

מאפייני הלמידה בזמן (temporal) ובמרחב (spatial) של מיומנות מוטורית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון בקרב צעירים

אורית עליון¹, זהר גוב², רינת שמאי²

¹ המחלקה לפיזיותרפיה, הפקולטה למדעי הבריאות, אוניברסיטת אריאל
² סטודנטית לפיזיותרפיה שנה ד', המחלקה לפיזיותרפיה, הפקולטה למדעי הבריאות, אוניברסיטת אריאל

תקציר

רקע: התנועות הרצוניות מוכוונות-המטרה של הגף התחתון נחוצות לתפקוד היום-יומי, למשל, בנהיגה. למרות חשיבותן טרם תוארו שלבי הלמידה ויכולת ההעברה של המיומנות הנרכשת בגף התחתון, לעומת למידת המיומנות הנרכשת בגף העליון. המחקר הזה נועד לאפיין את שלבי הרכישה וההטמעה של המיומנות המוטורית של הגף התחתון בקרב צעירים בריאים.

שיטות: 10 נבדקים, בני 26.1 שנים בממוצע (סטטיית תקן 1.97), תרגלו, בעזרת רגל ימין, מטלה של חזרה על רצף מספרים נתון. האימון כלל ביצוע של 10 בלוקים של רצף מספרים נלמד, 20 שניות כל בלוק, סה"כ 60 חזרות של הרצף. תדירות התנועות נקבעה בעזרת מטרונום, לתדירות של 1.5 הרץ. מספר הרצפים הנכונים ומספר השגיאות נמדדו בארבע נקודות זמן: לפני האימון, מיד אחרי האימון, 24 שעות לאחר האימון ושבע לאחר האימון. לשם בדיקת ההעברה של המיומנות מרגל ימין לרגל שמאל, הושווה הביצוע ברגל ימין לביצוע ברגל שמאל בכל אחת מנקודות הזמן.

תוצאות: נמצא שיפור מובהק במספר הרצפים ברגל ימין לאורך תקופת המחקר ($F_{(3,27)}=40.844, p<0.0001$), וגם במספר השגיאות ($F_{(3,27)}=3.673, p=0.024$). לא הייתה העברה של המיומנות הנלמדת לרגל שמאל (test*leg interaction) במספר הרצפים הנכונים שבוצעו ($F_{(3,27)}=6.288, p=0.002$), אך לא נמצא הבדל מובהק בין הרגליים במספר השגיאות ($F_{(1,435,12,919)}=1.776, p=0.209$).

מסקנות: תהליכי הלמידה של המיומנות המוטורית הרצונית מוכוונת-המטרה של הגף התחתון וגם המגבלות של יכולת ההעברה לגף הלא מאומן דומים למתואר במחקרים קודמים העוסקים בתהליכי למידה של מיומנויות של הגף העליון ובמיומנות שיווי המשקל. התוצאות עשויות לתרום לאופטימיזציה של תוכניות אימון ושיקום אצל אנשים עם לקויות בגף התחתון (למשל, לאחר שבץ מוח); זאת על-ידי הקפדה על תוכן האימון ומספר חזרות מיטבי.

מילות מפתח: גף תחתון, מיומנות מוטורית מוכוונת-מטרה, למידה, הטמעה, ספציפיות, העברה

הקדמה

רוב המחקרים עד כה על תהליכי הלמידה של מיומנות מוטורית רצונית מוכוונת-מטרה בדקו בעיקר את תהליכי הלמידה של הגפיים העליונות; פעולות המאופיינות במיומנות עדינה ומדויקת של האצבעות^{2,1} ומטלות שיווי משקל.³ לעומת הגף העליון, תפקוד הגף התחתון כולל לא רק מרכיב של תנועות אוטומטיות בזמן הליכה ובקרה על שיווי המשקל, אלא גם מרכיב של תנועות מוכוונות-מטרה. קיימים מחקרים רבים בנושא התפקוד של הגף התחתון בהליכה ובשמירה על יציבות בבריאים,⁴ ולאחר פגיעות במערכת העצבים המרכזית,⁵ אך לא קיימים מחקרים בנושא הלמידה של מיומנות מוטורית רצונית מוכוונת-מטרה בגף התחתון, על אף שלתנועות אלה חלק חשוב בתפקודי היום-יום (למשל, לחיצה על הדוושות בזמן נהיגה, כניסה למקלחת, נייגוב הרצפה עם סמרטוט באמצעות הרגל).

לעומת הגף העליון, השימוש בגף התחתון מצריך הנעה של איבר גדול וכבד יותר, וגם מצריך התמודדות עם משימות נוספות של שיווי משקל ושמירה על היציבות.⁶⁻⁸ יתרה מכך, בגף התחתון ישנן יותר תנועות מקדימות (anticipatory) של שיווי משקל, וכאשר מטלה נלמדת בגף התחתון, ייתכן שההתמקדות בשמירה על שיווי המשקל תשנה את תהליך הלמידה.⁹

תהליך הלמידה של מיומנות של הגף העליון,¹⁰⁻¹³ כמו גם תהליך הלמידה של מטלת שיווי המשקל, תוארו בהרחבה.³ בתהליך של יצירת זיכרון פרוצדורלי ארוך-טווח של המטלה הנלמדת ישנם כמה שלבים ברורים והוא נמשך לאורך זמן.^{19-13,11,2,1} בשלב הראשון, המתרחש במהלך האימון (with-in session gains), המכונה "שלב הלמידה בזמן האימון", חל שיפור מהיר בביצועה של המיומנות המוטורית. לאחריו מתרחש השלב השניוני - "שלב האיזון" (פלאטו); זהו השלב שבו הביצוע הוא אחיד, ללא הבדל מובהק בין החזרות.^{22-20,2} ההתקדמות המהירה בשלב הראשון מיוחסת ליכולת ההסתגלות המהירה של מערכת העצבים המרכזית לתפקוד החדש ולשיפור במהירות הולכת האותות העצביים.²³ שלב האיזון באימון הוא תנאי מוקדם לשיפור חבוי (לטנטי) בביצוע המטלה, ללא כל אימון נוסף המתרחש ב"שלב ההתגבשות" (between-session delayed, "off-line" gains - consolidation phase). שלב ההתגבשות מתבטא⁴⁸⁻²⁴ שעות לאחר האימון, ויעילותו תלויה לעיתים בשינה.^{25,24,15,10,1} בשלב

ההתגבשות מתחילים להיווצר קשרים ספציפיים במערכת העצבים המרכזית,^{27,26,1} והוא תלוי במדדים הגופניים של האימון (זוויות, תאוצות ומסלולי תנועה) ובהקשר (קונטקסט) של האימון.¹

לאחר תקופת אימונים ניתן להבחין ב"שלב ההטמעה" (retention) שבו המיומנות שמורה בזיכרון לטווח הארוך במערכת העצבים המרכזית,¹ ספציפית, אינה ניתנת להעברה וניתנת לשליפה בקלות.^{28,19,2} שלב ההטמעה מתבטא בביצוע המיומנות באופן אוטומטי, קבוע וללא שגיאות.¹ במקביל, נוצר ייצוג ספציפי וקבוע של המטלה במערכת העצבים המרכזית באזורים קורטיקלים ותת-קורטיקליים.²⁶ השינויים במערכת העצבים המרכזית בשלב זה - הן תפקודיים והן מבניים - הם ספציפיים, ברמת החומר האפור (באונה הפרונטלית ובקורטקס הפרה-פרונטלי ובפיתול הפרה-מרכזי - pre-central gyrus), בחומר הלבן (במסילה הקורטיקו-ספינלית), הסינפסות והתאים (Long-Term Potentiation - LTP), ברשתות העצביות שהן תוצאה של האימון, באזורים מוטוריים, במוחן ובגרעיני הבסיס.²⁹ ככל שהאימון יתבצע באותו האופן ובאותם התנאים, הספציפיות תהיה גדולה יותר, ללא יכולת העברה של הביצוע של המטלה הנלמדת לביצוע של מטלות אחרות, או לביצוע בגף הלא מאומן.^{8,2,1}

הבנה של המאפיינים של תהליכי הרכישה של מיומנות רצונית של הגף התחתון, של השינויים המתרחשים באימון ושל התהליכים המתרחשים לאחר האימון והספציפיות של המטלה הנרכשת, עשויה לאפשר בניית תוכניות שיקום מיטביות לאימון ולעידוד תנועה מוכוונת-מטרה של הגף התחתון בשיקום לאחר פגיעות במערכת התנועה, למשל שבץ מוח, או פגיעות ראש טראומתיות; זאת כדי לשפר את התפקוד בפעולות היום-יום.

לאור החשיבות של תנועת הגף התחתון, מצד אחד, והשוני במאפייני התנועה בין הגף העליון ובין הגף התחתון, מצד שני, מטרת המחקר היו: (1) לאפיין בזמן (temporal) ובמרחב (spatial) את תהליכי הלמידה של מיומנות מוטורית של הגף התחתון; (2) לבדוק אם המיומנות הנלמדת ניתנת להעברה למיומנות אחרת של הגף התחתון, ו-3) להשוות בין תהליכי הלמידה בזמן ובמרחב של מיומנות מוטורית של הגף התחתון ובין אלה של הגף העליון.

שיטות

משתתפים: במחקר השתתפו 10 סטודנטים, מהם 7 נשים ו-3 גברים, בני 26.1 שנים בממוצע, עם סטיית תקן של 1.97 שנים. 8 מהם היו מן המחלקה לפיזיותרפיה, והאחרים מכלל האוכלוסייה. הם גויסו על-ידי מודעות במדיה האלקטרונית ובשיחה מקדימה שבה הוצג המחקר. הקריטריונים להכללה: ללא מחלות אורתופדיות (שברים, קרעים ברצועות, כאבי גב ופריצות דיסק סימפטומטיות) או נירולוגיות (פגיעת ראש נרכשת או מולדת), כאשר הרגל הימנית היא הרגל הדומיננטית. הקריטריונים לאי-הכללה: מחלת חום בשבוע האחרון, כאבים בזמן ביצוע תנועה של הגף התחתון, תפקוד לקוי של המערכת הווסטיבולרית (סחרחורת בזמן שינוי תנוחה, בחילה והקאות בנסיעה), טיפול תרופתי להפרעות בשינה, טיפול תרופתי להפרעות קשב וריכוז או כל טיפול תרופתי אחר העשוי להפריע לתהליכי למידה, וכל מי שאינו יכול לשבת מעל 20 דקות. המחקר אושר על-ידי ועדת האתיקה של אוניברסיטת אריאל. כל הנבדקים קיבלו הסבר וחתמו על טופס הסכמה מדעת לפני התחלת המחקר.

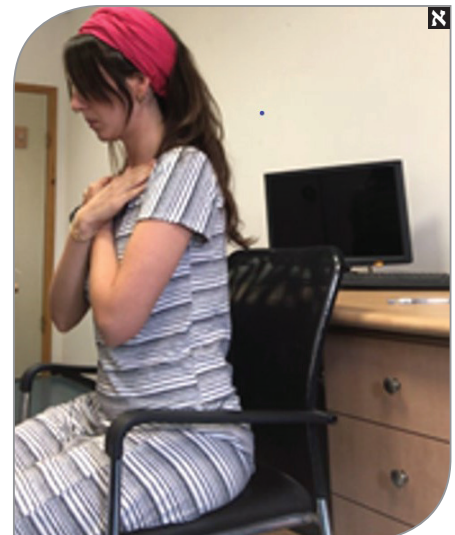
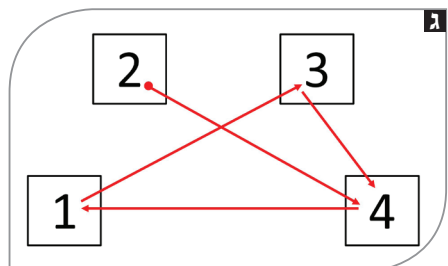
כלים: המטלה הנלמדת: בישיבה על כיסא בגובה סטנדרטי (45 ס"מ), ללא הישענות (איור 1א), המשתתפים התבקשו לגעת בעזרת כף רגל ימין במספרים המסומנים על לוח, אשר מוקמו למרגלות המשתתף (איור 1ב). רצף המספרים שתורגל

הוא 2-4-1-3-4 (איור 1ג).

שיטות עבודה: טרם האימון, וכדי לוודא שהמשתתפים אכן הבינו את המטלה, ביצעו המשתתפים "מטלת חשיפה", שבה נתבקשו לבצע רצף מספרים ביד ימין, עד לביצועו שלוש פעמים רצופות ללא שגיאות. ביצוע רצף המספרים נבדק בארבע נקודות זמן: לפני האימון (ב'1), מיד אחרי האימון (ב'2), 24 שעות לאחר האימון (ב'3) ושבוע לאחר האימון (ב'4). הבדיקה כללה שלושה סטים באורך של 30 שניות כל אחד, עם הפסקה של 30 שניות בין סט לסט. הנבדקים הונחו לבצע את הרצף במהירות מרבית ובדיוק מרבי (מינימום שגיאות). כדי לבדוק את תהליך ההתגבשות (consolidation phase) נערכה בדיקה 24 שעות לאחר תום האימון. כדי לבדוק הטמעה ושימור של המטלה בזיכרון לטווח ארוך (retention) נערכה בדיקה שבוע לאחר האימון. כדי לבדוק ספציפיות לרגל, נבדק ביצוע רצף המספרים בעזרת רגל שמאל, באותן נקודות זמן שבהן נבדק הביצוע של רגל ימין.

האימון כלל 10 סטים באורך 20 שניות כל אחד. תדירות התנועות נקבעה בעזרת מטרונום, לתדירות של 1.5 הרץ (90 פעמים בדקה). בין סט לסט ניתנה הפסקה של 20 שניות. משך האימון, כולל המנוחה, היה 400 שניות. בכל סט בוצעו 6 רצפים שלמים, סה"כ 60 רצפים, שהם 300 תנועות של כף הרגל, ירך וברך ימין.

איור 1: המטלה הנלמדת. א. עמדת המוצא של הנבדק. ב. לוח המספרים המונח למרגלות הנבדק. ג. הרצף הנלמד (2-4-1-3-4) מסומן בחיצים אדומים.



כולל תיקון ע"ש Bonferonni להשוואות מרובות. הושווה הביצוע של כל רגל (ימין ושמאל) בכל אחד מארבעת מועדי הבדיקה (לפני האימון - ב'1, אחרי האימון - ב'2, 24 שעות אחרי האימון - ב'3, ושבוע אחרי האימון - ב'4) (leg*test interaction). כאשר הומוגניות השונות המשותפת הייתה מובהקת (sphericity not assumed), נעשה שימוש במבחן Greenhouse-Geiser.

לבדיקה של ביצוע הרצף בכל רגל בנפרד, לאורך כל תקופת המחקר, נעשה שימוש ב - General Linear Model (GLM) ותיקון ע"ש Bonferonni להשוואות מרובות, לכל רגל. מבחן זה נעשה כדי לעקוב אחר השלבים בתהליך הלמידה בכל רגל, ולא רק אחר התוצאה הסופית של התהליך.

$P < 0.05$ נבחר כערך המובהקות. הנתונים נותחו בתוכנת SPSS 25.

תוצאות

במהלך המחקר נבדקו שלבי הלמידה של המיומנות הרצונית מוכוונת-המטרה של הגף התחתון הימני. ככלל, לאורך תקופת המחקר הודגם תהליך למידה של תנועה מוכוונת-מטרה של הגף התחתון הימני, כפי שנצפה הן בשיפור מובהק במהירות, המבוטאת במספר הרצפים הנכונים בפרק הזמן הנתון (30 שניות) ($F_{(3,27)} = 40.844, p < 0.0001$) והן בדיוק, המבוטא ברידה במספר השגיאות ($F_{(3,27)} = 3.673, p = 0.024$). (גרף 1א' ו-1ב').

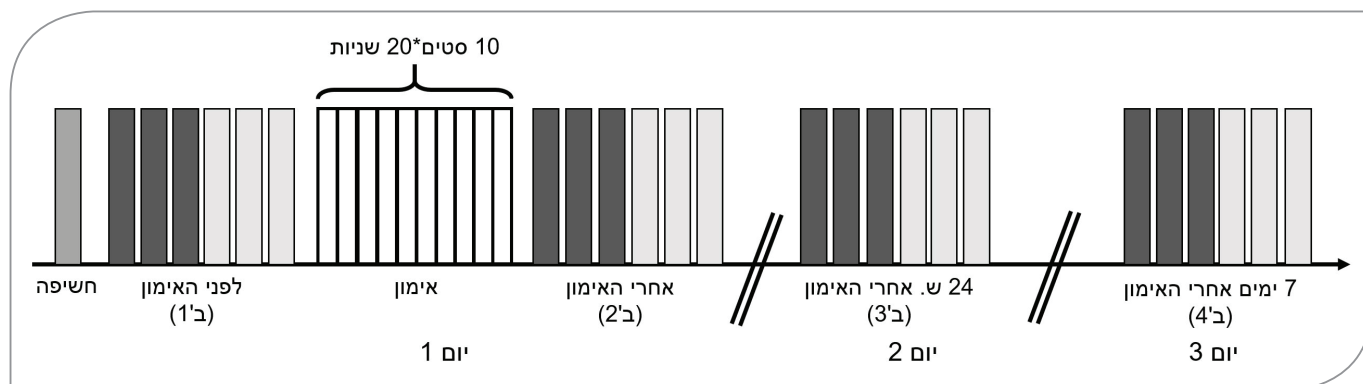
מהלך: (איור 2): לאחר קבלת הסבר וחתימה על טופס ההסכמה מדעת מילאו המשתתפים שאלון בריאות כללית ושאלון הבודק דומיננטיות של רגל - Waterloo Footedness Questionnaire³⁰.

עם סיום שלב החשיפה למטלה, נעשתה הערכה של ביצוע רצף המספרים לפני האימון הן ברגל ימין והן ברגל שמאל (ב'1). לאחר הבדיקה ניתנה הפסקה למשך 5 דקות. האימון בוצע מיד לאחר ההפסקה, ולאחר מכן ניתנה מנוחה למשך 5 דקות, ומיד לאחריה נערכה בדיקה נוספת (ב'2). המשתתפים התבקשו לחזור כעבור 24 שעות ולא להתאמן על רצף המספרים במהלך היום. כעבור 24 שעות נערכה בדיקה נוספת (ב'3) כדי לבדוק את תהליך ההתגבשות ("off-line" consolidation phase). כעבור שבוע נערכה עוד בדיקה (ב'4), כדי לבדוק את תהליך ההטמעה (retention).

המשתתפים שנבדקו היו מהירות הביצוע - מספר הרצפים הנכונים בזמן נתון (30 שניות), ודיוק - מספר השגיאות בעת ביצוע הרצף בזמן נתון (30 שניות). המדדים נבדקו הן ברגל ימין והן ברגל שמאל.

שיטות סטטיסטיות: הממוצעים וסטיות התקן של מספר הרצפים הנכונים ומספר השגיאות בכל אחת מן הבדיקות (לפני האימון, אחרי האימון, יום אחרי האימון ושבוע אחרי האימון) חושבו לכל נבדק.

לבדיקת ההבדל בביצוע הרצף בין שתי הרגלים לאורך תקופת המחקר נעשה שימוש ב - General Linear Model (GLM)



איור 2: תרשים סכמתי של מהלך המחקר. העמודות השחורות - בדיקה של רגל ימין, העמודות האפורות הבהירות - בדיקה של רגל שמאל, העמודות הלבנות - אימון, העמודה האפורה - חשיפה למטלה.

השיפור בביצוע הרצף נצפה גם כעבור שבוע (ב'4), בהשוואה לבדיקה בתום האימון (ב'2), ($p=0.009$) (איור 3א). אבל לא נראה שינוי מובהק במספר השגיאות ($p=0.0311$). נתונים אלה מעידים על תהליך של הטמעה של הידע הנלמד בזיכרון לטווח ארוך (retention phase) (איור 3ב).

ספציפיות של הרגל המאומנת (ימין):

כדי לבחון אם ביצוע הרצף הוא ספציפי לגף התחתון הימני, או, לחלופין, אם הייתה העברה של המיומנות הנלמדת לגף התחתון השמאלי, הלא מאומן, נבדק השינוי בביצוע של רצף התנועות בגף התחתון השמאלי בארבע נקודות הזמן (לפני ואחרי האימון, 24 שעות ו- 7 ימים מתום האימון). באופן כללי, השינוי במספר הרצפים הנכונים היה גבולי לאורך כל תקופת המחקר ($F_{(3,27)}=3.917, p=0.05$) (איור 3א). גם במספר השגיאות לא חל שינוי מובהק סטטיסטית לאורך תקופת המחקר ($F_{(3,27)}=0.566, p=0.642$) (איור 3ב).

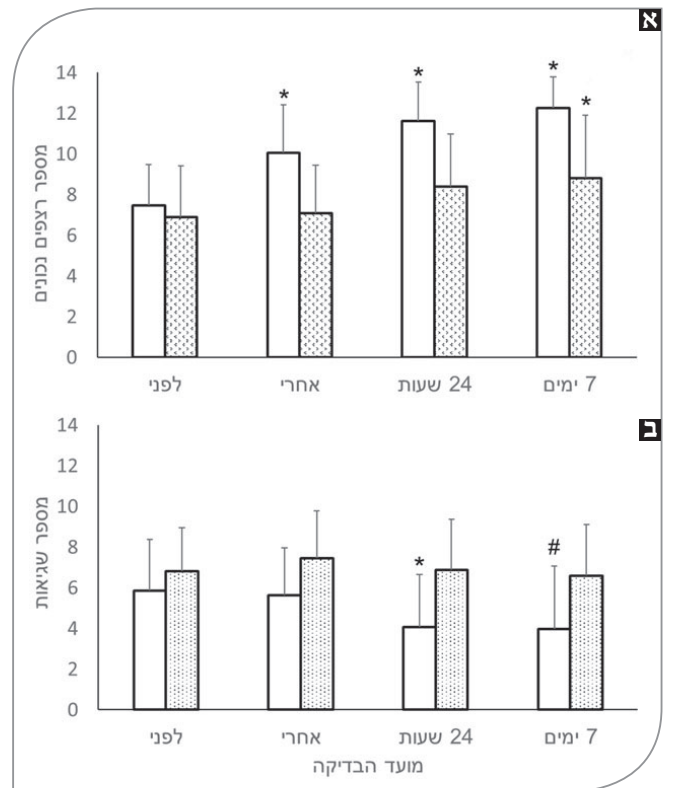
בהשוואה בין הגף התחתון הימני, המאומן, ובין הגף התחתון השמאלי, הלא מאומן (test*leg interaction), נמצא הבדל מובהק בין שתי הרגלים במספר הרצפים הנכונים שבוצעו ($F_{(3,27)}=6.288, p=0.002$), אך לא במספר השגיאות ($F_{(1.435,12.919)}=1.776, p=0.209$) (איור 4א ו-4ב) לאורך תקופת המחקר. תוצאה זו מעידה על ספציפיות של המטלה לגף התחתון המאומן (ימין).

ירידה בשונות היא מדד נוסף המבטא למידה. במחקר זה, למרות ההבדל המובהק בביצוע הרצף של הגף התחתון הימני, לא היה הבדל בשונות (כפי שמבוטאת בסטיית התקן), במספר הרצפים הן בגף התחתון הימני ($F_{(1.610,14.491)}=0.775$), ($p=0.452$) והן בגף התחתון השמאלי ($F_{(3,27)}=1.131, p=0.354$), ללא הבדל בין שתי הגפיים ($F_{(3,27)}=1.263, p=0.307$) (איור 4א). המגמה הייתה דומה גם במספר השגיאות: גף תחתון ימין ($F_{(1.537,13.835)}=0.509, p=0.565$), וגף תחתון שמאל ($F_{(3,27)}=0.048, p=0.986$), ללא הבדל בין גף ימין המאומן ובין שמאל הלא מאומן ($F_{(3,27)}=0.497, p=0.687$) (איור 4ב).

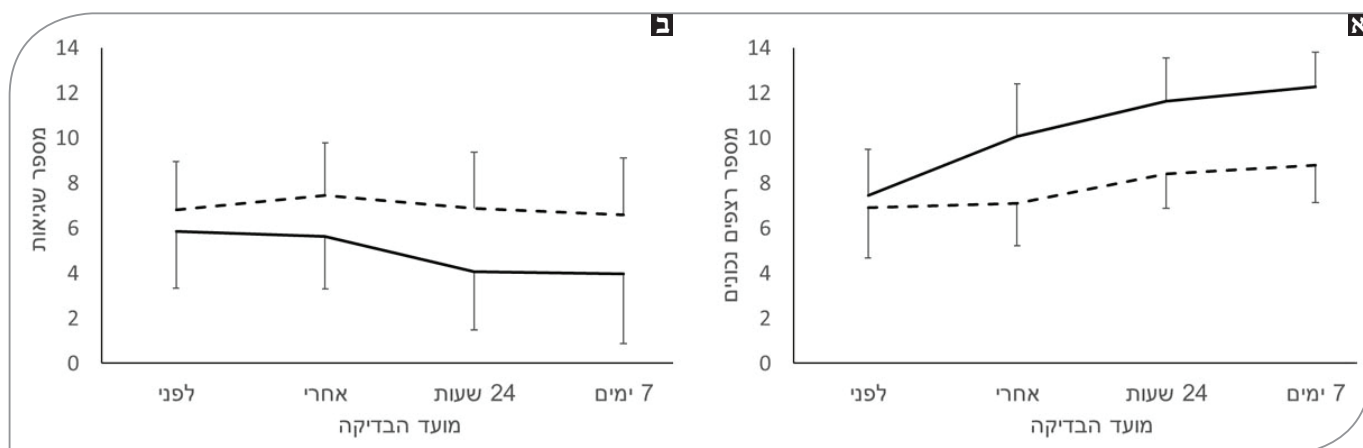
שלבי הלמידה ברגל המאומנת (ימין):

מיד לאחר האימון (ב'2) נמצא שיפור מובהק בביצוע הרצף רק במספר הרצפים הנכונים ($p<0.0001$) (איור 3א), אך לא במספר השגיאות ($p=0.1$) (איור 3ב), בהשוואה לבדיקה שלפני האימון (ב'1).

כעבור יממה מתום האימון (ב'3), נמצאה נטייה לא מובהקת לתהליך התגבשות ("off-line" consolidation phase), שהתבטאה בעלייה במספר הרצפים הנכונים ($p=0.077$) (איור 3א), אך לא בירידה במספר השגיאות ($p=0.16$), בהשוואה לבדיקה מיד עם תום האימון (איור 3ב). בהשוואה לתחילת האימון, נמצא שיפור מובהק במספר הרצפים הנכונים ($p<0.001$) אך לא במספר השגיאות ($p=0.297$).



איור 3: ביצוע הרצף הנלמד לאורך תקופת המחקר: א. מספר הרצפים הנכונים, ב. מספר השגיאות. העמודות הלבנות - רגל ימין, העמודות המנוקדות - רגל שמאל. לפני: ב'1 - לפני האימון, אחרי: ב'2 - אחרי האימון, 24 שעות: ב'3 - 24 שעות אחרי האימון ו- 7 ימים: ב'4 - שבוע ימים לאחר האימון. סרגלי השגיאה מייצגים את סטיית התקן הממוצעת בכל רגל. * - $p<0.05$, # - $p<0.055$.



איור 4: אינטראקציה בין רגל ימין ובין רגל שמאל של מספר הרצפים הנכונים (א') ומספר השגיאות (ב') לאורך תקופת המחקר. הקו השחור - רגל ימין, הקו המקווקו - רגל שמאל. סרגלי השגיאה מייצגים את סטיית התקן הממוצעת בכל רגל.

האימון ללא תלות באימון נוסף, ו"שלב ההטמעה" של הידע בזיכרון לטווח ארוך (retention). שלבי למידה דומים תוארו בעבר, והוצעו כמאפיינים של רכישת מיומנות מוטורית (ידע פרוצדורלי) ושל התגבשות המיומנות (זיכרון פרוצדורלי) בתהליך הלמידה של מיומנות מוטורית-פרספטואלית.^{3,2,1} לפיכך, גם תוצאות המחקר הזה מאששות קיומו של מאגר משותף של מנגנונים עצביים המאפשרים יצירת זיכרון פרוצדורלי. מנגנונים אלה מכילים מערכות שונות במערכת העצבים המרכזית, והם הבסיס של רכישת מיומנות מוטורית תלוית-ניסיון (אימון).¹

התוצאות הנוכחיות מהוות תימוכין לכך שמאפייני הלמידה של המיומנות המוטורית מוכוונת-המטרה של הגף התחתון דומים לאלה של הגף העליון^{2,1} ולמאפייני הלמידה של מיומנות שיווי המשקל³ בקרב צעירים. לפי המודל הכללי של רכישת מיומנות פרוצדורלית,^{25,17,1} שיפור מהיר בביצוע במהלך האימון משקף את ההיווצרות של תהליכי עיבוד ספציפיים, כולל תהליכי אדפטציה, ניסוי וטעייה וכיוונון (tuning up) של התהליכים החדשים שנוצרו; תהליכים שמובילים לביצוע יציב ויעיל של המטלה אם האימון היה יעיל מספיק.²¹ השיפור המהיר בזמן ביצוע המטלה יכול להיות סימן לכך שהמטלה הייתה חדשה עבור המשתתפים.^{2,1} אפקט "המטלה החדשה" נתמך על-ידי עדויות להתארגנות מוקדמת של מסלולים קורטיקליים,

דיון

במחקר זה אופיינו תהליך הלמידה של מיומנות מוטורית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון. נמצא כי מאפייני הלמידה דומים למאפייני הלמידה של מיומנויות הגף העליון.^{2,1} ומיומנויות שיווי המשקל.³

התוצאות של מחקר זה מראות שאימון יחיד של 400 שניות, שכלל 130 חזרות של הרצף הנלמד (650 תנועות של הגף התחתון), שפעל תהליך למידה משמעותי בקרב צעירים, שהתבטא לא רק בעלייה במספר הרצפים הנכונים שבוצעו מיד לאחר תום האימון, אלא גם ביצירה של זיכרון לטווח ארוך שבוע לאחר תום האימון. לפיכך, ניתן להסיק שמבנה האימון ומספר החזרות בו היו יעילים מספיק כדי לשפעל לא רק שיפור בביצוע בזמן האימון אלא גם שינויים לאחר האימון (off-line consolidation phase) ותהליך של הטמעת הידע לטווח ארוך (retention phase), כפי שהתבטא בשיפור מובהק בביצוע הרצפים לאחר שבוע.

תוצאות המחקר מצביעות על כמה שלבים מובהקים בתהליך הלמידה של מיומנות מוטורית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון: "למידה במהלך האימון", "שלב ההתגבשות", off-line consolidation phase, "שבו השיפור מתרחש לאחר

של המרכיבים הפיזיקליים של המטלה אלא גם בהקשר של המטלה הנלמדת.^{28,8,3-1} דפוס זה של ספציפיות של המטלה הנלמדת דומה לדפוס שהודגם בלמידה של רצף תנועות אצבעות^{36,2,1} וגם ללמידה של מיומנויות מורכבות יותר.^{36,28,3}

בביצוע תנועה רצונית מוכוונת-מטרה קיימים יחסי גומלין (trade-off) בין מהירות הביצוע ובין הדיוק; תנועות מהירות הן פחות מדויקות.³⁷ לפי המודל של Hikosaka וחבריו, מיומנויות מוטוריות נרכשות ונשמרות בזיכרון בשני אופנים עצמאיים אך מקבילים: מהירות ודיוק.³⁸ המודולציה של יחסי הגומלין בין מהירות ודיוק בתנועה מתרחשת כנראה ב-pre Supplementary Motor Cortex.³⁹ במחקר זה אמנם לא היה שינוי במספר השגיאות במהלך האימון אך מספרן ירד באופן מובהק בתום תקופת האימון. תוצאות אלה יכולות להעיד על קצב שונה של למידת מאפייני המהירות של המטלה לעומת מאפייני הדיוק.

מגבלות המחקר

תוצאות מחקר זה הן ספציפיות לאוכלוסייה הנבדקת ולא ניתן להכליל אותן על אוכלוסיות נוספות. לפיכך, מומלץ להגדיל את המדגם, ולבדוק את מאפייני הלמידה בקרב מבוגרים בריאים וגם באוכלוסיות עם לקויות של מערכת העצבים המרכזית. נוסף על כך, לא ניתן להכליל את התוצאות האלה על אימון של הגף התחתון לגבי תפקודים אחרים, כמו הליכה או עלייה במדרגות. לכן מומלץ לבדוק את מאפייני הלמידה של הגף התחתון גם בתפקודים אלה.

סיכום

מאפייני הלמידה של מיומנות רצונית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון הודגמו במחקר זה. יתרה מכך, תוצאות מחקר זה מציעות דמיון בין מאפייני הלמידה וההטמעה בזיכרון של מיומנות רצונית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון ובין מאפייני הלמידה של מיומנות רצונית-מוכוונת מטרה של הגף העליון וגם של רכישת מיומנות שיווי המשקל. המשמעות הקלינית היא מתן כלים מובנים לתוכניות טיפול הכוללות למידה של מיומנויות רצונית מוכוונת-מטרה של הגף התחתון.

המקשרים בין ההמיספרות, ומקדמים למידה של רצף מוטורי במהלך אימונים חוזרים¹⁷ וגם על-ידי עדויות לאקטיבציה בו-זמנית של רשתות הנורונים במסלול cortico-cerebellar ו-cortico-striatal.^{31,13}

מדד נוסף המעיד על למידה הוא ירידה בשונות הביצוע, כפי שמבוטאת בירידה בסטיית התקן של הביצוע.²⁰ העובדה שלא הייתה ירידה בשונות בעקבות האימון, וגם העובדה שלא היה הבדל בשונות בין הרגל המתאמנת (ימין) ובין הרגל הלא מאומנת (שמאל), מעידות על כך שתהליך הלמידה טרם הושלם והמטלה עדיין אינה אוטומטית ויציבה בזיכרון.^{32,20} יצירת הזיכרון הפרוצדורלי למטלה רצונית הוא תהליך הנמשך לאורך זמן ודורש כמה אימונים.^{13,2,1} במחקר זה בוצע אימון אחד בלבד. נוסף על כך, מספר החזרות שבוצעו בתרגול היה נמוך ממספר החזרות שבוצעו בגף העליון כפי שדווח במחקרים השונים.^{2,1} בשל ההתעייפות של הנבדקים במהלך האימון.

הביטוי של שיפור מושהה בביצוע (delayed gains)²⁴ שעות לאחר האימון, כפי שהתבטא בעלייה במספר הרצפים הנכונים, משוּיך כנראה לתהליך התגבשות חבוי (לטנטי) של הזיכרון; תהליך שבו נוצר ייצוג עצבי משופר של המטלה, יחד עם שינויים מבניים בסינפסות.^{33,25,15} לפיכך, תוצאות מחקר זה תומכות ברעיון ששלב התגבשות חבוי (consolidation phase) של הזיכרון מתרחש בזמן רכישת המיומנות המוטורית מוכוונת-המטרה של הגף התחתון. רעיון זה נתמך על-ידי הממצא שהידע שנרכש באימון והידע המושהה הנוסף כעבור 24 שעות מן האימון נשמר. תבנית זו, הטמעה של הזיכרון לאורך זמן, מתאימה לממצאים בנושא מאפייני הלמידה של מיומנות מוטורית שתוארו בעבר.^{14,3-1}

תוצאות מחקר זה מעידות שפרוטוקול האימון היה מספיק כדי לגרום לא רק לשיפור בביצוע במהלך האימון, אלא גם לשינויים חבויים ארוכי-טווח, שהתבטאו בשלב ההתגבשות^{35,34,17,16,12,1} ויצרו זיכרון פרוצדורלי (זיכרון של "איך לבצע") ארוך טווח.^{35,34,24,17,16,12,2,1}

תוצאות מחקר זה מצביעות על המגבלות של יכולת ההעברה של הידע הנלמד באימון מן הרגל המאומנת (ימין) לרגל הלא מאומנת (שמאל). מגבלה זו של יכולת ההעברה, או לחלופין, הספציפיות של התהליך החדש, מתקיימת לא רק בהקשר

מקורות

1. Karni A, Meyer G, Rey-Hipolito C, et al. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1998;95(3):861-8.
2. Korman M, Raz N, Flash T, et al. Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100(21):12492-7.
3. Elion O, Sela I, Bahat Y, et al. Balance maintenance as an acquired motor skill: Delayed gains and robust retention after a single session of training in a virtual environment. *Brain Res*. 2015;1609(1).
4. Muehlbauer T, Gollhofer A, Granacher U. Associations between measures of balance and lower-extremity muscle strength / power in healthy individuals across the lifespan: a systematic review and meta-analysis. *Sport Med*. 2015;45(12):1671-92.
5. Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review. *Lancet Neurol*. 2009;8(8):741-54.
6. Sela I, Karni A. Differences in learning volitional (manual) and non-volitional (posture) aspects of a complex motor skill in young adult dyslexic and skilled readers. *PLoS One*. 2012;7(9).
7. Kurtzer I, Herter TM, Scott SH. Random change in cortical load representation suggests distinct control of posture and movement. *Nat Neurosci*. 2005;8(4):498-504.
8. Keshner E a, Kenyon R V, Langston J. Postural responses exhibit multisensory dependencies with discordant visual and support surface motion. *J Vestib Res*. 2004;14(4):307-19.
9. Yu S, Huang C. Improving posture-motor dual-task with a supraposture-focus strategy in young and elderly adults. *PLoS One*. 2017;1-16.
10. Born J. Slow-wave sleep and the consolidation of long-term memory. *World J Biol Psychiatry*. 2010;11(SUPPL. 1):16-21.
11. Stickgold R, Walker MP. Memory consolidation and reconsolidation: What is the role of sleep? *Trends Neurosci*. 2005;28(8):408-15.
12. Robertson EM. Off-line learning and the primary motor cortex. *J Neurosci*. 2005;25(27):6372-8.
13. Doyon J, Penhune V, Ungerleider LG. Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*. 2003;41(3):252-62.
14. Meital N, Korinth SP, Karni A. Plasticity in the adult oculomotor system: Offline consolidation phase gains in saccade sequence learning. *Brain Res*. 2013;1528:42-8.
15. Korman M, Doyon J, Doljansky J, et al. Daytime sleep condenses the time course of motor memory consolidation. *Nat Neurosci*. 2007;10(9):1206-13.
16. Sosnik R, Hauptmann B, Karni A, et al. When practice leads to co-articulation: The evolution of geometrically defined movement primitives. *Exp Brain Res*. 2004;156(4):422-38.
17. Maquet P, Laureys S, Perrin F, et al. Festina Lente: Evidences for fast and slow learning processes and a role for sleep in human motor skill learning. *Letter to Neuroscience*. 2003;237-9.
18. Hikosaka O, Nakahara H, Rand MK, et al. Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends Neurosci*. 1999;22(10):464-71. Available from:
19. Shadmehr R, Brashers-Krug T. Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci*. 1997;17(1):409-19.
20. Adi-Japha E, Karni A, Parnes A, et al. A Shift in task routines during the learning of a motor skill: group-averaged data may mask critical phases in the individuals' acquisition of skilled performance. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2008;34(6):1544-51.
21. Hauptmann B, Karni A. From primed to learn: The saturation of repetition priming and the induction of long-term memory. *Cogn Brain Res*. 2002;13(3):313-22.
22. Karni A, Sagi D. The time course of learning a visual skill. *Nature*. 1993;365:250-2.
23. Dayan E, Cohen LG. Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*. 2011;72(3):443-54.
24. Fischer S, Hallschmid M, Elsner AL, et al. Sleep forms memory for finger skills. *Proc Natl Acad Sci*. 2002;99(18):11987-91.
25. Walker M.P. Refined model of sleep and the time course of memory formation.pdf. 2003;(2005):1-51.
26. Katak SS, Winstein CJ. Learning-performance distinction and memory processes for motor skills: A focused review and perspective. *Behav Brain Res*. 2012;228(1):219-31.
27. Balas M, Roitenberg N, Giladi N, et al. When practice does not make perfect: Well-practiced handwriting interferes with the consolidation phase gains in learning a movement sequence. *Exp Brain Res*. 2007;178(4):499-508.
28. Keetch KM, Lee TD, Schmidt RA. Especial Skills: Specificity embedded within generality specificity effects in motor control. 2008;723-36.

29. Chang Y. Reorganization and plastic changes of the human brain associated with skill learning and expertise. *Front Hum Neurosci.* 2014;8:1-7.
30. Chapman JP, Chapman LJ, Allen JJ. The measurement of foot preference. *Neuropsychologia.* 1987;25(3):579-84.
31. Orban P, Peigneux P, Lungu O, et al. Functional neuroanatomy associated with the expression of distinct movement kinematics in motor sequence learning. *NSC.* 2011;179:94-103.
32. Chein JM, Schneider W. Neuroimaging studies of practice-related change: fMRI and meta-analytic evidence of a domain-general control network for learning. *Cogn Brain Res.* 2005;25(3):607-23.
33. Xu T, Yu X, Perlik AJ, et al. Rapid formation and selective stabilization of synapses for enduring motor memories. *Nature.* 2009;462(7275):915-9.
34. Wright DL, Vaculin A. Offline improvement during motor sequence learning is not restricted to developing motor chunks. *J Mot Behav.* 2010;42:37-41.
35. Robertson EM. From creation to consolidation: a novel framework for memory processing. *PLOS Biol.* 2009;7(1):0011-9.
36. Rozanov S, Keren O, Karni A. The specificity of memory for a highly trained finger movement sequence: Change the ending, change all. *Brain Res.* 2010;1331:80-7.
37. Duarte M, Freitas S. Speed - Accuracy trade-off in voluntary postural movements. *Motor Control.* 2005;180-96.
38. Hikosaka O, Nakamura K, Sakai K, et al. Central mechanisms of motor skill learning. *Curr Opin Neurobiol.* 2002;12:217-22.
39. Bogacz R, Wagenmakers E, Forstmann BU, et al. The neural basis of the speed - accuracy tradeoff. *Trends in Neuroscience* 2009;33(1):10-6.

The time-course characteristics of learning a lower extremity voluntary task

Orit Elion¹, Zohar Gov², Rinat Shamay²

¹ Department of Physiotherapy, Faculty of Health Sciences, Ariel University, Israel

² Physiotherapy student 4th year, Department of Physiotherapy, Faculty of Health Sciences, Ariel University, Israel

Abstract

Introduction: Volitional movements of the lower extremity (LE) are essential for daily activities (e.g., driving). Despite its relevance, and in contrast to the upper extremity (UE), the time-course phases and transfer characteristics of the LE have not been described. The aim of this study was to characterize the phases in the acquisition and retention of a LE volitional skill.

Methods: Ten young adults, mean age 26.1 (SD = 1.97) years, participated in a single training session consisting of 130 repetitions performed in ten 20-second blocks. Their performance level, measured by the number of correct sequences and the number of errors, was tested before and immediately after the training session, as well as 24 hours and one week after the training session. Transfer of the acquired gains from the right to the left LE was tested at the same four time-points.

Results: There was a significant increase in the number of correct sequences of the right LE, ($F(3,27) = 40.844$, $p < .0001$) over the study period and a decrease in the number of errors ($F(3,27) = 3.673$, $p = .024$). The gains in the number of correct sequences were specific and did not transfer to the left LE (test*leg interaction, $F(3,27) = 6.288$, $p = .002$). There was no significant

difference between legs in the number of errors (test*leg interaction, $F(1.435,12.919) = 1.776$, $p = .209$).

Conclusions: The time-course of learning a LE volitional skill, as well as the limitation of generalizing the gains to the untrained LE are in line with previous studies of manual movement of the UE and of balance skills. The results may contribute to the optimization of training programs for individuals with LE impairments (e.g., stroke).