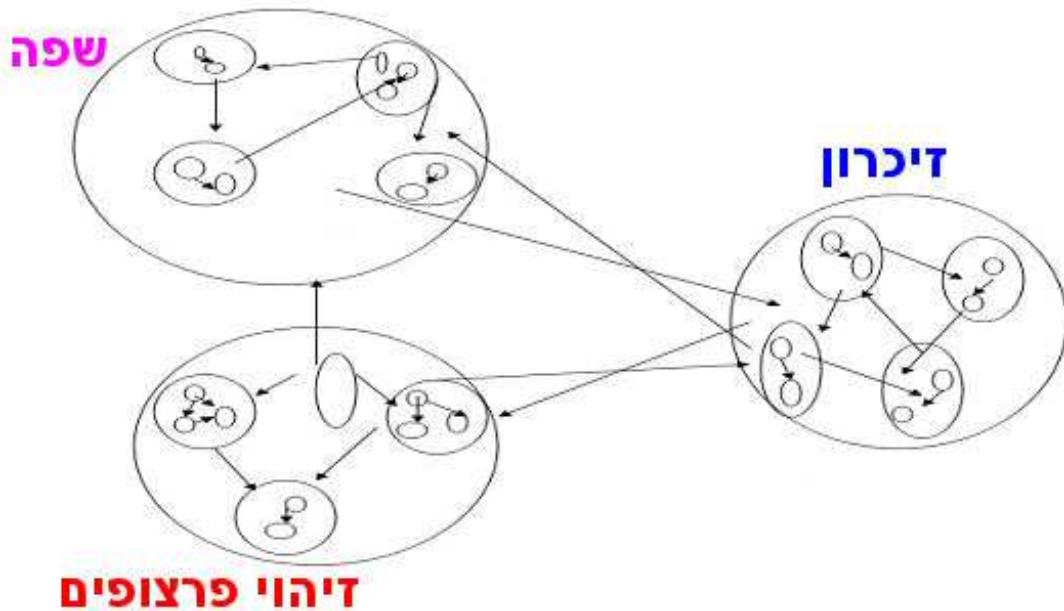


נוירופידבק: אני, מוחי וצג המחשב

טיפול בליקויים ושיפור תפקודים באמצעות נוירופידבק

ד"ר ענת ברנע ביוקשב

התיפקוד המוחי, הקוגניטיבי, הרגשי והמוטורי הם פועל יוצא, כך מקובל כיום בין החוקרים, של פעילות רשתות של תאי עצב – נוירונים, שעובדות באינטראקציה ביניהן; כל רשת בנויה ממיליוני נוירונים. התיפקוד של הרשת כמערכת שלימה והתיפקוד של כל יחידה בתוך הרשת קובעים את המצב המנטאלי של האדם, את מצב הרוח, את מצב החשיבה שלו, את המצב הרגעי ואת המצב הכללי שלו.



מודל של רשתות תאי עצב עם קשרים ביניהן; כל רשת בנויה ממיליוני תאי עצב (נוירונים)

מדובר, אם כך, בפעילות של אוכלוסיות גדולות של תאים, שקצב הפעילות שלהם, 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 והיפראקטיביות (ADHD), או ASD (לקות בספקטרום האוטיסטי), או האם הוא שייך לקבוצה שנחשבת לנורמאלית, עם שונות יחסית קטנה בין כל פרט ופרט בקבוצה.

הפעילות שבה מדובר היא פעילות חשמלית של תאי עצב, והפעילות שנובעת ממנה – הפעילות המטבולית. קצב חילוף החומרים ברקמת מוח באזור מסוים קשור קשר הדוק בפעילות העצבית של אותו אזור – קיים מתאם גבוה מאד בין הפעילות העצבית לפעילות המטבולית במוח.

למשל: ניסיון לפתור בעייה מחשבתית כלשהי יגרום לשינוי מיידי בדפוס הפעילות החשמלית, ובהפרש של שנייה עד שלוש שניות יהיה שינוי בהספקת החמצן אל האזור הפעיל, כך שבאופן מיידי יהיה שינוי בפעילות החשמלית של האזור ובהשהיה מסוימת יהיה שינוי בזרימת הדם אליו.

פעילות כזאת של אוכלוסיה מאד גדולה של תאים יוצרת שדות חשמליים שניתנים לקליטה גם ממרחק ניכר ממקור היווצרותם – ניתן לקלוט על פני עור הקרקפת פעילות חשמלית של רשתות תאי עצב מוחיות; זרמי החשמל עוברים מבעד לקרומי המוח והגולגולת ונרשמים באלקטרודה שמוצמדת לעור הקרקפת.

הרישום החשמלי על פני הקרקפת נקרא EEG (Electroencephalography), והוא מופיע כגלים שניתן 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 לשנייה) והעוצמה – המשׂרעת (אמפליטודה) מבוטאת ביחידות מתח, במיקרו-וולטים.

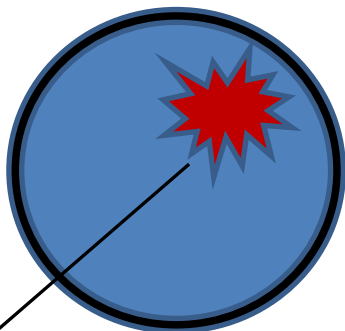
ה-EEG הוא פעילות שנוצרה בקליפת המוח (הקורטקס). לעתים מקור הפעילות בקורטקס ממש, ולעתים היא תולדה של פעילות בחלקים יותר עמוקים של המוח, המפעילים את קליפת המוח, מה שיוצר שדה חשמלי שניתן לרישום מעל פני הקרקפת.

השימוש ב-EEG כשיטת דימות מוחי מאפשר 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 מאשר בשיטות דימות כמו fMRI ואחרות.

איך מנתחים את ה-EEG

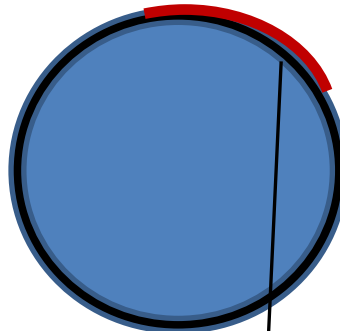
כאמור, קשה לחשב באיזה מבנה מוחי בדיוק התרחשה הפעילות העצבית הנרשמת ב-EEG, כלומר - לזהות את מקור הפעילות (source localization). אמנם, אם יודעים באיזה אתר מוחי מתרחשת הפעילות אפשר לחשב מה יהיה ביטויה על פני הקרקפת, אך קשה יותר לחשב את ההיפך – להסיק מן הרישום מהקרקפת על המבנה הפנימי (זוהי "הבעיה ההופכית",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

מוח

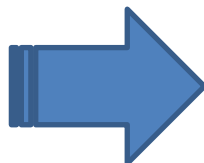


פעילות חשמלית
באזור מסוים במוח

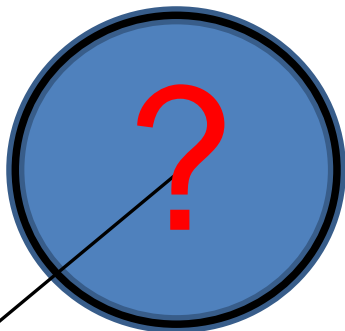
קרקפת



ניתן לצפות היכן על
פני הקרקפת תהיה
פעילות חשמלית

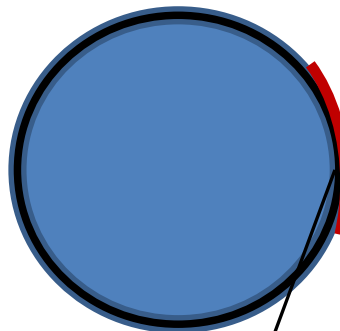


מוח

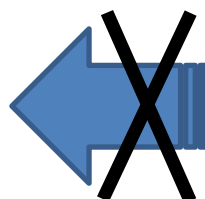


לא ניתן לאתר את
האזור המדויק במוח

קרקפת



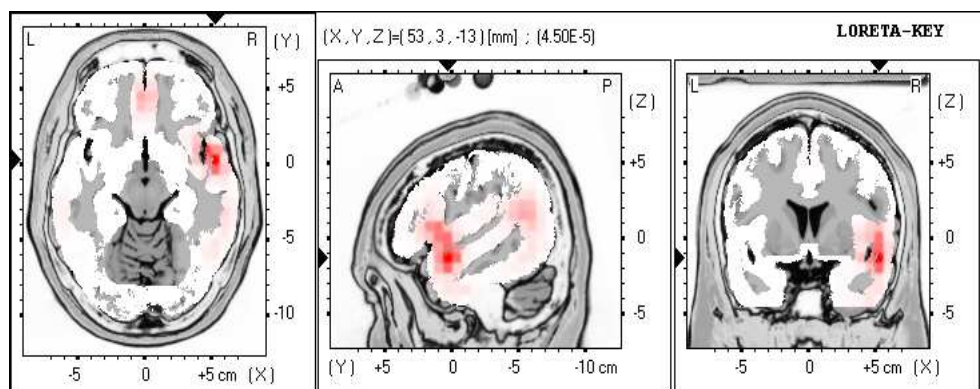
פעילות חשמלית על
פני הקרקפת



כיצד מתבטאת פעילות באתר מוחי מסוים ברישום EEG, והבעיה ההופכית: איתור המקור המוחי לרישום EEG.

עם זאת פותחו שיטות מתמטיות שונות שנועדו לפתור את הבעיה ההופכית, כלומר לאתר את מקור הפעילות בעומק המוח. שיטות אלו נקראות LORETA (low resolution electromagnetic tomography)

באמצעות אלגוריתמים מתמטיים מזהים בדיוק של סנטימטרים בודדים פעילות של אזורי מוח עמוקים ומציירים מפות שמדגימות את מקור הפעילות. רוב הפעילות המוחית אינן נובעות באופן ראשוני מקליפת המוח, ויש עניין רב לזהות את מיקומן של ההתרחשויות המוחיות הראשוניות.



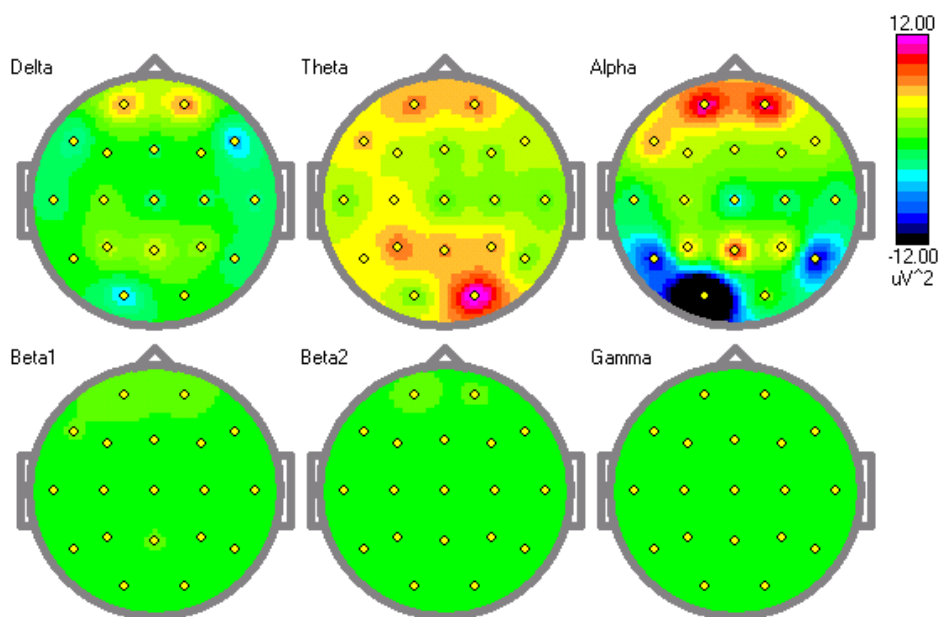
תרשים שמדגים את מקור הפעילות (כתם אדום) במעמקי המוח (תמונה ממחקרי המחברת)

באמצעות רישום EEG אפשר לקבל מידע לגבי מצב המוח במנוחה (EEG ספונטאני) ואפשר לרשום את 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 מספר טכניקות נוספות שבאמצעותן מנתחים ומקבלים 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 quantitative EEG, QEEG.

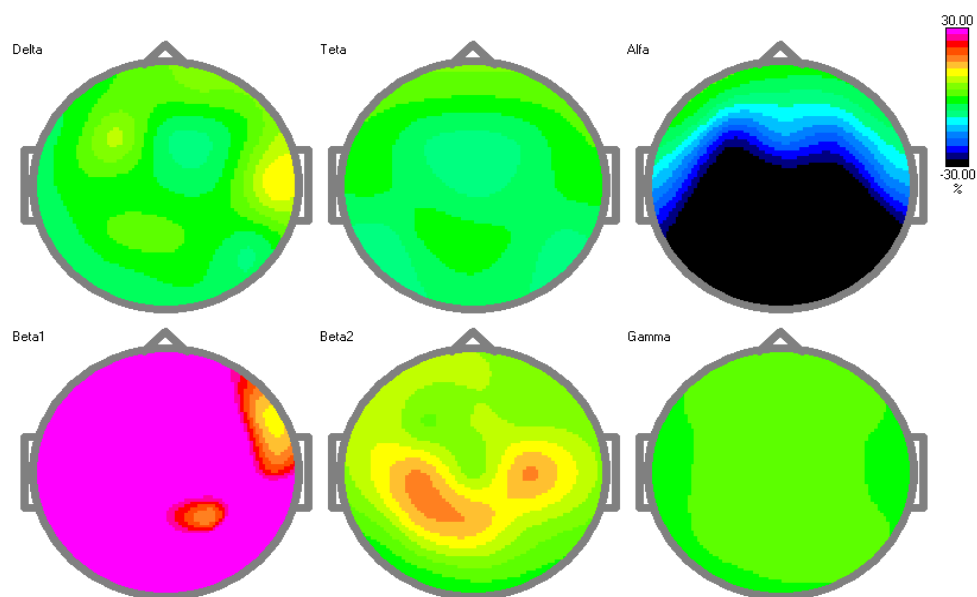
יש אוכלוסיות שלהן מצבים פתולוגיים, שמתאפיינות בכך שיחסית לאוכלוסיה נורמלית, יש להן עודף פעילות איטית (כגון תדרי טיטא או אלפא; וראו תיבה) – עודף תדרים שהטווח שלהם הוא בין 2 ל-13 הרץ. ויש אוכלוסיות שלהן פתולוגיות שמתאפיינות בעודף של תדרים גבוהים (למשל תדרי ביתא), תדרים שמעל 15 הרץ.

פעילות מוחית נמוכת-תדר מאפיינת למשל לוקים ב-ADHD וסובלים מדיכאון.



השוואה ביחס לנורמה של פעילות מוחית אצל ילד ADHD. ירוק מבטא חוסר סטייה מהנורמה, אדומים- כתומים מבטאים עודף פעילות יחסית לנורמה, כחול ושחור מבטאים חוסר בתדר הרלוונטי. אפשר לראות שלילד זה עודף תדרי אלפא ובעיקר טיטא כמעט בכל הראש ובעיקר באזור המצחי (פרונטלי).

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



חוסר גדול בתדרי אלפא ועודף ניכר בתדרי ביתא – מצב שמאפיין הפרעת חרדה (תמונה ממחקרי המחברת)

בנוסף ישן מספר קבוצות פתולוגיה, כמו סכיזופרניה ואטיזם, שמתאפיינות יותר 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.

איר אפשר לשנות את הרשת

הטיפול המקובל כיום בהפרעות של מצב רוח או במחלות פסיכיאטריות ממש הוא טיפול תרופתי. לטיפול תרופתי, עם כל ייתרונותיו, יש כידוע מגבלות ותופעות לוואי ובהן לא נדון כאן.

בהמשך נתמקד בטיפולים לא תרופתיים, שנועדו לשנות את הרשת העצבית, לחזק או להחליש את הקשרים בין יחידות הרשת או את היחידה עצמה, ויש הצופים שאלה הם כנראה העתיד של הפסיכיאטריה.

אפשר לשנות את הרשת על ידי גרייה חיצונית: הזרמת זרם חשמלי באמצעים שונים, ביניהם גירוי חשמלי ישיר מבעד לגולגולת (tDCS - TransCranial Direct Stimulation). הכוונה לטיפול בזרם חשמלי ישיר שמופק מסוללה (בטריה), שהעוצמה שלו אינה עולה על 1.5 מיליאמפר; אפשרות אחרת היא טיפול בנזעי חשמל (ECT - Electroconvulsive therapy), במהלכם מוזרם זרם רב עוצמה למוח; 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 כמו 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: ענת ברנע – "המוח יכול – נירופידבק כטיפול", גליליאו 46, יולי-אוגוסט 2001), אשר מבוססת על טכנולוגיה של קשר מוח-מכונה.

תדרי EEG והקשר למצב מנטלי:

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

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

בתחום הנמוך של תדרי ביטא, 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 במצב רוגע, מצב של מוח "נח".

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

דלתא (Delta) - גלים בתדר מאד נמוך – 0.5-3.5 הרץ, עם משרעת מאד גבוהה בדרך כלל. תדר זה משקף לעתים מצב של עירפול 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 המנטאליים השונים שתוארו.

מוח-מכונה, BCI (Brain Computer Interface)

BCI היא טכנולוגיה שבאמצעותה בני אדם או בעלי חיים משפיעים על התנהלות של מחשב ודרכו על מכשירים שונים בהתאם לצרכים; זאת 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 לסייע לאנשים שנמצאים במצב כלוא בגלל מחלת לו-גהריג (ALS), שאינם יכולים להפעיל את השרירים הרצוניים כך שאינם מסוגלים לדבר או לפעול. באמצעות קליטת אותות מהמוח שלהם והעברתם למחשב שמסוגל לתרגם את אות ה-EEG לאותיות ניתן לחולה לכתוב טכסטים.

גם נירופידבק הוא סוג של טכנולוגיית מוח-מכונה.

נירופידבק הוא תהליך למידה, שבו המטופל לומד לשנות את העוצמות היחסיות של תדרי ה-EEG שאותם הוחלט לשנות, או את קצב המטבוליזם באזור מוחי מסוים. כל זה באמצעות שיקוף – משוב (פידבק) על המצב, מבחינת הרכב תדרי ה-EEG, או עוצמת זרימת הדם באזור מוחי מסוים ברגע נתון. בתהליך שתחילתו שינוי אקראי והמשכו פעילות מכוונת מתרחשים השינויים המוחיים הרצויים.

בתהליך נירופידבק 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, באמצעות מכשיר fMRI וכך ללמד אותו שליטה שבאופן רגיל לכאורה אינה אפשרית.

לעומת השימוש ב-fMRI, שהוא יקר מאוד ואפשרי רק במכונה מחקר גדולים, נירופידבק המבוסס על דגימת EEG הוא לאין ערוך יותר זמין וזול, ולכן יכול לשמש אוכלוסיות גדולות.

נירו-פידבק

השאלה היא האם אכן ניתן לשלוט על פעילות תאי העצב במוח, באופן ישיר או באופן עקיף, והאם אפשר לעקוב אחר השינויים הללו ע"י מדידה של ה-EEG מהקרקפת.

את השאלה הזאת בדיוק שאל את עצמו ג'ו קמייה (Kamiya), פסיכולוג מאוניברסיטת שיקאגו בסוף שנות הששים 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 חמישים אחוזים, עם זאת היו כמה נבדקים ששיפרו את אחוז הזיהוי ככל שהתנסו במטלה שוב ושוב, וכך התרחש תהליך למידה שהביא אותם היה לזיהוי גבוה באופן משמעותי מניחוש אקראי.

בחלק השני של הניסוי ביקש קמייה מהנבדקים שלו להיכנס למצב אלפא (רוגע) רק כאשר הפעמון נותן צלצול אחד, ולהימנע מהגברת גלי אלפא כשהפעמון מצלצל פעמיים. גם כאן היו מספר נבדקים שהצליחו בצורה מאד משמעותית; ההצלחה שלהם התבטאה בכך שהם הצליחו לשלוט בפעילות של גלי אלפא שלהם, להעלות אותם או להורידם על פי אות מהנסיין. הניסוי הזה של ג'ו קמייה תרם תרומה מאד גדולה לתחום של נירופידבק ותחום טיפולי שקושר העלאת תדרי אלפא עם רוגע והקטנת מצבי לחץ.

מחקרים אחרים, שנעשו ע"י בארי סטירמן (Stermen) מאוניברסיטת UCLA בלוס אנג'לס ויואל לובר (Lubar) מאוניברסיטת טנסי, באותה תקופה לערך, הראו יעילות מאד גבוהה של אימונים להעלאת תדרי ביתא בטיפול באפילפסיה (וראו פירוט במאמר "המוח יכול – נירופידבק כטיפול", גליליאו 46) ובהפרעות קשב וריכוז – ADHD.

בשיטת הניורופידיבק מביאים לתודעת המטופל את הרכב גלי המוח שלו (מצב שבאופן ספונטאני 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 יותר קל להבין את המידע המוצג.

המטופל מצידו 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 ביתא ומוריד את עוצמת גלי טיטא, 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".

ניורופידיבק הוא שיטה לוויסות עצמי של פעילות מוחית, כשהפעילות המוחית נמדדת ברוב המקרים באמצעות EEG (אך במקרים נדירים יותר באמצעות fMRI).

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.

***Ruiz, Lee, Soekadar, Caria, Veit, Kircher, Birbaumer, Sitaram**

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

במחקר שנעשה ע"י 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 טיטא (4-7 הרץ). נבדקים אחרים באותו מחקר, שהתאמנו על העלאת תדרי ביתא, לא הראו שיפור שכזה, מה שמעיד שהתדר שאותו מעלים משפיע על מדדים קוגניטיביים שונים: העלאת תדרי טיטא משפרת את הזיכרון המוטורי, משפרת תפקוד במצבי לחץ, ומעלה את היצירתיות והמוזיקליות; לעומת זאת העלאת תדרי ביתא יכולה לשפר סוגי זיכרון אחרים, להוריד אימפולסיביות ולשפר מדדי קשב.

בעבודה קלינית שאני עצמי עושה כבר יותר מעשור שנים, אני נוכחת לדעת שלגבי אחוז ניכר של מטופלים (אם כי בהחלט לא של כולם) מתרחשים שינויים מרחיקי לכת בהתנהגות, בשליטה באימפולסיביות, בתנועתיות היתר ולעתים גם במוטיבציה; כל אלו כתוצאה מאימוני נירופידבק 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.

כותבת המאמר:

ד"ר ענת ברנע היא נירופיזיולוגית של לקויות למידה, מנהלת את מכון ביוקשב – מכון לשיפור מוחי באמצעות נירופידבק anatbarnea@yahoo.com