



שארטרסטרוד

ענת ברנע

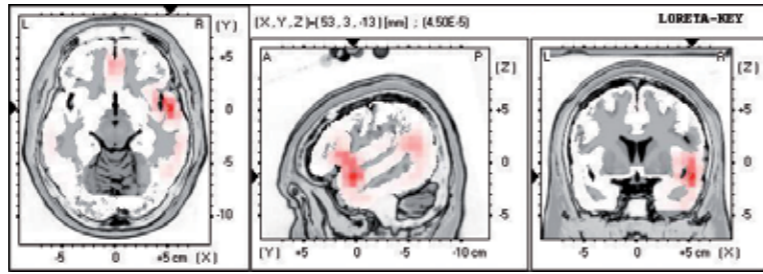
אני, מוחי וצג המחשב

האם אנו יכולים לשלוט על פעילות מוחנו וכך לשפר את תפקודנו? טיפול בליקויים ושיפור תפקודים באמצעות נירופידבק

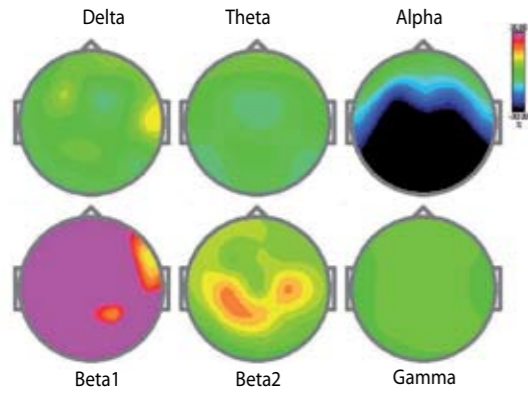
באזור מסוים קשור קשר הדוק בפעילות העצבית של אותו אזור. קיים מתאם גבוה מאוד בין הפעילות העצבית לפעילות המטבולית במוח. מאמץ קוגניטיבי או מאמץ מוחי מכל סוג שהוא מתבטא בשינוי בדפוס הפעילות החשמלית המוחית, ורק בהשגחה של שנייה או שתיים, מופיעים שינויים בקצב חילוף החומרים של רקמת המוח הפעילה. את השינוי הזה בחילוף החומרים (מטבוליזם) אפשר לזהות בטכניקות של דימות, כמו fMRI או PET. את השינויים המיידיים, שמתרחשים באלפיות שנייה בודדות מרגע התחלת האירוע, אפשר לזהות באמצעות רישום EEG או נגזרותיו (ERP). למשל: ניסיון לפתור בעיה מחשבתית כלשהי יגרום לשינוי מיידית בדפוס הפעילות החשמלית, ובהפרש של שנייה עד שלוש שניות יהיה שינוי בהספקת החמצן אל האזור הפעיל, כך שבאופן מידי יהיה שינוי בפעילות החשמלית של האזור, ובהשגחה מסוימת יהיה שינוי בזרימת הדם אליו. פעילות כזאת של אוכלוסיה גדולה של תאים יוצרת שדות חשמליים שאפשריים לקליטה גם ממרחק ניכר ממקור היווצרותם. אפשר לקלוט על פני עור הקרקפת פעילות חשמלית של רשתות תאי עצב מוחיות; זרמי החשמל עוברים מבעד לקרומי המוח והגולגולת ונרשמים באלקטרודה שמוצמדת לעור הקרקפת.

← התפקוד המוחי, הקוגניטיבי, הרגשי והמוטורי הם פועל יוצא של פעילות רשתות של תאי עצב: נוירונים שעובדים באינטראקציה ביניהם, כשכל רשת בנויה ממיליוני נוירונים – זו הדעה המקובלת כיום בין החוקרים. התפקוד של הרשת כמערכת שלמה, והתפקוד של כל יחידה בתוך הרשת, קובעים את המצב המנטלי של האדם, את מצב רוחו, את מצב החשיבה שלו, את המצב הרגעי ואת המצב הכללי שלו. מדובר, אם כן, בפעילות של אוכלוסיות גדולות של תאים, שקצב פעילותם, הריתמוס שלהם – של כל יחידה בנפרד ושל כל הרשת בכללותה, כמו גם הקשר בין היחידות הללו – הוא שקובע את התנהגות האדם. יתר על כן, ערכי המתאמים בין מידת הפעילות של יחידות המבנה של הרשת מכתיבים האם האדם שייך לקבוצה של אוכלוסיה שלה פתולוגיה – כמו סכיזופרניה, תסמונת חוסר קשב, היפראקטיביות (ADHD) או לקות בספקטרום האוטיסטי (ASD), או האם הוא שייך לקבוצה שנחשבת לנורמלית, עם שונות יחסית קטנה בין כל פרט ופרט בקבוצה. הפעילות שעליה מדובר היא פעילות חשמלית של תאי עצב, והפעילות שנובעת ממנה היא הפעילות המטבולית. קצב חילוף החומרים ברקמת מוח

אפשר לשנות את הרשת על ידי גרייה חיצונית: הזרמת זרם חשמלי באמצעים שונים, בהם גירוי חשמלי ישיר מבעד לגולגולת (tDCS - Transcranial Direct Stimulation). הכוונה לטיפול בזרם חשמלי ישיר, שמופק מסוללה (בטריה), ושהעוצמה שלו אינה עולה על 1.5 מיליאמפר; אפשרות אחרת היא טיפול בנזעי חשמל (ECT- Electroconvulsive therapy), שבמהלכם מוזרם זרם רב עוצמה למוח;



← תרשים שמדגים את מקור הפעילות (כתם אדום) במעמקי המוח (תמונה ממחקרי המחברת)



↑ חוסר גדול בתדרי אלפא ועודף ניכר בתדרי בטא - מצב שמאפיין הפרעת חרדה (תמונה ממחקרי המחברת)

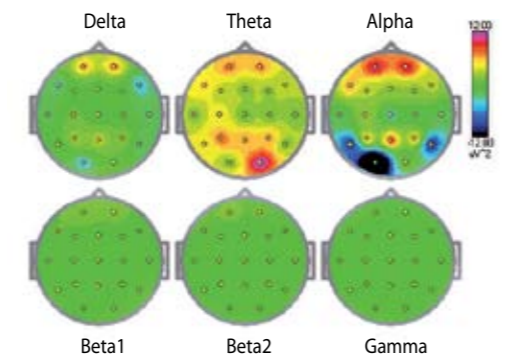
שלהן פתולוגיות שמתאפיינות בעודף של תדרים גבוהים (למשל תדרי בטא), תדרים שמעל 15 הרץ. פעילות מוחית נמוכת-תדר מאפיינת למשל לוקים ב־ADHD או הסובלים מדיכאון.

עודף תדרים גבוהים, תדרי בטא, קיים בסובלים ממופעים שונים של חרדה - תסמונת פוסט-טראומטית (PTSD), חרדה כללית, ולעתים גם מליקוי טורדני-כפייתי (OCD).

נוסף על כך, ישנן כמה קבוצות פתולוגיה, כמו סכיזופרניה ואוטיזם, שמתאפיינות בחוסר או בעודף של מתאם (connectivity) בין אזורי המוח השונים, ולא דווקא בפעילות יתר או בפעילות חסרה בתדר ספציפי; במקרים אלה הקשר בין פעילות אזורים מוחיים שונים מדגים סטייה מהנורמה.

אפשרות שלישית היא השרייה מגנטית מבעד לגולגולת (TMS - Transcranial magnetic stimulation). ואולם אפשר לשנות את תפקוד הרשת גם על ידי למידה! בדרך כלל למידה גורמת לשינוי ארוך טווח או קבוע ברשת העצבית (מה שנחשב כביטוי לפלסטיות של המוח). אפשר ללמד את האדם נושאים ותכנים מסוימים, כפי שעושים בבתי ספר או במסגרות לימודיות אחרות; אפשר גם ללמדו בדרך של חשיפה להתנסויות שונות בחיים, וכן אפשר ללמד את האדם לשנות את קצב הפעילות המוחית שלו באמצעות שיטה שנקראת נירופידבק (וראו: "המוח יכול - נירופידבק כטיפול", גליליאו 46), שמבוססת על טכנולוגיה של קשר מוח-מכונה.

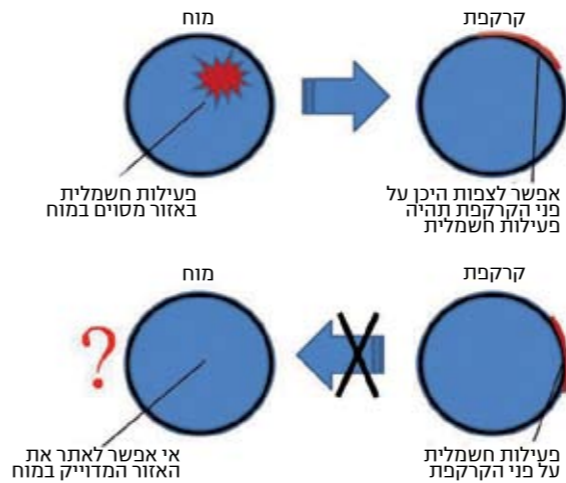
BCI היא טכנולוגיה שבאמצעותה בני אדם או בעלי חיים משפיעים על התנהלות של מחשב, ודרכו על מכשירים שונים בהתאם לצרכיהם, באמצעות קליטת הפעילות המוחית והעברתה למחשב. בדרך כלל מדובר בקליטה של ה־EEG או נגזרותיו, אך לעתים מדובר בקליטה של השינויים בזרימת הדם במוח. פותחו, למשל, טכנולוגיות BCI שמאפשרות לאנשים שאינם יכולים להפעיל את שריריהם להפעיל יד רובוטית כתחליף ליד הבלתי מתפקדת שלהם. טכנולוגיות אלו יכולות



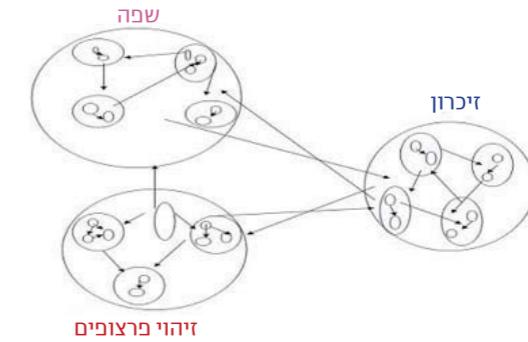
← השוואה ביחס לנורמה של פעילות מוחית אצל ילד בעל ADHD. הצבע הירוק מבטא חוסר סטייה מהנורמה, הצבעים האדומים-כתומים מבטאים עודף פעילות יחסית לנורמה, הצבעים כחול ושחור מבטאים חוסר בתדר הרלוונטי. אפשר לראות שלילד זה עודף תדרי אלפא, ובעיקר תטא, כמעט בכל הראש ובעיקר באזור המצחי (פרונטלי).

מחקרים הראו כבר לפני כמה שנים, שאפשר לשפר באופן ניכר ביצועים מוטוריים של מנתחי עיניים, ואף לשפר מדדים כמו מוזיקליות, יצירתיות וביצוע של נגנים מבצעים, באמצעות אימונים של רבע שעה למשך לא יותר מעשרה מפגשים של נירופידבק

הפעילות בעומק המוח. שיטות אלונקראות LORETA (low resolution electromagnetic tomography). באמצעות התוכנה מזהים אלגוריתמים מתמטיים, בדיוק של סנטימטרים בודדים, פעילות של אזורי מוח עמוקים, ומציירים מפות שמדגימות את מקור הפעילות. רוב הפעילות המוחית אינה נובעת באופן ראשוני מקליפת המוח, ויש עניין רב בזיהוי מיקומן של ההתרחשויות המוחיות הראשוניות. באמצעות רישום EEG אפשר לקבל מידע לגבי מצב המוח במנוחה (EEG ספונטני) ואפשר לרשום את



↑ האופן שבו מתבטאת פעילות באתר מוחי מסוים ברישום EEG, והבעיה ההופכית: איתור המקור המוחי לרישום EEG איור: ענת ברנע



↑מודל של רשתות תאי עצב עם קשרים ביניהן; כל רשת בנויה ממיליוני תאי עצב (ניורונים) איור: ענת ברנע

הרישום החשמלי על פני הקרקפת נקרא EEG (Electroencephalography), והוא מופיע כגלים שאפשר לאפיינם בשני ממדים: ממד התדר, שהוא קצב הפעילות של קבוצת התאים שבה מדובר; וממד העוצמה שבה פועלות קבוצות התאים בתדר המסוים. ממד התדר מבוטא בהרצים (Hz); מחזורים (שנייה) והעוצמה - המשרעת (אמפליטודה), מבוטאת ביחידות מתח, במיקרווולטים.

ה־EEG הוא פעילות שנוצרה בקליפת המוח (הקורטקס). לעתים מקור הפעילות הוא בקורטקס ממש, ולעתים הוא תולדה של פעילות בחלקים עמוקים יותר של המוח המפעילים את קליפת המוח - וכך נוצר שדה חשמלי שאפשרי לרישום מעל פני הקרקפת.

השימוש ב־EEG כשיטת דימות מוחי מאפשרת לעקוב אחר תהליכים מוחיים בהפרדה (רזולוציה) זמנית מצוינת (אלפיות שנייה בודדות); ואולם לגבי המיקום במרחב של הפעילות החשמלית, כלי זה הוא פחות טוב; היכולת לזהות את המקור המוחי לפעילות הנרשמת באמצעות EEG היא פחות טובה מבישיות דימות כמו fMRI ואחרות.

לנתח את ה־EEG

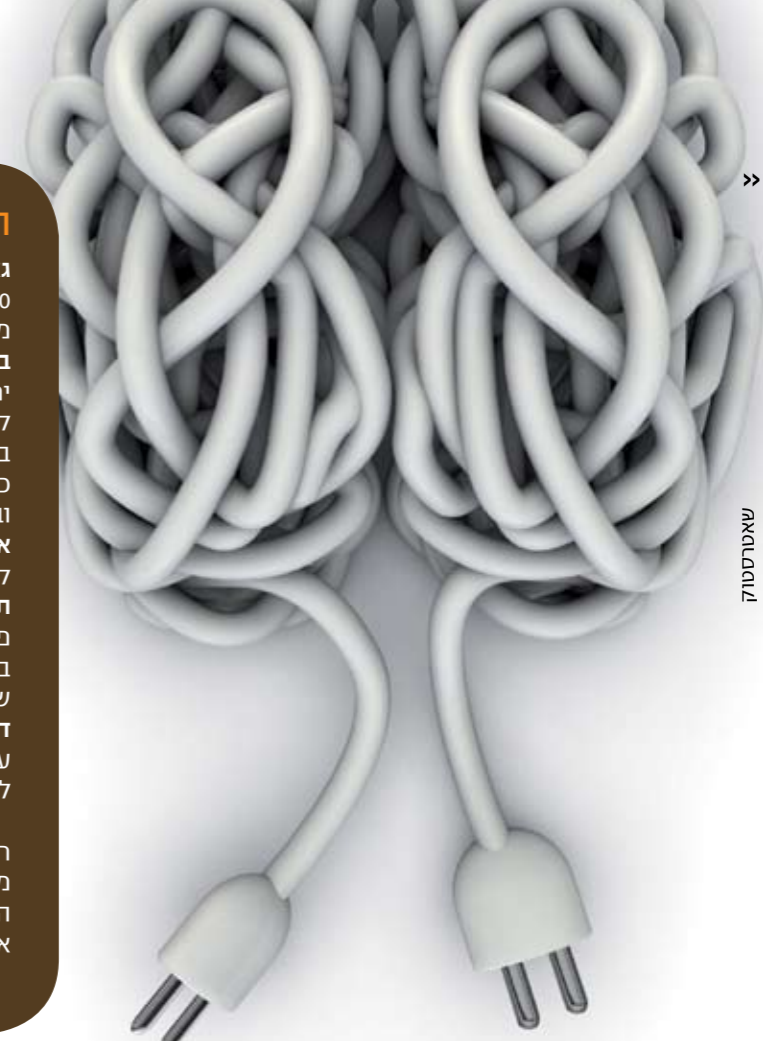
כאמור, קשה לחשב באיזה מבנה מוחי בדיוק התרחשה הפעילות העצבית הנרשמת ב־EEG, כלומר - זיהוי מקור הפעילות (source localization). אמנם אם יודעים באיזה אתר מוחי מתרחשת הפעילות, אפשר לחשב מה יהיה ביטויה על פני הקרקפת, אך קשה יותר לחשב את ההיפך - להסיק מן הרישום מהקרקפת על המבנה הפנימי (זוהי "הבעיה ההופכית", inverse problem).

עם זאת פותחו שיטות מתמטיות שונות שנועדו לפתור את הבעיה ההופכית, כלומר לאתר את מקור

הפעילות תוך כדי ביצוע מטלה, כלומר בפעילות מכוונת, וגם לדגום את התגובה המוחית לגירוי מסוים - אלה הם פוטנציאלים מעוררים, ERP's (Evoked Response Potentials).

קיימות כמה טכניקות נוספות שבאמצעותן אפשר לקבל מידע מפורט לגבי ה־EEG. למשל, אפשר להפעיל על הרישום אלגוריתם שנקרא FFT (Fast Fourier Transform), שבאמצעותו מפרקים את הרישום הגולמי למרכיבי התדר השונים, וכך מקבלים פירוט כמותי מבחינת עוצמה של כל קבוצת תדרים; תהליך כמותי זה נקרא QEEG, quantitative EEG.

יש אוכלוסיות שלהן מצבים פתולוגיים, שמתאפיינים בכך שיחסית לאוכלוסיה נורמלית יש להן עודף פעילות איטית (כגון תדרי תטא או אלפא; וראו מסגרת) - עודף תדרים שהטווח שלהם הוא בין 2 ל-13 הרץ. יש אוכלוסיות



תדרי EEG והקשר למצב מנטלי:

גאמא (Gamma) - פעילות מוחית מאוד מהירה, מעל 30 הרץ. קשורה לקשב גבוה ולתהליך של קישור מידע מאזורי מוח שונים.

בטא (Beta) - גלים בעלי משרעת נמוכה, מהירים יחסית. תדרים שבין 13-30 הרץ. קשורים בפעילות קוגניטיבית, ריכוז וקשב.

בתחום הנמוך של תדרי בטא, תדר שבין 12 ל-15 הרץ כונה SMR (Sensorimotor rhythm) - תדר שקשור ברוגע ובדריכות.

אלפא (Alpha) - גלים איטיים, תדר שבין 8-13 הרץ. קשורים בדרך כלל במצבי רוגע, מצבים של מוח "נח".

תטא (Theta) - גלים איטיים בתחום של 4-8 הרץ. פעילות מוחית בתדרי תטא משקפת מצב של חלימה בהקיץ, ריחוף, חוסר יעילות קוגניטיבית ועם זאת מצב של רוגע.

דלתא (Delta) - גלים בתדר מאוד נמוך - 0.5-3.5 הרץ, עם משרעת מאוד גבוהה בדרך כלל. תדר זה משקף לעתים מצב של ערפול הכרה או ממש חוסר הכרה.

ראוי להדגיש שבכל אדם, בכל מצב, אפשר למצוא מידה כלשהי של גלים במגוון התדרים השונים. העוצמה היחסית של כל אחד מהתדרים הללו משקפת את המצבים המנטליים השונים שתוארו.

ניורופידבק הוא שיטה לוויסות עצמי של פעילות מוחית. המטופל מקבל חיזוקים בכל פעם שהוא מצליח להביא את המוח שלו להרכב גלי מוח שהמטפל הציב לו כמטרה. בצורה הזאת המוח מקבל חיזוקים על "התנהגות" מבוקשת, ו"הערות לסדר" על "התנהגות בלתי רצויה".

נעשה באמצעות שיקוף - משוב (פידבק) - של המצב מבחינת הרכב תדרי ה-EEG או עוצמת זרימת הדם באזור מוחי מסוים ברגע נתון. ניורופידבק הוא שיטה לוויסות עצמי של פעילות מוחית, כשהפעילות המוחית נמדדת ברוב המקרים באמצעות EEG (אך במקרים נדירים יותר באמצעות fMRI). בשיטת הניורופידבק מביאים לתודעת המטופל את הרכב גלי המוח שלו (מצב שבאופן ספונטני נמצא מחוץ לתודעה האנושית) על ידי כך שמראים לו את עוצמת התדרים בצורה של גרף עמודות, או שממירים את ערכי המשרעת למשחק, כך שיהיה לו קל יותר להבין את המידע המוצג. המטופל, מצדו, מקבל חיזוקים ל"התנהגות טובה", בצורה של נקודות או התקדמות של הסרט או המשחק; הוא מקבל חיזוק כל פעם שהוא מצליח להביא את המוח שלו להרכב גלי מוח שהמטפל הציב לו כמטרה. למשל, כל פעם שהמטופל מעלה את עוצמת גלי הבטא ומוריד את עוצמת גלי התטא מעל או מתחת לרף שהציב בפניו המטפל, הוא זוכה בנקודות. אם אינו עומד בדרישה, לא נוספות לו נקודות או שהמשחק נתקע. בצורה הזאת המוח מקבל חיזוקים על "התנהגות" מבוקשת, ו"הערות

לסדר" על "התנהגות בלתי רצויה".

בתהליך שתחילתו שינוי אקראי, והמשכו פעילות מכוונת, מתרחשים השינויים המוחיים הרצויים. בתהליך ניורופידבק אפשר, אם כן, לתת למטופל משוב על מצב ה-EEG שלו, או לחילופין, לתת לו משוב על המטבוליזם המוחי שמשקף בדרך עקיפה את הפעילות המוחית-העצבית, וכך ללמד אותו לשלוט בפעילות. לעומת השימוש ב-fMRI, שהוא יקר מאוד ואפשרי רק במכוני מחקר גדולים, ניורופידבק מבוסס על דגימת EEG, ולכן הוא זמין וזול יותר, ויכול לשמש אוכלוסיות גדולות.

שליטה על פעילות המוח

השאלה היא האם אכן אפשר לשלוט על פעילות תאי העצב במוח באופן ישיר או עקיף, והאם אפשר לעקוב אחר השינויים הללו על ידי מדידה של ה-EEG מהקרקפת. את השאלה הזאת בדיוק שאל את עצמו ג'ו קמייה (Kamiya), פסיכולוג מאוניברסיטת שיקגו בסוף שנות השישים של המאה הקודמת. הוא ערך ניסוי בן שני חלקים: בחלק הראשון ביקש מהנבדקים שלו לעצום עיניים, ובכל פעם שהם שומעים צליל של פעמון לומר אם הם חושבים שהם נמצאים במצב של גלי אלפא מוגברים. הוא נתן להם משוב מילולי: נכון או לא נכון. רוב הנבדקים הצליחו רק כניחוש אקראי; מכיוון שהתשובה היא כן או לא, הסיכוי להגיד נכון הוא 50%. עם זאת היו כמה נבדקים ששיפרו את אחוז הזיהוי ככל שהתנסו במטלה שוב ושוב, וכך התרחש תהליך למידה שהביא אותם לזיהוי גבוה באופן משמעותי.

בחלק השני של הניסוי ביקש קמייה מהנבדקים להיכנס למצב אלפא (רוגע) רק כאשר הפעמון מצלצל צלצול אחד, ולהימנע מהגברת גלי אלפא כשהפעמון מצלצל פעמיים. גם כאן היו כמה נבדקים שהצליחו בצורה משמעותית; ההצלחה שלהם התבטאה בכך שהם הצליחו לשלוט בפעילות של גלי האלפא, להעלות אותם או להורידם על פי אות מהנסיין. ניסוי זה העניק תרומה גדולה לתחום הניורופידבק, ולכל תחום טיפולי שקושר העלאת תדרי אלפא עם רוגע והקטנת מצבי לחץ.

מחקרים אחרים שנעשו על ידי בארי סטירמן (Sterman) מאוניברסיטת UCLA בלוס אנג'לס, ויואל לובר (Lubar) מאוניברסיטת טנסי, שנעשו באותה תקופה לערך, והראו את היעילות הגבוהה שיש לאימונים להעלאת תדרי בטא בטיפול באפילפסיה (וראו "המוח יכול - ניורופידבק כטיפול", גליליאו 46) ובהפרעות קשב וריכוז - ADHD. בסדרת מחקרים שנערכו בשנים האחרונות הראו

החוקרים סרג'ו רואיז ועמיתיו* שאפשר ללמד חולי סכיזופרניה, למשל, לשנות את הפעילות של המבנה המוחי המכונה "האי" (אינסולה), ובאימון שנמשך שבועיים הצליחו להביא לשיפור היכולת שלהם לזהות פרצופים שמביעים גועל; זיהוי רגשות בפרצופים ידוע כבלתי תקין אצל סכיזופרנים.

מחקר אחר הצביע על אפשרות ללמד אנשים באמצעות קבלת משוב לשנות את הפעילות של קדמת רכס החגורה (anterior cingulate), אזור מוחי שקשור בין היתר בפסיכופתולוגיות שונות, ובכך אולי להשפיע על מצבי דיכאון או על מצבים נפשיים בעייתיים אחרים.

ג'והן גרוזילייר (Gruzilier) מהמכללה המלכותית לרפואה ומוזיקה בלונדון, הראה כבר לפני כמה שנים שאפשר לשפר באופן ניכר ביצועים מוטוריים של מנתחי עיניים, ואף לשפר מדדים כמו מוזיקליות, יצירתיות וביצוע של נגנים מבצעים, באמצעות אימונים של רבע שעה למשך לא יותר מעשרה מפגשים של ניורופידבק. שיפורים בביצועים ספורטיביים נמדדו לאחר שספורטאים אומנו לשלוט בריכוז שלהם ולהפחית מצבי חרדה.

במחקר שנעשה על ידי קבוצה מהטכניון בחיפה (ריינר, רוזנגורט וברנע) הראינו שאפשר לשפר את הזיכרון המוטורי לסדרה של תנועות אצבעות, וכי השיפור הזה נשמר למשך שבוע, כל זאת בטיפול חד-פעמי של חצי שעה, שבו עודדנו את הנבדקים להעלות תדרי תטא (4-7 הרץ). נבדקים אחרים באותו מחקר, שהתאמנו על העלאת תדרי בטא, לא הראו שיפור שכוה, מה שמעיד שהתדר שאותו מעלים משפיע על מדדים קוגניטיביים שונים: העלאת תדרי תטא משפרת את הזיכרון המוטורי, תפקוד במצבי לחץ, ומעלה את היצירתיות והמוזיקליות; לעומת זאת העלאת תדרי בטא יכולה לשפר סוגי זיכרון אחרים, להוריד אימפולסיביות ולשפר מדדי קשב.

בעבודה קלינית שאני עצמי עושה כבר יותר מעשר שנים, אני נוכחת לדעת שלגבי אחוז ניכר של מטופלים (אם כי בהחלט לא של כולם) מתרחשים שינויים מרחיקי לכת בהתנהגות, בשליטה באימפולסיביות, בתנועותיות, ולעתים גם במוטיבציה; כל אלו כתוצאה מאימוני ניורופידבק שבהם המטופל לומד לשנות את הרכב גלי המוח שלו - ברוב המקרים להעלות את עוצמת התדרים הגבוהים, שקשורים בעבודה קוגניטיבית ולהוריד את העוצמה של הגלים בעלי התדר הנמוך, הקשורים בחולמנות ובחוסר יעילות תפקודית/קוגניטיבית.

*Ruiz, Lee, Soekadar, Caria, Veit, Kircher, Birbaumer, Sitarum.



ד"ר ענת ברנע היא ניורופיזיולוגית של לקויות למידה, מנהלת את מכון ביוקשב - מכון לשיפור מוחי באמצעות ניורופידבק. anathbarnea@yahoo.com