמורה הרבה יותר. גם אם הם משלימים את שעות השינה שלהם במהלך היום, ממשיך השעון הביולוגי המרכזי לשלוט בקצב החיים הבסיסי של אנשים אלו, כלומר התפקודים הבסיסיים שלהם ממשיכים "לישון" בלילות. אפשר להקדים או לדחות את שעות השינה, אבל אי אפשר להקדים או לדחות את השעות בהן עולה רמת ההורמון מלטונין, עולה רמת הקורטיזול או יורדת טמפרטורת הגוף.

בנוסף לכך, גורמים חיצוניים משפיעים גם כן על איפוס השעונים הביולוגיים (איור 24). לוח הזמנים לאכילה או לאימון גופני עשוי להזיז את השעונים ההיקפיים של אנשים אלו באופן משמעותי ממחזור השינה והערות וממחזור האור והחושך. כשגופם חי באזורי זמן שונים ורבים כל כך אין פלא שעובדי משמרות לילה סובלים יותר מן הרגיל ממחלות לב, בעיות עיכול, וכמובן הפרעות שינה. מחקרים רבים מראים שאנשים שעובדים במשמרות לילה לאורך שנים מעורבים יותר בתאונות דרכים. אנשים העובדים במשמרות לילה סובלים גם מהאטה של עד 40% בתהליך חילוף החומרים ובהמשך מהשמנה, ממחלות לב ומסכרת, והם נוטים לפתח הפרעות שינה שיכולות להחמיר לדיכאון. מחקרים שנעשו בשנים האחרונות קבעו ששנים של חיים בלילה ושינה ביום מעלים גם את הסיכון ללקות בסרטן. אצל אחיות בבתי חולים בארה"ב ונשים בצבא דנמרק שעבדו במשמרות לילה, מצאו שכיחות גבוהה יותר של סרטן שד, בהשוואה לכלל האוכלוסייה.

זיהום אור

בסדרת ניסויים ישבו 13 צעירים מול מסכי מחשב. כל נסיין התבונן גם במסך דיודה פולטת אור (LED) שטוח וגם במסך פלואורסצנטי מהדור הקודם, אותה קוביה כבדה שקדמה למסך השטוח. בשני המקרים עקבו אחרי תנועות העיניים והעפעפיים של הנסיינים, ערכו להם מבחני ריכוז ומדדו את כמויות המלטונין בדמם. התוצאות הראו שבישיבה מול המסכים השטוחים הנסיינים היו ערניים יותר, דרוכים יותר, וגופם ייצר פחות מלטונין. החוקרים ייחסו את התוצאות להשפעת האור שקרן ממסכי המחשב. נורות הפלואורסצנטי מקנות לאור גוון לבן-צהוב, בעוד שנורות ה-LED, אלה שמותקנות כיום ברוב מסכי המחשב, הטלוויזיות והטלפונים החכמים, מחזקות את האלמנט הכחול באור. האור הכחול שהמסכים השטוחים מפיצים הוא באורכי גל הדומים לזה של אור השמים הכחול. אור כחול בתחום שבין 430 ל-510 ננומטר נמצא כבעל יכולת ההפרעה הגדולה ביותר בהפרשת מלטונין, כאשר שיא הרגישות הוא סביב 460 ננומטר. כאשר אורכי הגל הם ארוכים ובעוצמות נמוכות יחסית, כמו אור ירח, אור של נורת להט ואור של נורת פלואורסצנטי - אין הפרעה, ובלוטת האיציטרובל ממשיכה לייצר מלטונין (איור 28).



איור 28: השפעת אורך הגל על עוצמת העיכוב בהפרשת מלטונין

הבעייתיות של תאורה מלאכותית בתחום אורך הגל הכחול מתבטאת בשעות החשיכה. תאורה מלאכותית בתחום האור הכחול בשעות הלילה, מפחיתה את הייצור וההפרשה של המלטונין. חוקרים מגדירים את האור המלאכותי שאנו מדליקים בלילה, ובפרט את האור הכחול, כזיהום סביבתי. ארגון הרופאים האמריקאי AMA קיבל החלטה שאור בלילה הוא גורם מזוהם, בגלל הפגיעה שלו בייצור המלטונין ושיבוש המקצבים היממתיים. מספר גדול של מחקרים מוצא קשר ברור בין הפרשות נמוכות של מלטונין לבעיות רפואיות כמו מחלת הסרטן ובעיקר סרטן השד. לאור מידע זה יש המלצות לצמצם את השימוש במנורות LED עשירות בכחול, וזאת למרות החיסכון האנרגטי הבולט לעומת סוגי תאורה אחרים. מומלץ להשתמש במנורות LED לבן או במנורות אחרות בתחום ה-600 ננומטר, שהן פחות חסכוניות אולם אינן מזיקות לבריאות.

אור כחול בשירות השעון הביולוגי

מעצב התאורה הנסמן, שלא ידע להסביר מדוע האור שהתקין במסעדה הלונדונית עורר את הסועדים (קטע הפתיחה בעמ' 38), פנה לפרופ' ראסל פוסטר, ראש בית הספר לרפואת עיניים באוניברסיטת אוקספורד ומומחה לקשר בין האור שנקלט בעיניים לבין השעון הביולוגי הפנימי ומחזור הערות והשינה. ההסבר שנתן ראסל לתופעה הוא: "אור שדומה לזה שמגיע מהשמים הכחולים מותח את המוח כמו קפיץ וגורם לו להעיר את תאי הגוף. מנגנוני הערות והשינה שלנו מנוהלים במידה רבה על ידי צבע האור שנקלט לנו בעיניים. זה מה שמנהל את מחזור היממה, גם בגוף שלנו וגם במוחנו, וזה משהו שאפשר לעשות בו מניפולציות, וכך להשפיע בדרכים רבות על התפקוד האנושי. מסעדת אוקסו היא רק דוגמה אחת".

מומחי תאורה בשיתוף עם חוקרי מוח מיישמים את הגילויים החדשים אודות אור בתחום הכחול גם במטרה לשרת את השעון הביולוגי, ולא רק במטרה להתגבר עליו. אור כחול יכול לשפר את חיינו המודרניים מלאי ההפרעות.

יישום מרשים מתוכנן בתחנת החלל הבינלאומית. אסטרונאוטים ששוהים בתחנה רואים את השמש זורחת ושוקעת מדי שעה וחצי, ו-16 ה"יממות" הקצרצרות שעוברות עליהם מדי 24 שעות משבשות בקביעות את השעון הביולוגי שלהם ומקשות על עמידה בלוח המשימות, שמתוכנן לפי יממות בנות 24 שעות. בימים אלה מפתחים עבור התחנה מערכת נורות שתיצור בה תאורה טבעית של יממה שלמה, באורכי גלים שייקלטו על ידי תאי הגנגליון והמוח כתאורה טבעית. חברת בואינג יישמה את טכנולוגיית האור הכחול כשהתקינה במטוסים היוקרתיים מסדרת בואינג 787 דרימליינר מערכת נורות LED שמחקה במדויק את גליו וצבעיו של האור מהזריחה עד השקיעה.

בתכנון התאורה בקו הרכבת התחתית החדש שנחפר בימים אלה בלונדון, מתכננים להמטיר "מקלחת אור כחול" ברציפי הרכבת, שתסייע להמריץ את המקצב היממתי של הנוסעים בשעות הבוקר המוקדמות, ולעורר אותם בעודם עוברים בין אפלוליות הבוקר המוקדם לתאורה המלאכותית במשרד.

בחזרה לשמיים, כלכליסט, 17.5.12

הפרעות בתזמון השינה

השיבושים הביולוגיים במקצב היממתי הנחקרים ביותר הם אלו הגורמים להפרעות בתזמון השינה. הפרעות בתזמון השינה הן הפרעת שינה הנגרמת מחוסר תיאום בין השעון הביולוגי הפנימי לבין השעון החיצוני, שמכתיב את קצב החיים לאורך היממה. **שעון ביולוגי דחוי** הוא בעיה שהלוקים בה סובלים מחוסר יכולת להירדם בשעות המקובלות ומהירדמות בשעות מאוחרות מאוד או בשעות הבוקר המוקדמות. זו הפרעה תורשתית והיא השכיחה בין הפרעות בתזמון השינה. היא מתפתחת לרוב בגיל ההתבגרות, עם השינויים ברמות ההורמונים בגוף. לא רק תזמון השינה בעייתי אלא גם שעות הריכוז והרעב, שינויי הטמפרטורה הפנימית והפרשות חומרים בגוף כמו הורמון הגדילה. **שעון ביולוגי מוקדם** הוא הפרעה בה אנשים הסובלים מהתסמונת מתקשים לתפקד אחרי השעה שמונה בערב, ומתעוררים לרוב בין שתיים לארבע לפנות בוקר כשהם רעננים. עיקר הבעיה שלהם היא בתפקוד עם משפחה וחברים בשעות הערב. הפרעה חמורה יותר היא הפרעת **השעון המשתנה** המתבטאת כאשר השעון הפנימי משתבש לחלוטין וגורם לשינה וערות לסירוגין במשך כל שעות היממה. ללא חוקיות כלשהיא אין יכולת לתכנן מראש את סדר היום. הפרעה זו יכולה להיגרם מכשל במעבר הקלט של האור מהעין למוח, ולכן היא שכיחה בקרב 70% מהעיוורים. הפרעה זו אינה תורשתית ולרוב היא מופיעה בתגובה לאירוע טראומטי כלשהו. לפעמים ההפרעה קשורה לחבלת ראש שגרמה לזעזוע מוח, או לניתוחים נירוכירורגיים שכללו הסרה של בלוטת האיצטרובל, או למחלות מוח ניווניות כמו אלצהיימר.

הפרעות שינה נוספות הן תוצאה של רמות נמוכות של מלטונין. הפרעה זו שכיחה בגילאים מבוגרים, וממנה נובעת הסברה השגויה שמבוגרים נדרשים למעט שעות שינה. למעשה, מדובר בנדודי שינה בעקבות ניוון של בלוטת האיצטרובל במוח ובעקבות זאת קושי של הגוף לייצר מלטונין בכמות מספקת על מנת להשרות שינה. חלק מהפרעות בתזמון השינה ניתנות לתיקון, לעיתים באופן התנהגותי ולעיתים נדרשת תוספת טיפול תרופתי על ידי מלטונין.



1. שעונים ביולוגיים ומשמעותם

שעונים ביולוגיים מהווים מנגנוני בקרה לתזמון פעילויות בכל הרמות בעולם החי והצומח. פרופ' נגה קרונפלד-שור מהמחלקה לזואולוגיה באוניברסיטת תל אביב חוקרת תחום זה מזה שני עשורים. הרצאתה סוקרת את תחום המחקר ומביאה מחידושי.

2. שטיפת מוח - שינויים בשעון הביולוגי

הרגלי השינה המודרניים עלולים לגרום להשמנה ולשינויים בהתנהגות ובפעילות המוח.

3. פעילות החיידקים שלנו מושפעת מהשעון הביולוגי

הפרעות במחזור שינה-ערות באנשים משפיע על החיידקים שלהם. תאום הדוק בין חיידקי המעי לשעון הביולוגי חשוב במניעת השמנה והפרעות במשק הסוכר.

4. בחזרה לשמיים

בוהק הניאון במשרדים וריצוד מסכי המחשב שיבשו את השעון הביולוגי שלנו, שבמשך מיליוני שנים כיוון עצמו לפי אור השמים הכחול. כעת חוקרי מוח, מומחי עיניים ומעצבי תאורה מפתחים מנורות שישחזרו את האור השמימי וישיבו לנו את אורח החיים שאיבדנו.

5. מתקשים לקום בבוקר? הסיבה מסתתרת אצל זבוב הפירות

מומחי שינה מזהירים בשנים האחרונות מהנזק הגדול שנגרם לאנשי לילה בעולם של בוקר - בלימודים, בעבודה, בבריאות, בהישגים ובהתפתחות.

6. נרדמים ביום וערים בלילה? יש לזה סיבה רפואית

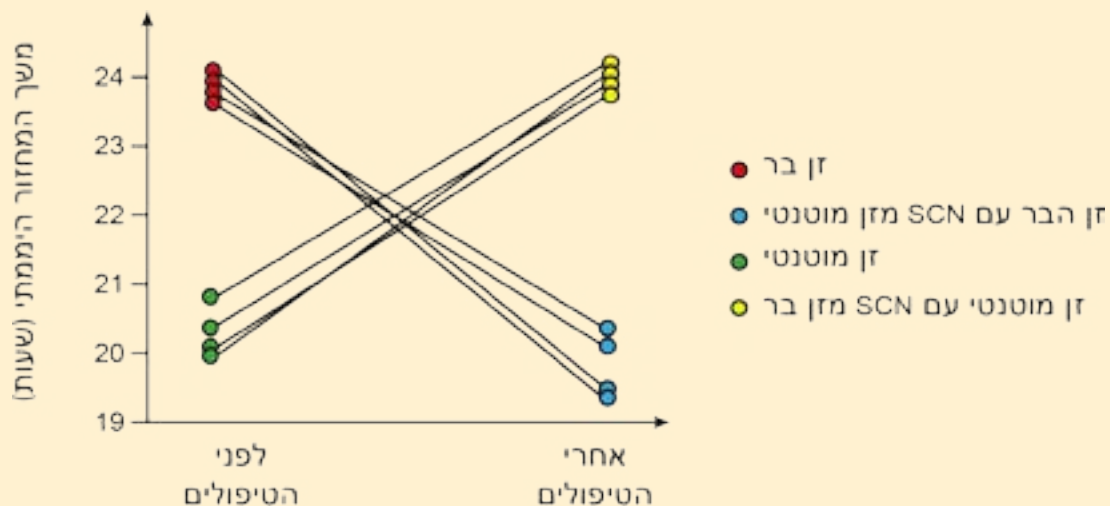
מתקשים להירדם בלילה ומתעוררים רק בצהריים? נרדמים בשמונה בערב מול הטלוויזיה ומקיצים עם הציפורים? ייתכן שאתם סובלים מהפרעות בתזמון השינה - שיבוש ביולוגי ותורשתי בתיאום בין שעון הגוף לשעון החיצוני. הבעיה: חלק מהסובלים מהתופעה לא מאובחנים נכון ומתויגים כבעלי הפרעות קשב וריכוז או כסובלים מבעיה פסיכולוגית.

7. משתמשים בנורות ה-LED החסכוניות? כדאי שתזהרו

פרופ' אברהם חיים מודאג: שלטי ניאון, מנורות רחוב, הטלוויזיה ועוד משחררים אור שהופך לילה ליום - ומשבש את השעון הביולוגי. הוויתור על נורות הלהט בבתי מגביר הסיכון לחלות בסרטן.

שאלות

8. בניסויים בהם הורחק אזור ה-SCN ממוח של חולדות, עכברים ואוגרים, הצליחו חוקרים להוכיח שה-SCN הוא המרכז במוח הנחוץ לקביעת המקצב היממתי של יונקים. החוקרים רצו לבדוק האם ה-SCN הוא המרכז במוח שאחראי על המקצב היממתי. לשם כך הם נעזרו בנייתוחי השתלה של SCN במוח של אוגרים מזן בר ובאוגרים מוטנטיים. משך המחזור היממתי בזן הבר הוא כ-24 שעות, ואצל האוגרים המוטנטיים הוא כ-20 שעות. החוקרים הרחיקו בנייתוח את ה-SCN מאוגרים אחדים מזן הבר ומאוגרים אחדים מוטנטיים. לאחר כארבעה שבועות, הושתל בכל אחד מהאוגרים המוטנטיים SCN מאוגר מזן הבר, ובכל אחד מהאוגרים מזן הבר הושתל SCN מאוגר מוטנטי. החוקרים מדדו את אורך המחזור היממתי באוגרים לפני טיפולי הניתוח וההשתלה ולאחר ההשתלה. התוצאות שהתקבלו מודגמות באיור 29.



איור 29: משך המחזור היממתי באוגרים מזן בר ובאוגרים מוטנטיים לפני הטיפולים ולאחר הטיפולים

- א. תארו את תוצאות הניסוי לפי המודגם באיור 29.
- ב. בהתבסס על נתונים אלה האם ניתן להסיק שה-SCN הוא המרכז במוח האחראי על המחזור היממתי הסביר.
- ג. מה לדעתכם, יהיה המקצב היממתי של אוגר שיוולד לאב ואם מוטנטיים שהושתלו בהם SCN של אוגרים מזן הבר? הסבירו.

9. מה דומה ומה שונה בין השעונים הביולוגיים ההיקפיים לשעון הביולוגי המרכזי?
10. מומחי שינה ממליצים להתחיל את הלימודים בחטיבת הביניים ובחטיבה העליונה בשעה 10 בבוקר. הסבירו מדוע.
11. תארו והסבירו את התהליכים שהתרחשו אצל הסועדים במסעדת אוקסו בתגובה לתאורה החדשה שהותקנה בה (קטע הקריאה בעמ' 38, בפתיחת הפרק).
12. איזה יתרון אבולוציוני יש לבעלי חיים אשר סיגלו לעצמם את היכולת לכוון את פעילויותיהם בהתאם למחזור היממתי? הסבירו.
13. מדענים ברחבי העולם חוקרים את תופעת היעפת במעבדה.
- א. כיצד ניתן לגרום לתופעות המאפיינות יעפת בתנאי מעבדה? הסבירו.
- ב. האם ניתן לגרום ליעפת בחיות ניסוי? הסבירו.
- ג. מהן לדעתכם המטרות של מחקרים כאלה?
- ד. אלו משתנים יבדקו החוקרים? הסבירו.
14. הטיפולים המומלצים לתסמונת השעון הביולוגי הדחוי הם:
- א. חשיפה לאור מלאכותי כחול או לאור שמש למשך 30-90 דקות, בזמן הסמוך לשעת ההשכמה הספונטנית.
- ב. החשכה מלאכותית רבה ככל האפשר בזמן הסמוך לשעת ההירדמות.
- ג. לקיחת כמות קטנה של מלטונין כשעה לפני זמן ההירדמות.
- הסבירו כיצד כל אחד מהטיפולים יכול לסייע לסובלים מהתסמונת.