



תוצאות מחקר בנושא:

רובוטים חברתיים בסיוע מטופלים לאחר שבץ - מחקר התערבות מבוקר, עם חלוקה רנדומלית לקבוצות*

פרופ' שלי לוי-צדק

מאי 2024

מחקר זה מומן על ידי המוסד לביטוח לאומי





1. סקירת ספרות :

המחקר המוצע נועד לפתח מערכת רובוטית כדי לסייע בשיקום של ליקויים בתפקוד הגפה העליונה בעקבות שבץ מוחי. זאת על מנת להגדיל את היקף האימון שהמטופל מבצע לאחר הפגיעה ובכך לשפר את יכולותיו בתום תקופת השיקום. בהצעה זאת אתאר את הליקויים העיקריים של הגפה העליונה לאחר שבץ, אתאר את הפער הנוכחי בהבנת תנועת הגפה העליונה ותיאום התנועה בעת הושטת היד לחפץ בגבהים שונים לאחר שבץ מוחי, אסביר את העקרונות הבסיסיים של שיקום, ואציע כיצד רובוטים חברתיים יכולים לסייע בתהליך זה. לאחר מכן אתווה את המטרות והמתודולוגיה הספציפיות של המחקר המוצע ואציג תוצאות ראשוניות של המחקר.

גפה עליונה לאחר שבץ מוחי עד 75% מהאנשים לאחר שבץ מוחי סובלים מחסר סנסו-מוטורי של הגפה העליונה (Rathore et al. 2002; Banina et al. 2017). ליקויים אלה משפיעים על יכולתו של האדם להיות עצמאי בביצוע פעולות של חיי היומיום (ADL) ועל היכולת שלו להיות מעורב בפעילויות חברתיות, דבר המשפיע על איכות חייהם של החולים (Cirstea & Levin 2000, Alaverdashvili & Whishaw 2013, Veerbeek et al. 2016, Banina et al. 2017).

תנועת הושטת היד לחפץ לאחר שבץ מוחי תנועת הושטת היד מאפשרת לאדם לתקשר עם ולחקור חפצים בסביבה (Huan & Brown 2015). לאחר שבץ מוחי המגבלה בתפקוד היד בולטת ונמצאת בקורלציה גבוהה עם רמת הפגיעה (Park et al. 2016): התנועה פחות חלקה (Levin et al. 2016), פחות מדויקת ופחות יעילה בהשוואה למקרי בקרה בריאים (Lang et al. 2005), כפי שנמדדה ע"י אינדקס העקמומיות (Index of Curvature) (Lieberman et al. 2016, Banina et al. 2017), ע"י מידת התנודתיות של התנועה (Osu et al. 2011) וע"י התיאום בתנועת המפרקים (Merdler et al. 2013). יש גם תנועות פיצוי אופייניות לאחר שבץ, כגון תזוזה מוגזמת של הגו (Levin et al. 2011, Murphi et al. 2011, 2006, Michaelson et al. 2001, 2004) או אוריינטציה קדמית של כף היד בעת אחיזה (Michaelson et al. 2004). הסדרת התיאום של תנועות אלה היא, אם כן, יעד מרכזי לשיקום לאחר שבץ (Van Vliet et al. 2013).

הושטת היד לחפץ בגבהים שונים במהלך פעילויות היומיום, אנשים צריכים להושיט את היד לחפצים הממוקמים במרחב תלת ממדי ואינם מוגבלים בתפקודם רק למישור ההוריזונטלי (Valdes et al., 2017). עם זאת, למרות מחקרים מקיפים על תנועות הושטת היד לאחר שבץ, ישנו מידע מוגבל לגבי היכולת של הזרוע הפרטית (לקויה) להתאים את טווח ההושטה לגבהים ולמשקלים שונים. לכן, ישנה חשיבות גבוהה להעריך ולבנות תוכניות התערבות של תנועות הושטת היד למרחקים ולגבהים שונים במרחב. כאשר חולים לאחר שבץ מוחי מושיטים יד ליעדים גבוהים יותר, הם מגייסים יותר שרירים מפצים בשרירי הגפה העליונה של הצד הפרטי לעומת הצד הלא-מעורב (Park et al., 2010), לוקח להם זמן רב יותר להגיע ליעד בהשוואה לאנשים בריאים (Murphy et al. 2007), והם מדגימים יותר קושי בסוף טווח התנועה של הכתף (Wagner et al. 2008), כמו גם תבנית הפעלה שונה של השרירים המייצבים של הגו (Gera et al., 2016) בהשוואה עם תנועות הושטת היד ליעד בגובה נמוך. עם זאת, ברוב המחקרים של הושטת הגפה העליונה באנשים לאחר שבץ מוחי השתמשו במשימות וירטואליות, אשר לא באמת מייצגות את העולם האמיתי. Lieberman et al. 2012 הראה שמשימת הושטת היד בסביבה וירטואלית דו-מימדית היא איטית יותר, קצרה יותר, פחות ישרה, פחות מדויקת, והיא





כוללת טווחים קטנים יותר של תנועת הכתפיים והמרפק מאשר במשימה של הושטת היד בסביבה פיזית אמיתית - הן בשורדי שבץ והן אצל אנשים בריאים. ממצאים אלו ואחרים (למשל, Wu et al 2000, Van Heneghan 2006 & Vliet) מדגישים את החשיבות בשימוש בחפצים אמיתיים ויום-יומיים בהערכה ובטיפול של אנשים לאחר שבץ עם ליקויים בתנועת הגפה העליונה.

כוחות תפיסה ואחיזה לאחר שבץ. הזזת הזרוע בעת החזקת חפץ מחייבת את האדם (באופן לא מודע) להגביר את כוח האחיזה כדי למנוע מהאובייקט להחליק (Flanagan and Wing 1997, Pilon et al 2007). קושי ביכולת האחיזה לאחר שבץ יכול להתעורר עקב הקושי ביישום והתאמה של כוחות אחיזה נאותים (Sao 2015, Boissy et al 1999, Hermsdorfer et al 2003 & Blennerhassett et al. 2006-2008, Enders) כדי למדוד את כוחות האחיזה לאחר שבץ, מחקרים קליניים משתמשים בדרך כלל בכלים ייעודיים, כגון דינמומטר (Michaelson et al 2004) ולא בחפצים יומיומיים. במחקר הקודם שלנו הצלחנו לאפיין את פרופיל האחיזה וכוחות האחיזה אשר הנבדקים מיישמים בעת אחיזה והרמת כוס ריקה או מלאה, כאשר הם מציבים אותה בשלושה גבהים שונים.

חשיבות החזרה ברכישת מיומנות מוטורית לאחר שבץ מוחי. לאחר שבץ מוחי, כדי למקסם את ההתאוששות של הגפה העליונה הפגועה, על המטפלים ליישם אימון אינטנסיבי, חזרתי ומכוון מטלה (French et al. 2007; Richards et al. 2008; Combs et al. 2012; Brackenridge et al. 2016) אשר משמעותיות ומוכרות למטופל (Hubbard et al., 2009, Michaelson et al. 2006, Bayona et al 2015) French et al. (2016) בסקירת Cochran, דיווחו כי בהשוואה לקבוצות פיזיותרפיה סטנדרטיות או לקבוצות שטופלו בפלסבו, אנשים עם שבץ מוחי, אשר התאמנו במטלות תפקודיות, הראו שיפור בתפקוד הזרוע, בתפקוד היד, במרחק הליכה ובמידת יכולת ההליכה, עד שישה חודשים לאחר המידה. שיפור משמעותי בתפקוד הזרוע לאחר אימון של 15 (Michaelson et al. 2006) ו-18 מפגשים (Birkenmeyer et al. 2015) דווח בתום מעקב של חודש.

חשיבות המוטיבציה בשיקום גפה עליונה לאחר שבץ מוחי. כדי שהמטופלים יבצעו תרגול חזרתי של מטלה, הם צריכים להיות בעלי מוטיבציה גבוהה (Popovic et al. 2014; Gorsic et al. 2017). אחת הדרכים לעורר מוטיבציה היא ע"י משחוק (gamification) של המטלה, דבר אשר יכול להגביר את המוטיבציה של המטופל, את הלמידה שלו ואת הביטחון העצמי שלו באמצעות הישגים ואינטראקציה חברתית (Hatem et al. 2016). Novak et al. (2014) ו-Gorsic et al. (2017) הראו, כי משחקים בהם הייתה תחרות או שיתוף פעולה עם שותף הגדילו את המוטיבציה של המטופל ואת אינטנסיביות התרגול שלו, דבר המרמז כי הנוכחות של שותף ותחרות הגדילו את המוטיבציה ואת העניין במטלה. אחת הדרכים למשחק את הצורך בתרגול חזרתי בשיקום היא באמצעות שילוב של רובוטים בתהליך השיקום (Eizicovitz et al., 2018, Kashi & Levy-Tzedek, 2018, Feingold-Polak et al., 2018, Kellmeyer et al., 2018) מתנהגים באופן דומה לבני אדם יכולים לשמש כשותפים בתכנית האימון.

שימוש ברובוטים בשיקום הגפה העליונה לאחר שבץ מוחי. הצורך ביישום של מספר רב של חזרות כחלק מהעצמות של התרגול מהווה קושי עבור הקלינאי, בשל הזמן המוגבל של הטיפול הפרטני. כאשר השיקום





מסתיים והמטופל צריך להמשיך ולתרגל בכוחות עצמו בביתו, האתגר של יישום מספיק חזרות בתרגול גדל. לכן, זה חיוני לפתח דרכים אלטרנטיביות ישימות להמשך שיקום ארוך טווח במסגרת הבית ובקהילה, אשר יוכלו להניע את המטופל להמשיך ולתרגל כדי להביא לשיפור בתפקוד היד שנפגעה (Combs et al. 2012). רובוטים מספקים מגוון של טכניקות ואמצעים שיקומיים להגדלת ההתאוששות התפקודית לאחר שבץ מוחי (Brackenridge et al. 2016), היות והם יכולים לסייע בביצוע חזרתי של מטלות באופן מבוקר ועקבי (Dipietro et al. 2012). יחד עם זאת, בסקירה ספרותית נרחבת שנערכה לאחרונה, (Veerbee et al. 2016) דווחה כי למרות שאמצעים רובוטיים יכולים לשפר תנועה מסוימת שתורגלה (למשל כיפוף הכתף או יישור המרפק), רוב האמצעים הרובוטיים הקיימים אינם מסוגלים להביא לשיפור בביצוע פעילויות מחיי היומיום, אשר הן ככל הנראה המשמעותיות ביותר עבור האדם.

רובוטים חברתיים. תחום חדש של רובוטים אשר יכולים לסייע בשיקום הם הרובוטים החברתיים. הרובוטים החברתיים מאפשרים אסטרטגיות יחסי גומלין שונות, תוך שימוש בדיבור, בהבעות פנים ובאסטרטגיות תקשורת. הם משמשים בעיקר כדי לשפר את איכות חייהם של מבוגרים בריאים, באמצעות הגברת המוטיבציה שלהם לבצע תרגילים (Fasola & Mataric 2012) וע"י סיוע בביצוע פעילויות מחיי היומיום (Louie et al. 2014). Erikson et al. (2007) ביצעו התערבות חד פעמית בקרב ששה נבדקים לאחר שבץ מוחי, אשר בצעו שתי מטלות: 1. סידור ספרים על מדף. 2. תנועות חופשיות של היד הפגועה, כגון הרמת ידיים. הרובוט עודד את המטופלים וסיפק להם משוב על אופן הביצוע של המטלה והוא התקבל בחיוב ע"י המטופלים והשפיע באופן חיובי על הנכונות שלהם לבצע את המטלה. (Swift-Spong et al. 2015) בחנו כיצד רובוט חברתי השפיע על ביצוע מטלה של הושטת יד ללחצן בקרב 23 נבדקים לאחר שבץ מוחי ומצאו כי הרובוט הגדיל את מסי' החזרות שהם בצעו. מחקרים אלה מצביעים כי שילוב של רובוט חברתי במטלות הדורשות תרגול ממושך יכול להגביר את המוטיבציה של המטופל לתרגל. יחד עם זאת, היות והמחקרים שבוצעו הו קצרים (לעיתים עם התערבות חד פעמית), עדיין לא ידוע אם היכולת של רובוט חברתי להגביר את המוטיבציה של המטופל לתרגול ממשיכה גם לזמן ממושך והאם רובוט חברתי יכול לשפר את הביצוע של התפקוד לאחר שבץ מוחי.

2. מטרות:

היו לנו שלוש מטרות בעבודה הנוכחית: ראשית, לבנות פלטפורמה לשיקום תפקודי לאחר שבץ מוחי, שיכולה לעקוב אחר הביצועים של החולים לאורך זמן. ליתר הדיוק שאפנו לבנות שני יישומים של פלטפורמה זו, שבהן המטופל מקבל ההוראות והמשוב על ידי רובוט SAR או על ידי מסך מחשב.

המטרה השנייה: לערוך מחקר יישומי עם מטופלים לאחר שבץ מוחי, שיעברו התערבות ארוכת טווח במרפאה עם שני ההטעמות הללו של הפלטפורמה.

המטרה שלישית היא למדוד את נכונותם של המטופלים להתאמן עם הפלטפורמה בעקבות התערבות ארוכת טווח (15 מפגשי התעמלות שנערכו במשך 5-7 שבועות), ולבחון את ההבדלים בנכונות המשתתפים להשתמש במערכת בעת השימוש בתצורת SAR בהשוואה למחשב.

שיעורנו שהמשתתפים בקבוצת SAR יראו מוטיבציה ונכונות רבה יותר להמשיך להתאמן עם המערכת בהשוואה לקבוצת המחשב כפי שיימדדו (i) על ידי שאלון השימושיות, ו (ii) על פי שיעורי הנשירה.





3. שיטות:

3.1 עבודה מקדימה

פיתחנו את גרסת הפיילוט הראשונה של הפלטפורמה אותה אנו מתארים בפירוט בהמשך ובדקנו אותה בסדרת ניסויים עם בוגרים בריאים צעירים ומבוגרים (18).

המטרות שלנו בעבודה זו היו: (i) לבדוק את השפעות הגיל על העדפות בעת האינטראקציה עם SAR; (ii) לבדוק את ההבדלים במוטיבציה של המשתמשים לתקשר עם ממשק המחשב בהשוואה ל SAR; וכך (iii) להתאים את הפלטפורמה שיצרנו בהתאם לקלט שקיבלנו ממבוגרים בריאים.

בעקבות המחקרים הללו פיתחנו גרסה מתקדמת של הפלטפורמה שכללה חמישה משחקי תרגול (משחקים 1,2,3,5,6 המפורטים בסעיף 2.2.2). לפני הצגת הפלטפורמה למטופלים שעברו שבץ, ערכנו מחקר בקבוצות מיקוד עם קלינאים מומחים שעובדים עם חולים לאחר שבץ בתרגול היומיומי שלהם. בהתבסס על המלצותיהם ביצענו מספר שינויים בפלטפורמה. לדוגמה: הוספנו תרגילים פונקציונליים שדרשו שימוש בשתי הזרועות (בניגוד לזרוע בודדת), כפי שיתבקש לבצע במפגש שיקום רגיל במרפאה; הוספנו הנחיות ספציפיות האם להשתמש בזרוע הפגועה או בשתי הזרועות לכל תרגיל; הוספנו סרטון הדגמה לכל משימה, אותו ניתן להציג במידת הצורך; פיתחנו שני מצבים של כל סט תרגילים, הראשון עם זמן בלתי מוגבל להשלמת המשימה, והשני עם הגבלת זמן, ובכך מספקים גם אתגר מוטורי וגם קוגניטיבי. העקרונות המנחים בעיצוב הפלטפורמה הנוכחית מתאימים להמלצות של האקדמיה האמריקאית לרפואה פיזית ושיקום והאגודה האמריקאית לשיקום עצבי.

להלן, אנו מתארים את הפלטפורמה המלאה לראשונה בפירוט; תחילה אנו נותנים סקירה כללית של המערכת, לאחר מכן מתארים את משחקי התרגול ולבסוף את התכונות השונות והפרטים הטכניים של הפלטפורמה. לאחר מכן, אנו מדווחים על התוצאות המחקר ארוך טווח עם 24 משתתפים לאחר שבץ מוחי, אשר חולקו אקראית לשתי קבוצות התערבות.

3.2 עיצוב המערכת

3.2.1 שימוש בחפצים יומיומיים

אחת המטרות העיקריות שלנו במחקר הנוכחי הייתה שימוש באובייקטים אמיתיים ממשמות יומיומיות כחלק מתוכנית משחקי התעמלות. במחקרים הקודמים הוזכר שבתרגול קליני האימון הספציפי למשימה צריך לחזור על עצמו הרבה פעמים ולהיות רלוונטי למטרות של המטופל. כמו כן, הוכח שהמטרה הפונקציונלית הספציפית שלנו (למשל בהגעה לחפץ, הושטת יד אל כוס כדי לשתות ממנו או על מנת לשפוך לתוכו מים) משפיעה על הדרך בה אנו מבצעים את התנועה. תנועות הגעה לאחיזה דורשות לעתים קרובות יישום מדויק של כוחות אחיזה, המסתמך על חיזוי ומשוב חושי. כאשר ישנה בעיה יכולת לשלוט בכוח המופעל על ידי היד, זה משפיע בצורה משמעותית על רמת העצמאות של המטופל אחרי שבץ מוחי, למשל הקושי ביישום והתאמת כוחות אחיזה נאותים, מוגבלות בביצוע פעולות יומיומיות.

מחקר מקיף נעשה בעשור האחרון על השימוש בטכנולוגית מציאות המדומה (VR) לשיקום, במיוחד של הגפה העליונה, תוך היותה זולה יחסית, נגישה ומעודדת אימון בעוצמה גבוהה. אחת הבעיות שעדיין לא נפתרו היא שהקינמטיקה של הגפיים העליונות בעת שימוש ב VR-השתנתה בהשוואה לתנועות דמות המבוצעות בסביבות פיזיות. בסביבה הוירטואלית אין עדיין את היכולת לספק משוב הפטי למשתמש וזה מונע אפשרות לתרגל ויסות הכוח כחלק מאימון "הגעה לאחיזה".





במחקר המתואר מטה אנו משתמשים בטכנולוגיה מרתקת ומעלה מוטיבציה (SAR) כדי לעזור למשתמשים לתרגל תנועות של הגעה לאחיזה, בסביבה פיזית, תוך שימוש בחפצים יומיומיים אמיתיים, ובכך לאפשר למשתמשים לתרגל הן את הקינמטיקה והן את ויסות הכוח הנדרש במשימה "הגעה-אחיזה".

3.2.2 התאמה אישית בשיקום

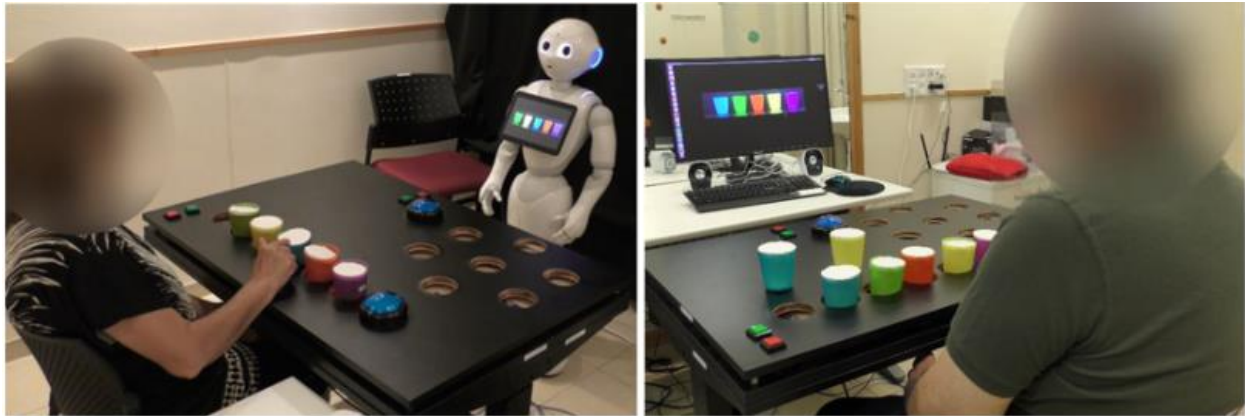
בשנים האחרונות נחשב ששימוש בטיפול מותאם אישית למטופל הוא מרכיב חיוני של שירותי הבריאות ובמיוחד בטיפול השיקום. בעבודות קודמות צוינה הדרישה שחזרה על עצמה שוב ושוב בהקשר ל SAR בשיקום - הצורך בהתאמה אישית של המערכת ושל האינטראקציה. בנוסף הודגש כי על החוקרים והקלינאים לאמץ גישה ממוקדת יותר למטופל בתכנון ניסויים קליניים ובטיפול קליני. שיקום, מטבעו, הוא תהליך ארוך ודינמי. לפיכך, על מנת שהמכשיר הרובוטי יהיה יעיל לטיפול ומקובל הן על המטופל והן על הרופא, עליו להיות גמיש ומתכוונן, תוך התחשבות במורכבות של הליקוי הספציפי ובשינויים הדינמיים שהמטופל חווה. כדי שחווית המשתמש תהיה חיובית וכדי להגיע למעורבות יטבית של המטופל במשימה חשוב להתאים את האינטראקציה לפי מאפייני המשימה, גיל המשתמש, צרכיו וליכולותיו המשתנות והדינאמיות. להלן נתאר את המאפיינים המותאמים של המערכת הנוכחית למשתמש.

3.3 הפלטפורמה

3.3.1 סקירה כללית

פיתחנו פלטפורמה משחקית לשיקום הגפיים העליונות לאחר שבץ מוחי. ניתן להשתמש בפלטפורמה באחת משתי תצורות: בתצורה אחת המטופל מקבל את הוראות המשחק והמשוב מרובוט דמוי אדם (תצורת ROBOT; השתמשנו ברובוט Pepper, Softbank Robotics Aldebaran), ובתצורה השנייה ממסך מחשב רגיל (תצורת COMPUTER; ראה איור 1). למרות שהיתרון של התגלמות פיזית נדון בעבר, שאלה זו לא נבדקה בהקשר של אינטראקציה ארוכת טווח וליתר דיוק, בהקשר של שיקום ארוך טווח. המוטיבציה שלנו להשתמש בשתי התצורות של המערכת היא שלרוב בבתים ובמרפאות יש גישה למחשב ולא לרובוט, ובכך שאפנו לבדוק את הערך המוסף של הרובוט SAR על פני המחשב מבחינת מוטיבציית המשתמשים ליצור אינטראקציה ארוכת טווח בהקשר של שיקום לאחר אירוע מוחי. למען הקיצור נתייחס לתצורת ה ROBOT בעת תיאור הפלטפורמה, בעוד שהמידע ישים גם לתצורה עם מסך המחשב. כלומר כאשר מידע מתואר כמוצג על מסך הטאבלט של הרובוט, באותו אופן הוא מוצג על מסך המחשב בתצורת COMPUTER; כשהרובוט נתן הוראות אודיו, הרמקולים של המסך השמיעו את אותן הוראות בדיוק בתצורת COMPUTER. הוראות שמע לוו תמיד בטקסט על המסך: הן הוצגו על מסך הטאבלט של הרובוט במצב ROBOT, ועל מסך המחשב במצב COMPUTER.





איור 1: שני התצורות של מערכת שיקום לאחר שבץ. משמאל: הרובוט החברתי Pepper נותן הוראות ומשוב למטופל (ROBOT). מימין: ההוראות והמשוב מוצגים על מסך המחשב (COMPUTER).

בכל אחת משבעת ערכות התרגילים המכשוריים שפיתחנו, המטופלים מתרגלים תנועות של הגעה-תפיסה-ומיקום, או תנועות הגעה-תפיסה-תפעול תנועות, תוך שימוש בחפצים יומיומיים אמיתיים כגון כוסות, צנצנות, מפתחות, ארנקים, ומגירות. ערכות תרגיל פונקציונליות אלו מאפשרות למטופלים לתרגל יכולות מוטוריות וקוגניטיביות כאחד. בכל סט של התרגילים, יש בין ארבע לשבע דרגות קושי, כאשר רמת הקושי היא פונקציה של: (i) מספר האובייקטים המשתתפים בתרגיל במהלך כל הניסוי (הם מתחילים עם מספר קטן של אובייקטים ומתקדמים ליותר חפצים), (ii) משקלם של החפצים (הם מתחילים באיסוף והנחת חפצים קלים ומתקדמים לחפצים כבדים), ו (iii) גובת השולחן או המדף שעליו הם צריכים להניח את החפצים (מתחילים בגובה שולחן סטנדרטי (75 ס"מ), או נמוך יותר, ומתקדמים לגובת הכתפיים, כפונקציה של יכולתם).

שלושה תרגילים מהמערך נועדו לתרגל תנועות השגה-תפיסה-ומיקום (ערכות תרגיל 1,2,5 מפורטות להלן), וארבעה האחרים נועדו לתרגל תנועות הגעה-תפיסה-תפעול תנועות (למשל, הרמת ארנק ופתיחת הרוכסן שלו כדי לשלוף ממנו מפתח; ערכות תרגיל 3,4,6,7 המפורטות להלן). בכל סט של התרגילים המשתתף מקבל הנחייה האם עליו להשתמש רק ביד הפגועה או בשתי ידיו על מנת לבצע את המשימה. כל האובייקטים ומשטחים של הפלטפורמה מצוידים בתגים וחיישנים בהתאמה, המאפשרים מעקב אחר מיקום של האובייקטים, כמפורט להלן.

בהמשך נפרט על שבעת הערכות התרגילים ומכיוון שכולם פועלים בצורת המשחק נקרא להם במילה "משחקים".





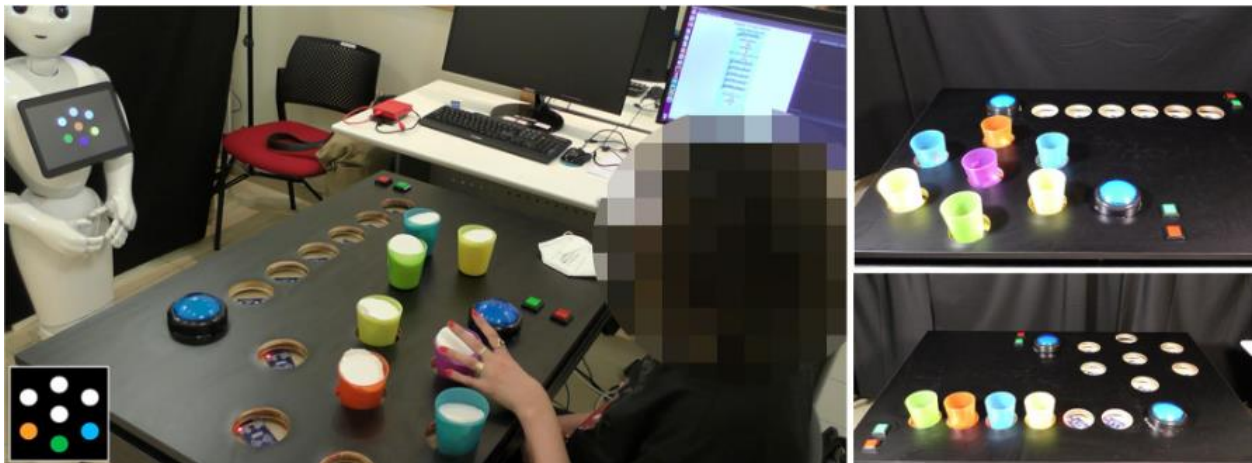
3.3.2 ערכות התרגילים (1-7)

משחק הכוסות (1) ומשחק המטרה (2)

בכל אחד משנים עשר ניסויים במשחק הכוסות שורה של כוסות צבעוניות מוצגת על מסך הטאבלט של הרובוט.

המשתתף, היושב ליד השולחן המאובזר, צריך לארגן סט מתאים של כוסות צבעוניות על השולחן כפי שמוצג על המסך של הטאבלט המחובר לרובוט (ראה איור 1 ואיור 2). ישנן ארבע רמות קושי במשחק: (i) מספר הכוסות: החל משלוש כוסות ברמה הראשונה (הקלה ביותר), עד שש כוסות בדרגה הרביעית (הקשה ביותר); (ii) משקל הכוסות: הכוסות יכולות להיות ריקות (34 גרם) או מלאות (180 גרם) (עבור רוב החולים קל יותר להרים את הכוס הריקה, אך לחלק מהנבדקים הכוס המלאה מספקת יציבות); השתמשנו בשעועיית יבשה כדי למלא את הכוסות בתצורה "כבדה". השולחן עליו מתבצע תרגיל זה מתכוונן לגובה מאובזר עם פלטה עליונה שנבנתה במיוחד לתרגיל עם חורים בגודל 8 ס"מ, כך שהמטופלים יכולים להניח בנוחות את הכוסות במקומות המיועדים ללא סיכון להפיל אותם. ערכת תרגילים זו נחשבת לפשוטה ביותר, שכן הארגון המרחבי של העצמים דורש בעיקר תנועה הצידה של הזרוע עם מעט תנועה הרחק מהגוף או במימד האנכי.

משחק המטרה דומה למשחק הכוסות, אך במקום לארגן את הכוסות בשורה, הם אמורים להיות מסודרים במעגל בדומה ללוח מטרה עם שישה מיקומי יעד מסודרים במעגל סביב מיקום מטרה אמצעי (ראה איור 2). במשחק המטרה ישנם 21 ניסויים בחמש רמות קושי, החל משלוש כוסות ברמה הראשונה (הקלה ביותר), ועד לשבע כוסות ברמה האחרונה (הקשה ביותר). כמו במשחק הכוסות, הכוסות יכולות להיות ריקות או מלאות. משחק זה קשה יותר ממשחק הכוסות מכיוון שהוא דורש תפיסה מרחבית ותנועה רב-ממדית של היד בכיוונים שונים על פני מישור השולחן (כלומר, לצדדים, לכיוון הגוף והרחקה ממנו).



איור 2: משחק המטרה וכוסות. משמאל: מטופל משחק במשחק המטרה עם ההוראות שרובוט סיפק. תוספת מרובעת בפינה: דוגמה להוראה במשחק זה, שבה יש להניח שלוש כוסות צבעוניות לאורך עיגול; עיגולים לבנים מציינים חללים ריקים. ימין למעלה: איור של משחק המטרה עם כל שבעת המקומות תפוסים. מימין למטה: המחשה של משחק הכוסות עם ארבעה מיקומים תפוסים מתוך שישה אפשריים.





משחק המפתחות (3) ומשחק הארנק (4)

במשחק המפתחות המשתתף מוציא מפתחות צבעוניים מקופסה ומניח אותם על מתלה מפתחות לפי תמונה המוצגת על מסך הטאבלט של הרובוט. התמונה על מסך הטאבלט היא שורת עיגולים בצבעים שונים (ראה איור 3). בקופסה יש 12 מפתחות בצבעים שונים: הצבע של שישה מהם מתאים לצבעים המשתתפים במשחק, ושישה מפתחות נוספים משמשים כמסיחים.

במשחק הארנק המשתתף מוציא את המפתחות משישה ארנקים שונים עם רוכסן, שצבעם תואם לזה של המפתח, ומצמיד כל מפתח למתלה המפתחות בהתאם לצבעים המוצגים על מסך הטאבלט של הרובוט (ראה איור 3).

שני ערכות התרגילים הללו דורשות ביצוע תנועת יד ומניפולציה בחפצים קטנים.



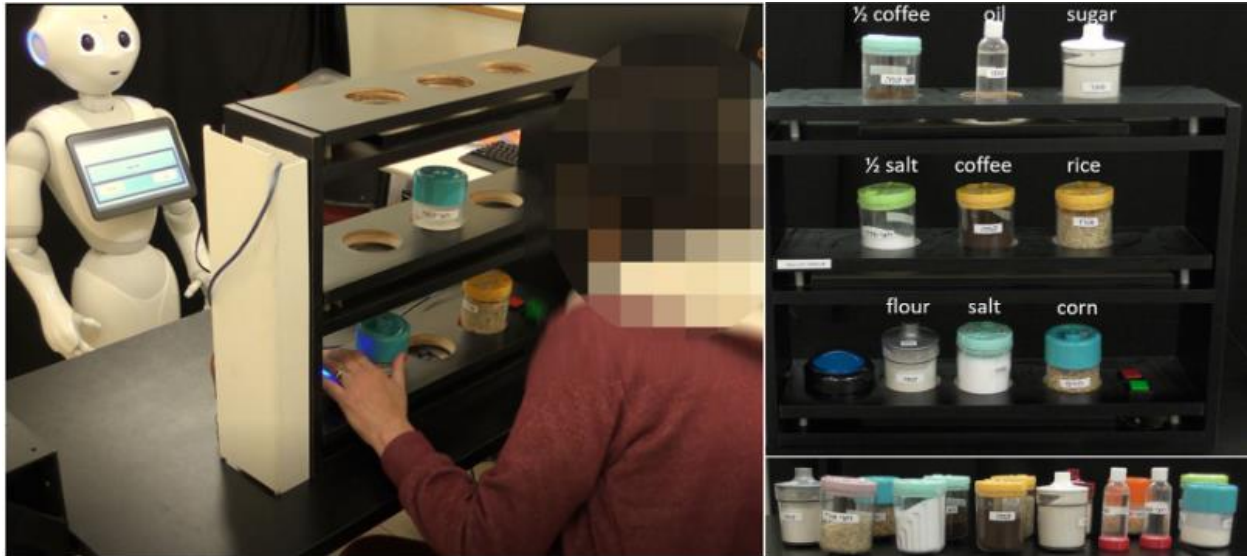
איור 3. משחק המפתחות והארנק. מטופל משחק במשחק המפתחות עם ההוראות שסופקו על ידי הרובוט. תוספת גדולה בפניה: איור של משחק הארנק, המראה את המפתחות, שנשלפו מארנקים עם רוכסן תואמים בצבע, שהונחו על מתלה המפתחות החיישני. תוספת קטנה באמצע: דוגמה להוראות בכל אחד משני המשחקים הללו, כאשר יש להניח ארבעה מפתחות צבעוניים על מתלה המפתחות; עיגולים לבנים מציינים חללים ריקים.

משחק המטבח (5)

במשחק המטבח בכל אחד מחמישה עשר ניסויים על המשתתף לארגן סט של צנצנות פלסטיק מסומנות על מדפים בשלושה גבהים שונים, לפי תמונה המוצגת על מסך הטאבלט של הרובוט (ראה איור 4). הצנצנות מלאות למחצה או מלאות לגמרי עם פריטי מזון ותבלינים אמיתיים, כגון מלח, סוכר, שמן, קפה, גרעיני תירס וכו', ותוויות מציינות את תכולת הצנצנת השקופה. יש שבע רמות קושי במשחק. הקושי נקבע על ידי שילוב של: (i) מספר הצנצנות שיונחו על המדף; (ii) משקלם (חצי מלא או מלא), ו- (iii) גובה המדף (יש 3 גבהים של מדף). רמת הקושי הראשונה כוללת שלוש צנצנות קלות משקל הממוקמות על המדף הנמוך ביותר (גובה של שולחן סטנדרטי). ברמת הקושי השביעית ישנן תשע צנצנות, במשקלים שונים (110-400 גר'), המונחות על מדפים בשלושה גבהים שונים (ראה איור 4).

מדפי המטבח נבנו בהתאמה אישית עם חורים בגודל 8 ס"מ, כך שהמטופל יוכל להניח את הצנצנות בנוחות במקומות המיועדים לכך, ללא סיכון להפילן. המשחק הזה דורש מהמשתמשים להגיע לגבהים שונים ולהרים משקלים שונים, כמו גם לתרגל את התפיסה המרחבית שלהם.





איור 4: משחק המטבח. שמאלה: המטופל משחק במשחק המטבח עם ההוראות שסופקו ע"י הרובוט. מימין למעלה: איור של משחק המטבח, כשכל תשעת מיקומי המדף תפוסים. הטקסט הלבן מעל כל צנצנת/בקבוק מציין את התוכן של הפריט המודפס גם על הפריט עצמו; "1/2" מציין שהצנצנת או הבקבוק מלאים למחצה. מימין למטה: מגוון פריטי המטבח בהם נעשה שימוש במשחק זה.

הבלאק ג'ק (6)

ביישום זה של משחק הקלפים בלק ג'ק, המשתתף הוא הדילר והרובוט הוא השחקן (ראה איור 5). כללי המשחק מוצגים על ידי הרובוט בתחילת המשחק. לאחר מכן, המשתתף, שהוא בתפקיד הדילר, מחלק את הקלפים לרובוט ולעצמו לפי כללי המשחק. סיבוב מנצח כאשר גם הרובוט וגם המשתתף לא רוצים להוסיף עוד קלפים. המנצח הוא זה שעבורו סכום ערכי הקלפים שלהם הוא הגבוה ביותר, אך לא גבוה מ-21. הדפסנו בהתאמה אישית חפיסת קלפים מלאה על כרטיסי זיהוי בתדר רדיו (RFID) (ראה פרטים בסעיף 2.2.6.3 להלן) למשחק הזה.



איור 5: משחק "בלאק ג'ק". מטופל משחק במשחק "בלאק ג'ק" בתפקיד הדילר, כאשר הרובוט בתפקיד השחקן. הכרטיסים המודפסים בהתאמה אישית על תגי RFID מונחים על ידי המטופל על השולחן עם חיישנים.





משחק חדר הבריחה (7)

במשחק זה ישנה עלילה ברקע, שבה הרובוט אומר למשתתף שעליו לעזוב ולצאת לנסיעה (מה שבדרך כלל מספק הקלה קומית כלשהי) ומטיל על המשתתף משימה לעזור לו למצוא את תעודת הזהות שלו, המפתחות וכרטיס האשראי שלו. בסדרת משימות מודרכות (המפורטות להלן) המשתתף נדרש לתרגל פעולות יומיומיות כגון פתיחת מגירה במשיכה עדינה (למרחק מוגדר), פתיחת מנעול באמצעות מפתח, לחיצה על מתגים וכו'. עד להשלמת המשימה. בסופו של דבר המשתתף מתבקש לארגן את כל החפצים שאסף במהלך סדרת המשימות לתוך הארנק, וכך לתרגל עוד פעילות יומיומית. בסט תרגיל זה המשתתף מתרגל מניפולציה עם חפצים, תנועה דו-צדדית של שתי הידיים, תנועה מבוקרת של היד.

מכיוון שאופי המשחק היה שונה ממשחקים 1-5 לעיל, ההתקדמות במשחק לא הייתה כפי שתוארה במשחקים הקודמים. כאשר חוזרים על המשחק הזה יותר מפעם אחת, המשתתפים יכולים לשפר את הזמן שנדרש להם להשלים את המשימה. ההוראות הספציפיות וההתקדמות משחק התרגיל היו כדלקמן:

1. "תעודת הזהות נמצאת במגירה העליונה. המגירה נעולה. המפתח למגירה העליונה נמצא במגירה השנייה. נא לפתוח את המגירה השנייה רק עד לנקודה שבה אתה רואה נורה אדומה נדלקת". חיישן מרחק שהותקן בחלק האחורי של המגירה שימש למדידת מידת פתיחת המגירה. הנורה האדומה בצד המגירה נדלקה רק כאשר המגירה נפתחה ל-30 ס"מ בדיוק. המטרה של משימה זו לתרגל ויסות כוח של התנועה לפתיחת המגירה (ראה איור 6א).
2. "חפש את המפתח של המגירה העליונה במגירה השנייה". (המפתח הימני הונח בין 20 מפתחות דומים אחרים; ראה איור 6א).
3. "השתמש במפתח כדי לפתוח את המגירה העליונה ולמצוא את תעודת הזהות." (תעודת הזהות הונחה בין 10 כרטיסים אחרים; ראה איור 6ב).
4. "הנח את תעודת הזהות על גבי קורא הכרטיסים (ראה איור 6ג) והשתמש בארבע הספרות האחרונות של מספר תעודת הזהות כקוד לכספת." (המשתתף חייב ללחוץ על לוחות המקשים ולסובב את המנעול כדי להשלים שלב זה; ראה איור 6ד).
5. "בכספת מפתחות למנעול המגירה השלישית. מצא את המפתח הנכון ופתח את המנעול". (המפתח הנכון הוצב בין 10 מפתחות דומים; ראה איור 6ה).
6. "במגירה תמצא את כרטיס האשראי שלי". (כרטיס האשראי הוצב בין 10 כרטיסים אחרים; ראה איור 6g,f).
7. "הנח את כרטיס האשראי על גבי קורא הכרטיסים. לאחר מכן פתח את המגירה הרביעית עד ששתי הספרות האחרונות של הכרטיס יופיעו במסך הדיגיטלי שליד המגירה".
8. "הוצא את הארנק מהמגירה ושים בו את כל הפריטים שמצאת".







איור 6: משחק חדר הבריחה. (E-A) חלק ממשיות התרגיל הכוללות פתיחת מגירות למרחק מסוים, זיהוי מפתח או קלף בין מסיחים, לחיצת מספרים בלוח מקשים, סיבוב מנעול וכו'. (G-F) מטופל מבצע את המשימות בתרגיל זה בהתאם להוראות 5 ו-6 בטקסט.

בעוד שבעבודה קודמת תיארונו גרסה ראשונית של משחק הכוונות, נתנו תיאור קצר של משחק המטבח ושל העקרונות הבסיסיים של מערך התרגילים, ומאפיינים חצי-אוטונומיים של המערכת, בעבודה הנוכחית, זו הפעם הראשונה שאנו מתארים בפירוט את כל שבעת ערכות התרגול, המאפיינים השונים של המערכת והמאפיינים הטכניים שלה, לצד דיווחי משתמשים מ-20 אנשים שלאחר שבץ מוחי, אשר התנסו במערכת במשך 15 מפגשים כל אחד.

3.3.3 זמן של תרגולים

ניתן לשחק בכל אחת מחמש ערכות התרגילים הממוספרות (1-5) לעיל ללא הגבלת זמן להשלמת כל ניסיון של המשימה או עם זמן מוגבל להשלמתה. בתצורה הראשונה (זמן בלתי מוגבל) תמונת המטרה מוצגת על המסך עד שהמשתתף מציין שסיים לסדר את החפצים. הזמן שלקח למשתתף לבצע את המשימה מתחילתה ועד סופה, כמו גם הזמן הממוצע שלקח לאדם להשלים את הניסויים בכל רמת הקושי של המשימה, מתועדים אוטומטית והקלינאי שמנהל את הניסוי מקבל מידע דרך ממשק המשתמש במחשב המשמש להפעלת הניסוי. בתצורה השנייה (זמן מוגבל), התמונה עם סדר המבוקש של האובייקטים נעלמת מהמסך לאחר זמן מוגדר בנפרד, בהתאם לתזמון של המשתתף בתצורת זמן בלתי מוגבל. מגבלת הזמן שנקבעה היא 2-4 שניות פחות מהזמן שלקח למשתמש בשלב הבלתי מוגבל בזמן.

3.3.4 הוראות ומשוב מילוליים וויזואליים

לאחר כל ניסוי הרובוט נותן משוב למשתתף על התזמון (למשל, "נסה לעשות את זה מהר יותר בפעם הבאה") או על הביצועים שלהם בסט התרגילים (למשל, "הצלחת!", "לא צדקת, אבל נסה שוב"). הרובוט מספק משוב על ידי שילוב של תגובה מילולית ומשוב ויזואלי, המוצג על מסך הטאבלט שלו. תגובות הרובוט מלוות בתנועות ראש וזרועות (למשל, הנהון, מחיאת כפיים או ריקוד ניצחון); מחוות אלו אינן קיימות במצב ה (COMPUTER). חשוב לציין שהתכונות אלו של הרובוט היוו את ההבדל היחיד בין ההתערבות שניתנה לשתי הקבוצות. הרובוט הוא חצי אוטונומי בתפקודו (כמפורט להלן בסעיף 2.3.7) כך שלאחר שהרופא קבע את כל הפרמטרים של המשחק, המטופל יכול להתאמן ללא התערבות של קלינאי או מטפל במשחק.

כאשר המשתתף טועה, תמונה עם הסדר הנכון של האובייקטים מוצגת על מסך הטאבלט של הרובוט, כך שהמטופל יוכל לראות היכן טעה. בכל ניסוי המטופל מקבל נקודות עבור החפצים שסידר בצורה נכונה. מכיוון שהרובוט Pepper אינו תומך בשפה העברית, לא יכולנו להשתמש ביכולות השפה המובנות שלו. לכן הקלטנו מראש את כל ההוראות והמשוב המילולי, תוך שימוש בקול אנושי נשי. אותן הקלטות שימשו עבור ROBOT ועבור תצורות COMPUTER.

3.3.5 מהלך של סט התרגילים

במפגש הראשון עם רובוט, מתוך סך של 15 מפגשים, Pepper מציג את עצמו בפני המשתתף. בכל אחד מ-14 המפגשים הבאים פפר מברך את המשתתפים במשפטים כמו "אני כל כך שמח לראות אותך שוב", "כל כך נחמד שחזרת" וכו'. בתצורת COMPUTER אין משפטי ברכה והמפגש מתחיל בהצגת הוראות משחק התרגיל. בכל אחד מהתרגילים המשחקיים שצוינו לעיל במספרים 1-5, המשתתפים לוחצים על כפתור גדול הממוקם בצד ימין של השולחן כדי לציין שהם סיימו משימה (ראה, למשל, איור 3). בנוסף, לאחר מספר נסיונות ברמה מסוימת, המערכת מציעה למשתתף להתקדם לרמה גבוהה יותר. על מנת לציין את בחירתו, המשתתף לוחץ על





כפתור הירוק כדי להמשיך לשלב הבא או על כפתור האדום כדי להישאר באותה רמה. כפתורי הלחיצה האדומים והירוקים ממוקמים בצד שולחן המשחק. לאחר לחיצה על הכפתורים המשחק ממשיך אוטומטית לפי בחירת המשתתף.

3.3.5.1 השהייה או עצירה של המשחק

בכל שבעת משחקי האימון המשתתף יכול לעצור בכל עת במידת הצורך. פעמיים במהלך המשחקים הממוספרים (1-5), לאחר כל שתי רמות במשחק, הרובוט מציע למשתתף לנוח ולהצטרף אליו לפגישת מתיחות. בנוסף, פעמיים במהלך כל אחד ממשחקי התרגיל הללו, לאחר סיום השלב השלישי והחמישי, המערכת מציעה למשתתף להפסיק את המשחק אם ירצה בכך. יתר על כן, המשתתף יכול לקחת הפסקה או להפסיק את המשחק בכל עת, וכאשר ימשיך לשחק, המשחק יתחדש מאותה נקודה בה הופסק. כפתורי הלחיצה האדומים והירוקים, המעידים על התקדמות ברמות המשחק, משמשים גם כדי לציין אם המטופל רוצה להמשיך לשחק או להפסיק לשחק, כאשר שואלים אותו. במקרה של תקלה במערכת, ניתן להפעיל אותה מחדש מאותו מקום בו היא נעצרה והרובוט אומר "אז איפה היינו? בוא נמשיך מאותו מקום".

3.3.6 הגדרות הפיזיות

3.3.6.1 גובה של השולחן

עבור שישה מתוך שבעת משחקי האימון שעיצבנו (משחקים 1-6 המפורטים למעלה), השתמשנו בשולחן מתכוונן בגובה. זה עוזר לבצע התאמה לגובה של המשתמש ולמידת הפגיעה בזרועו. כאשר הזרוע חלש (ציון $<25/60$ Fugl-Meyer Upper Extremity Assessment (FMA), ראה להלן בסעיף 2.3.1) אנו מורידים את השולחן לגובה ירכיים של המטופל בישיבה; זה עוזר להם להגיע לאובייקטים שעל השולחן (משימה שקשה להם יותר כשהשולחן גבוה יותר).

3.3.6.2 פלטפורמת האימון

על גבי השולחן המתכוונן בגובה קיבענו לוח עליון נוסף, בו קדחנו חורים של 8 ס"מ, כך שהמטופלים יוכלו להניח את החפצים בנוחות במקומות המיועדים לכך ללא סיכון להפיל אותם. היא שימשה למשחק הכוסות ולמשחק המטרה (איור 2). במשחק המטבח בחלק העליון של כל מדף קדחנו גם שלושה חורים של 8 ס"מ, שם הניח המשתתף את הצנצנות והבקבוקים (איור 4).

3.3.6.3 מנגנון חישה

על מנת שהמערכת תזהה היכן האובייקטים ממוקמים על הפלטפורמה וכדי לזהות סיום המשימה, השתמשנו בלוח Arduino Mega יחד עם קוראי RFID. קוראי ה-RFID מזהים אוטומטית ועוקבים אחר תגיות שהוצמדו לאובייקטים השונים של המשחקים (למשל, מחזיקי המפתחות באיור 3). הצבנו קוראי RFID בכל המיקומים שבהם המשתמשים יכולים למקם חפצים (השולחן, מדפי המטבח, מתלה המפתחות ולוח Black Jack). למשחק "בלק ג'ק" השתמשנו בכרטיסי RFID עליהם הדפסנו בהתאמה אישית את התמונות של קלפי משחק בפועל. במשחק הכוסות, משחק המפתחות והארנק, לוח Arduino נדרש לקרוא 6 RFIDs בו-זמנית. במשחק המטרה נדרש לקרוא 7 RFIDs במקביל, במשחק המטבח 9 RFIDs נקראים במקביל ובמשחק "בלאק ג'ק" 14 RFIDs נקראים בבת אחת. במשחק חדר הבריחה השתמשנו בקוראי RFID למרחקים, שציינו מתי הכספת והמגירות פתוחות ובאיזו מידה. הנתונים מועברים מלוח Arduino, באמצעות כבל USB, למחשב השולט במשחק. בתרגולים המשחקיים (1-5) אם כפתור הלחיצה הגדול נלחץ, הנתונים מעובדים על ידי ה-Arduino





ולאחר מכן מועברים מה- Arduino למחשב באמצעות כבל USB. במשחקי "בלאק ג'ק" וחדר בריחה לוח ה-Arduino קרא ברציפות את רכיבי ה-RFID והעביר את הנתונים למחשב. זה לוקח בערך ארבע שניות מרגע שהמשתתף לוחץ על הכפתור ועד שהוא מקבל משוב מהרובוט.

3.3.7 אוטונומיה של המערכת

המערכת המשחקית תוכננה להיות חצי אוטונומית, כך שיש מעורבות של צד שלישי בהקמת משחקי האימון המותאמים אישית לכל משתתף ולאחר מכן המטופל יכול לעסוק במשחק אימון מלא ללא התערבות או נוכחות של קלינאי או מטפל. לפני תחילת המשחק הקלינאי מזין את הנתונים הבאים למחשב: קוד אנונימי של המטופל, מין (כדי שהוראות השמע יפנו למשתמש באמצעות כינויים ופעלים מגדריים נכונים בעת דיבור אל המטופל בעברית), האם זו האינטראקציה הראשונה שלהם עם המערכת, האם זו הפעם הראשונה שהם משחקים במשחק התרגול הספציפי הזה (כוסות, מטרה וכו'), והאם המטופל צריך לצפות בסרטון ההוראות המשחק (בפעם הראשונה שהם משחקים או אם הם מבקשים לצפות בו שוב). הגדרת משחק התעמלות עשויה להימשך עד שבע דקות. מקובל בתחום השיקום שהמטופל זקוק לסיוע בהגדרה אישית של מכשיר ולאחר מכן יוכל להתאמן בעצמו. לאחר מכן, הוראות המשחק והמשוב על הביצועים מסופקים כולם על ידי הרובוט או מסך המחשב, והמטופל מקיים אינטראקציה רק עם הרובוט או מסך המחשב במהלך הפגישה (באמצעות מכשיר החישה כמתואר בסעיף 2.3.6.3), בלי מעורבות של קלינאי או מטפל. המערכת היא מערכת ללא מגע, כלומר אין אינטראקציה פיזית בין הרובוט למשתתף.

3.4 מחקר שימושיות עם משתמשים לאחר שבץ

ערכנו מחקר ארוך טווח עם המטופלים ביחידה האמבולטורית של מרכז השיקום "עדי נגב" בישראל. המחקר אושר על ידי הוועדה האתית המוסדית של הלסינקי לניסויים קליניים (SMC-5273-2018). כל המטופלים נתנו הסכמה מדעת בכתב לאחר שקיבלו הסבר מפורט על המחקר מרופא מומחה ברפואה פיזיקלית ושיקום.

3.4.1 המשתתפים

מטופלים שעמדו בקריטריוני ההכללה הבאים גויסו למחקר:

- (1) שבץ חד צדדי ראשון, שאושר על ידי הדמיה;
- (2) ציון $\geq 24/30$ Mini-Mental State Examination (MMSE) (עבור משתתפים ≤ 65 שנים) או הציון המקביל של $\geq 20/30$ Montreal Cognitive Assessment (MoCA) (עבור משתתפים מתחת לגיל 65);
- (3) ציון $\geq 16/60$ FMA (43, 47). ה-FMA מעריך ליקוי מוטורי של הגפה העליונה מסויימת, כאשר ציון גבוה יותר מצביע על פחות פגיעה בגפה העליונה וציון מתחת ל-16/60 מציינ שלמטופל אין יכולת להגיע ולתפוס חפצים;
- (4) אין בעיה נירולוגית ו/או אורטופדית אחרת שעלולה להשפיע על תנועת הזרוע. קריטריוני ההדרה היו כדלקמן: (1) אובדן ראייה/שמיעה המגביל את הבנת ההוראות של המשתתף או (2) אפזיה המגבילה את הבנתם בהוראות. 95% מהמשתתפים היו ימניים. ל 71% מהמשתתפים הזרוע הפגועה הייתה הזרוע הדומיננטית שלהם.





טבלה 1: מאפיינים הבסיסיים של המשתתפים בכניסה למחקר

ערך P	קבוצת ביקורת (n=9)	קבוצת COMPUTER (n=13)	קבוצת ROBOT (n=11)	
0.29a	57.3 (±12.7)	62.0 (±14.5)	54.3 (±12.7)	גיל (±SD) [שנים]
0.81c	3/6	6/7	5/6	מגדר (גבר/אישה)
0.66a	92 (±42)	104 (±33)	108 (±56)	ימים לאחר שבץ (±SD)
0.44c	5/4	10/3	6/5	צד של השבץ (ימין/שמאל)
0.87c	3/6	4/9	3/8	סוג השבץ (איסכמי/המורגי)
0.96b	39 (18-58)	41 (17-54)	42 (17-53)	FMA/60 (טווח)
0.56b	33 (17-53)	38 (6-57)	36 (15-51)	ARAT/57 (טווח)

- ARAT – Action Research Arm Test
- FMA – Fugl-Meyer Assessment
- הנתונים מוצגים כממוצע וסטיית תקן עבור משתנים מתמשכים וחציון (טווח) עבור משתנים אורדינליים/לא-נורמליים
- a – Univariate ANOVA, b – Kruskal-Wallis H, c – Chi-square, *p < 0.05

3.4.2 מהלך הניסוי

המשתתפים חולקו בצורה אקראית בין שתי הקבוצות ROBOT או COMPUTER לביצוע התערבות תפקודית ארוכת טווח, כאשר הוראות ומשוב סופקו על ידי הרובוט Pepper או מסך מחשב רגיל, בהתאמה. קבוצת ביקורת ניסויית שלישית, לא עברה שום התערבות. הקצאת המשתתפים לאחת מקבוצות ההתערבות הייתה אקראית, והם לא הכירו את פרטי פרוטוקול ההתערבות בקבוצה השנייה.

ההשתתפות במחקר הייתה בנוסף לטיפול הקונבנציונלי שקיבלו המשתתפים במסגרת תכנית השיקום שלהם, שכן מערכת זו נועדה לתמוך בתהליך השיקום ולהעניק הכשרה נוספת על הטיפול הקיים. לאחר פגישת הערכה ראשונית המטופלים הגיעו למתקן פעמיים עד שלוש בשבוע במשך תקופה של 5-7 שבועות, בסך הכל 15 מפגשים טיפוליים עם הרובוט Pepper או מסך המחשב. מספר הפגישות נקבע על סמך עבודות קודמות שתיארו שינוי





קליני משמעותי בתפקוד הזרוע והיד של חולי שבץ לאחר 12-15 מפגשים, בתדירות של שלוש פעמים בשבוע. כל מפגש נמשך בין 30-50 דקות, תלוי ביכולת של המשתתף, עייפות וכו'. בכל מפגש המשתתף שיחק באחד משבעת משחקי התרגיל שתוארו לעיל. לכן, כל משתתף שיחק בכל אחד משבעת משחקי התרגיל בשניים מהמפגשים, ובמפגש האחרון (ה-15) הוצעה להם האפשרות לבחור באיזה משחק תרגיל הם רוצים לשחק בפעם השלישית. למטופלים הייתה אפשרות לשחק יותר מפעם אחת באותו משחק בפגישה בודדת אם רצו בכך. לאחר הגדרת פרמטרי המשחק (למשל, האם זו הפגישה הראשונה, האם יש צורך בסרטון הדגמה וכו'), קלינאי נכח בחדר מטעמי בטיחות בלבד וכדי לפתור בעיות טכניות שעלולות להתרחש. הייתה אינטראקציה מינימלית של המשתתף עם הרופא שניהל את הניסוי. המשתתף ישב מול רובוט Pepper או מול מסך המחשב (ראה איור 1), עם גב לכיוון הרופא, שעמד בפינת החדר ולא התערב באינטראקציה עם רובוט, עם המחשב או רצף המשחק. רמת הקושי במשחק נקבעה בתחילה לפי רמת הליקוי שזוהתה בבדיקות הקליניות עם הקבלה למחקר. לאחר 4-6 ניסיונות בכל דרגת קושי במשחק (למשל, עם 3 כוסות במשחק הכוסות), המערכת שאלה את המשתתף אם הוא רוצה להתקדם לדרגת הקושי הבאה (למשל, עם 4 כוסות באותו המשחק) או להמשיך להתאמן ברמת הקושי הנוכחית.

3.4.3 בעיות טכניות

במהלך הניסוי התמודדנו עם מספר בעיות טכניות. קוראי ה-RFID נכשלו מדי פעם בקריאה נכונה של התגים והמערכת הייתה מציינת למשתמש שהם טעו, למרות שהם, למעשה, צודקים. כאשר שגיאה זו זוהתה כשיטתית (אותו תג RFID נקרא באופן עקבי לא נכון), התג הוחלף מיד על ידי הרופא שניהל את הניסוי והמטופל יכול היה להמשיך באימון. עם זאת, קרה גם שלפעמים תג נקרא בצורה לא נכונה בעוד שלרוב הוא נקרא נכון והתבנית לכאורה אקראית. אם התרחשו יותר משתי טעויות ברציפות, משחק התרגיל הופעל מחדש, מה שבדרך כלל פתר את הבעיה. לעיתים רחוקות, התרחשה בעיה טכנית שדרשה התערבות של מהנדס (לדוגמה, כאשר חוטים נשברו או כאשר היה צורך בריתוך מחדש של החוטים). מכיוון שלא הייתה תמיכה הנדסית רציפה במרפאה שבה נערך הניסוי, אם הייתה מתרחשת בעיה כזו, משחק היה מוחלף באחר והמשתתף יכל לחזור להתאמן עם משחק האימון שנקטע בפגישה הבאה שלו או כאשר הבעיה נפתרה.

3.4.4 מדדי תוצאה

3.4.4.1 שאלון הערכת שביעות רצון של המשתמש

עם השלמת תוכנית ההתערבות המלאה בת 15 מפגשים, כל משתתף מילא שאלון הערכת שביעות רצון של המשתמש, על מנת להעריך עד כמה הוא קיבל את המערכת החדשה. הסקר המותאם אישית התבסס על שאלון הערכת שביעות רצון המשתמש (USEQ). ה-USEQ הוא שאלון בן שש שאלות שפותח על ידי Kizony וחב' (2006) על מנת להעריך מערכות מציאות מדומה לשיקום. המשתתפים התבקשו לדרג את החוויה שלהם בסולם ליקרט מ 1 עד 5, כאשר 1 מציין 'בכלל לא'; ו-5 מציין 'מאוד'. הוספנו ל-USEQ שאלה אחת: "האם תרצה להמשיך להשתמש במערכת במהלך השיקום שלך?" (ראה טבלה 2).

3.4.4.2 שאלון פתוח

בנוסף ל-USEQ, שאלנו את המשתתפים שאלות פתוחות כדי לאפשר להם לתאר את דעתם על המערכת בפירוט. השאלות הפתוחות מפורטות בטבלה 3.





3.4.4.3 שאלון בהתאמה אישית להערכת מגבלות טכניות

עקב הבעיות הטכניות שהתרחשו במהלך הניסוי (כמתואר לעיל) הוספנו שלוש שאלות בסולם ליקרט מ 1 עד 5 על האופן שבו טעויות של המערכת השפיעו על נכונות המשתתפים להמשיך להתאמן עם המערכת. שאלות אלו מפורטות בטבלה 4.

3.4.4.4 מבחנים קליניים

על מנת להעריך תפקוד ופעילות עשינו שימוש במבחנים קליניים הנחשבים ל-gold standard בעולם הקליניקה והמחקר, קרי ב-UE-FMA וב-ARAT.

3.4.4.5 שאלוני הערכה עצמית

על מנת להעריך את מידת ההשתתפות של הנבדקים בפעילויות יומיומיות עשינו שימוש בשאלוני MAL ו-SIS.

3.4.4.6 מדדים קינמטיים

על מנת להעריך את מידת השיקום המוטורי עשינו שימוש במבחנים קינמטיים. הנבדקים עטו חליפה שעליה מרקרים ובאמצעות ציוד למדידת מיקום מדוייק של המרקרים (motion capture) עקבנו אחרי תנועותיהם כאשר ביצעו תנועת הושטה לכוס, הרמה שלה, והנחתה על מדף. המדדים הקינמטיים כללו אספקטים שונים של איכות התנועה, כגון חלקות התנועה, מהירותה, וכיפוף הגו בעת ביצוע התנועה.

3.4.5 ניתוח נתונים

הנתונים נותחו באמצעות SPSS (חבילות סטטיסטיקות למדעי החברה, 26.0). השתמשנו במבחן Mann-Whitney U כדי לנתח את התחומים השונים של USEQ ושל השאלון המותאם אישית על פני שתי קבוצות ההתערבות (ROBOT לעומת COMPUTER), רמות המובהקות נקבעו ל- $p < 0.05$. תשובות של המשתתפים לשאלות הפתוחות נותחו פר שאלה ומדווחות כאן כאחוז מהמשיבים שהחזיקו בפרספקטיבה מסוימת, יחד עם ציטוטים ישירים אנקדוטליים. ביצענו מבחן קורלציה של Spearman rho על מנת לבחון את התאמה בין רמת הליקוי, כפי שהוגדרה בציון ה-FMA בכניסה למחקר, לבין הערכת המשתתפים לגבי תרומת המערכת לשיקום הגפיים העליונות שלהם (שאלה 6 ב USEQ) והנכונות שלהם להמשיך להתאמן עם המערכת (שאלה 7 ב USEQ).

בנוסף, ניתחנו את ההתאמה בין הערכת תרומת המערכת לשיקום הגפיים העליונות שלהם לבין נכונותם להמשיך להתאמן עם המערכת.

עבור משתנים אורדינליים (FMA-UE, ARAT, SIS, MAL) השתמשנו במבחן Friedman לניתוח שינויים לאורך זמן, ובמבחן Kruskal-Wallis H לניתוח שינויים בין קבוצות. השתמשנו במבחן Wilcoxon signed-rank לניתוחי מבדקי פוסט-הוק בתוך כל קבוצה בנפרד; חושו הבדלים לאחר התערבות וטרום התערבות (T2-T1). השתמשנו ב-Kruskal-Wallis H כדי לנתח שינויים בין קבוצות ובמבחן Mann-Whitney U כדי להשוות הבדל זה בין כל שתי קבוצות. רמת המובהקות נקבעה ל- $p \leq 0.05$. עקב השוואות מרובות, ערך P המציין מובהקות שונה ל- $p \leq 0.01$, באמצעות תיקון Bonferroni. גודל ההשפעה חושב באמצעות Kendall's W (Coefficient of Concordance), כאשר (כמו בהנחיות הפרשנות של Cohen's להשפעות טיפול שיקומי שהוצגו על ידי Kinney et al.) ערך 0.14 מצביע על השפעה קטנה, 0.31 מציין השפעה מתונה ו-0.61 ומעלה מציין השפעה חזקה.





עבור כל קבוצה, חושב שיעור המשתתפים שהשיגו שיפור השווה או מעבר ל-MCID של כל מדד (השיפור המינימלי אשר הוא בעל משמעות קלינית), למעט המשתתפים שהציון שלהם בבסיס (T1) היה גבוה מהציון המקסימלי האפשרי פחות ה-MCID.

עבור כל מדד תוצאה קינמטי, השתמשנו במודל מעורב ליניארי (LMM) כדי לנתח את תוצאות ההערכות האורך על פני שתי נקודות הזמן ושלוש הקבוצות עם נושא משותף (כלומר, קבוצה: רובוט/מחשב/ביקורת), שני גורמים בתוך הנושא (כלומר, זמן: T1/T2; ומשקל: ריק/מלא), והאינטראקציה בין גורמים אלו. עבור כל הבדיקות הפוסט-הוק, ערכי p הותאמו באמצעות תיקון Bonferroni להשוואות מרובות.

טבלה 2: שאלון הערכת שביעות רצון המשתמש (USEQ)

שאלה	תגובה מאוד - בכלל לא
שאלה 1. נהניתם מהשימוש במערכת?	1 2 3 4 5
שאלה 2. האם הצלחת להשתמש במערכת?	1 2 3 4 5
שאלה 3. האם הצלחת לשלוט במערכת?	1 2 3 4 5
שאלה 4. האם המידע שסיפקה המערכת היה ברור לך?	1 2 3 4 5
שאלה 5. האם הרגשת אי נוחות במהלך ההתנסות שלך עם המערכת?	1 2 3 4 5
שאלה 6. האם אתה חושב שמערכת זו תועיל לשיקום הגפיים העליונות שלך?	1 2 3 4 5
שאלה 7. האם תרצה להמשיך להשתמש במערכת במהלך השיקום שלך?	1 2 3 4 5

טבלה 2: שאלות מתוך שאלון הערכת שביעות רצון המשתמש, שבו המשתתפים מעריכים את הניסיון שלהם עם המערכת בסולם ליקרט מ 1 - "בכלל לא" עד 5 - "מאוד".





טבלה 3: שאלון פתוח בהתאמה אישית

מה דעתך על המערכת?
מה מצא חן בעיניך?
מה לא אהבת?
איזה משחק האימון האהוב עליך? למה?
היה משחק התעמלות שלא אהבת? איזה משחק? למה?
מה הייתם מוסיפים או משנים?

טבלה 3: השאלון הפתוח המותאם אישית, שבו יכלו המשתתפים להעריך ולתאר באופן חופשי את הניסיון שלהם עם המערכת.

טבלה 4: הערכת המשתתפים לגבי ההשפעות של טעויות המערכת על החוויה הכוללת שלהם

שאלה	תגובה מאוד - בכלל לא
שאלה 1. הרגשת שהמערכת אמינה?	1 2 3 4 5
שאלה 2. באיזו מידה הטעויות של המערכת השפיעו על האמון שלך בה?	1 2 3 4 5
שאלה 3. באיזו מידה הטעויות של המערכת השפיעו על הנכונות שלך להמשיך להתאמן איתה?	1 2 3 4 5

טבלה 4: הערכת המשתתפים מגבלות הטכניות, כאשר המשתתפים העריכו את האמון שלהם לפי סולם ליקרט מ 1 – "בכלל לא" ועד 5 – "מאוד".

4. תוצאות:

4.1 משתתפים

בסך הכל גוייסו אנשים למחקר. מתוכם, 10 לא עמדו בקריטריוני ההכללה. 33 המשתתפים הנותרים חולקו באופן אקראי לשלוש קבוצות: קבוצת ההתערבות ROBOT (11 משתתפים) או COMPUTER (13 משתתפים) וקבוצת CONTROL (9 משתתפים). כל המשתתפים בשלוש קבוצות הניסוי המשיכו לקבל את הטיפול השגרתי במקביל להשתתפותם בניסוי. יחידת השיקום האמבולטורית נסגרה מאמצע מרץ 2020 עד אמצע מאי 2020 עקב COVID-19. באותו זמן, ארבעה משתתפים היו בעיצומה של ההתערבות. מסיבה זו המשתתפים האלה לא יכלו להמשיך להשתתף בתוכנית ההתערבות והודחו מהמחקר. גבר אחד מהמשתתפים





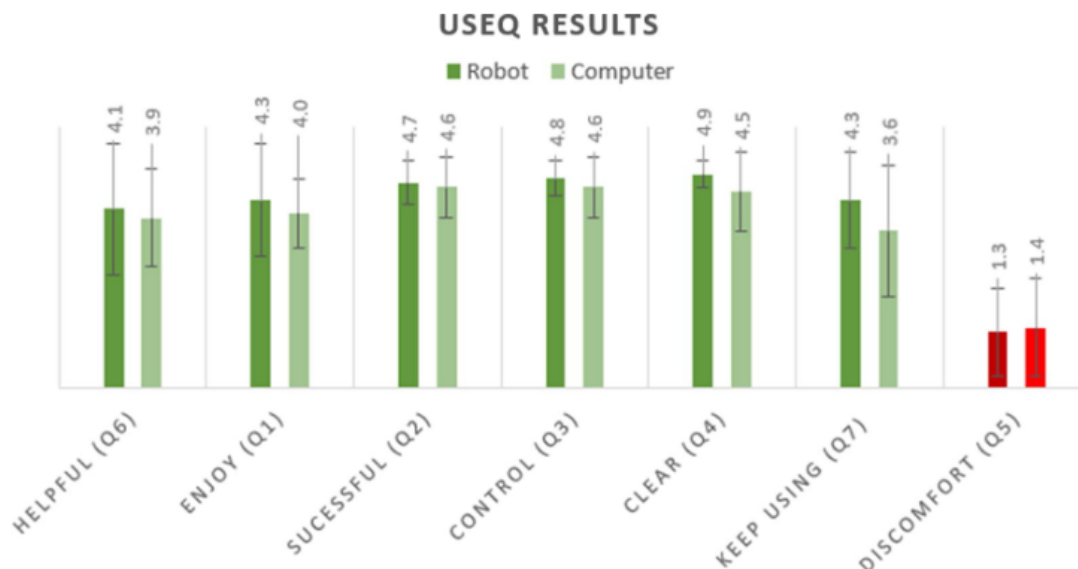
בקבוצת ROBOT לא נכלל בשל סיבה זו לאחר ארבעה מפגשי התערבות. חמישה משתתפים בקבוצת COMPUTER לא השלימו את ההתערבות. שלושה מהם לא נכללו עקב סגר COVID-19, שקטעה את פרוטוקול ההתערבות. מתוכם אחד היה גבר שכבר סיים שבעה מפגשי התערבות עד אותו השלב ושתיים היו נשים שכבר סיימו ארבעה ותשעה מפגשי התערבות. בנוסף, שתי נשים נשרו מקבוצת COMPUTER מאחר שלא רצו להמשיך בהתערבות (20% מ-10 המשתתפים הנותרים): אישה בת 40 לאחר ארבעה מפגשי התערבות ואישה בת 59 לאחר שמונה מפגשים. אף אחד מהמשתתפים בקבוצת ROBOT לא נשר מרצונו. משתתף אחד נשר מקבוצת ה-CONTROL.

עשרה משתתפים בקבוצת ROBOT ושמונה משתתפים בקבוצת COMPUTER השלימו 15 מפגשי התערבות. המשתתפים השתתפו ב-306 מפגשים בסך הכל (154 מפגשים בקבוצת ROBOT ו-152 מפגשים בקבוצת COMPUTER).

4.2 תוצאות של השאלון הערכת שביעות רצון המשתמש (USEQ) שעבר שינויים

כל התוצאות מה-USEQ מסוכמות באיור 7. הציון הממוצע לשאלה "האם אתה חושב שמערכת זו הייתה מועילה לשיקום הגפיים העליונות שלך?" היה 4.1 ± 1.5 מתוך 5 עבור קבוצת ROBOT ו- 9 ± 1.1 עבור קבוצת COMPUTER ($Z = -0.717$, $p = 0.473$). לשאלה "האם נהנית מהשימוש במערכת?" המשתתפים בקבוצת ROBOT נתנו ציון ממוצע של 4.3 ± 1.3 , ובקבוצת COMPUTER הוא היה 4.0 ± 0.8 ($Z = -1.346$, $p = 0.178$). כשנשאל "האם תרצה להמשיך להשתמש במערכת במהלך השיקום שלך?" המשתתפים בקבוצת ROBOT הגיבו עם ציון ממוצע של 4.3 ± 1 ובקבוצת COMPUTER הציון הממוצע היה 3.6 ± 1.5 ($Z = -1.052$, $p = 0.293$). כאשר משווים את החוויה של שתי הקבוצות, למרות שהדירוגים עבור קבוצת ROBOT היו גבוהים יותר עבור כל הפרמטרים, לא היה הבדל מובהק סטטיסטית בין הקבוצות בדירוג שלהן עבור אף אחת משאלות USEQ. לא מצאנו קשר בין רמת הליקוי הראשונית, כפי שהוגדרה על ידי ה-FMA, לבין הערכת המשתתפים לגבי תרומת המערכת לגפיים העליונות שלהם ($r_s = -.007$, $p = .978$), או לנכונותם להמשיך להתאמן עם המערכת לאחר קורלציה חזקה בין הערכת המשתתפים של תרומת המערכת לשיקומם לבין נכונותם להמשיך להתאמן איתה ($r_s = .774$, $p < .0001$).





איור 7: תוצאות שאלון הערכת שביעות רצון המשתמש (USEQ) ממוצע \pm סטיית תקן. ציון 1 מציין "בכלל לא" ו-5 מציין "מאוד". הפסים הירוקים מציינים את התשובות לשאלות שהדירוג הגבוה יותר מעיד על חוויה חיובית יותר עם הפלטפורמה. הפסים האדומים מציינים את התשובות לשאלה שדירוג נמוך לגביהן מצביע על חוויה חיובית יותר עם הפלטפורמה.

4.3 תוצאות של השאלון הפתוח

לא הייתה התאמה ברורה בין המשתתפים לגבי ההיבטים של תוכנית האימונים שהם העדיפו. 14 מתוך 18 (78%) ציינו שהם נהנים מההיבט המוטורי של המשימה, ו-11 מתוך 18 (61%) ציינו שהם נהנים מתוספת של אתגר הקוגניטיבי (זיכרון ותפיסה מרחבית). 9 מתוך 18 משתתפים (50%) ציינו שמשחק האימון המועדף עליהם היה חדר הבריחה, שכן הוא כלל גם משימות מוטוריות וגם אתגר החשיבה; המשתתפים ציינו שזה כמו לפתור חידה. שני משתתפים ציינו שהוא קצר מדי לדעתם ושהם היו רוצים שיתווספו לו עוד משימות. שמונה משתתפים (44%) ציינו שהם אוהבים את כל משחקי האימון.

13 מתוך 18 (72%) מהמשתתפים ציינו שהם אוהבים את הגיוון של המשחקים ואת התוספת של האתגר הקוגניטיבי הדו-משימתי. שלושה משתתפים (17%) ציינו שהם מעדיפים את משחקים שכללו משימות הגעה-תפיסה-ומיקום (משחקים 1, 2 ו-5), ושלושה משתתפים ציינו שהם מעדיפים את משחקי הגעה-לתפיסה-מניפולציה, שדרשו מניפולציה עם החפצים (משחקים 3, 4, 6 ו-7). חשוב לציין, שחמישה משתתפים (28%) ציינו שהם רוצים היו מעדיפים מגוון גדול יותר של משחקי התעמלות, כך שבכל מפגש יהיה סוג חדש של משחק (במערכת הנוכחית עם שבע משחקים המשמשים ל-15 מפגשים היתה חזרה על משחקים בין ההפעלות). בנוסף, שישה משתתפים (33%) ציינו שהם ייהנו ממשימה מאתגרת יותר הן מבחינת שליטה מוטורית (לדוגמה, משקל כבד יותר, יותר רמות משחק) והן מהדרישה הקוגניטיבית (לדוגמה, יותר חידות). לבסוף, ארבעה משתתפים (22%) ציינו שהם מעדיפים מערכת שיכולה לזהות אוטומטית את היכולות המוטוריות והקוגניטיביות שלהם כמו גם את הביצועים שלהם ועושה התאמה לרמת האימון האישית שלהם, כמו כן נותנת משוב בהתאם לביצועים המוטוריים והקוגניטיביים שלהם. שני משתתפים מקבוצת ROBOT ציינו





שהם רוצים שהרובוט יהיה לבוש כדי שיהיה יותר דומה לאדם. כאשר הוצע למשתתפים לבחור באיזה משחק לשחק במפגש האחרון שלהם, חמישה מתוך 10 משתתפים בקבוצת ROBOT בחרו במשחק הכוסות או מטרה בתצורה מוגבלת בזמן; ארבעה משתתפים בחרו כל אחד במשחק אחר; משתתף אחד לא בחר משחק. בקבוצת COMPUTER החלוקה הייתה כדלקמן: שני משתתפים בחרו במשחק המטרה; שניים - חדר הבריחה; שניים – "בלאק ג'ק"; אחד - המפתחות; ואחד - משחק המטבח.

להלן נצטט מספר הצהרות אנקדוטיות של המשתתפים:

"הרובוט החזיר לי את האמון בזרוע שלי" (P07, קבוצת ROBOT);

"באף אחד מהמפגשים הטיפוליים האחרים שלקחתי בהם חלק (לא במסגרת הניסוי) לא היה התמקדות ביד כמו כאן; כאן העזתי לעשות דברים עם היד שלא חשבתי שאצליח לעשות וזה עזר לי להאמין שאני יכול לעשות את זה גם בבית" (P14, קבוצת ROBOT);

"מאוד אהבתי את המשחקים, הרגשתי שזיהית בדיוק את הבעיה ופגעת בול בטיפול בה" (P13, קבוצת ROBOT);

"אני רוצה לבוא רק למפגשים עם הרובוט" (מתוך כל הפעולות שיקומיות בהן עסק אז) (P03, קבוצת ROBOT);

"אני חושב שצריך מגוון גדול יותר של משחקים, זה משעמם לשחק את אותו משחק כמה פעמים" (P14, קבוצת COMPUTER).

4.4 בעיות טכניות

לא הייתה השפעה של הבעיות הטכניות על קבלת המערכת על ידי המשתתפים לאחר ההתערבות ארוכת הטווח, ולא היה הבדל בהקשר זה בין שתי קבוצות ההתערבות. המשתתפים בשתי הקבוצות דיווחו שהם מצאו את המערכת כאמינה (קבוצת ROBOT: 4.3 ± 1.1 ; קבוצת COMPUTER: 3.9 ± 1.1 ; $Z = -.910$, $p = .363$). המשתתפים דיווחו כי טעויות המערכת לא השפיעו על האמון שלהם במערכת (קבוצת ROBOT: 2.0 ± 1.2 ; קבוצת COMPUTER: 2.0 ± 1.1 ; $Z = -.188$, $p = .851$) או על נכונותם להמשיך להתאמן איתה (קבוצת ROBOT: 1.6 ± 1.3 ; קבוצת COMPUTER: 2.0 ± 1.4 ; $Z = -.680$, $p = .496$).

4.5 תוצאות קליניות, קינמטיות ושאלוני הערכה עצמית

המשתתפים בקבוצת ROBOT השתפרו באופן מובהק בין 1T ו-2T (ראה טבלה 5 ו 6) במדדים הקינמטיים והקליניים שלהם, שכללו חלקות של התנועה, Fugl-Meyer upper- (ARAT) action research arm test ו- extremity assessment (FMA-UE). לא נמצא שיפור מובהק (ראה טבלה 5 ו 6) במדדים אלו עבור המשתתפים בקבוצת COMPUTER או קבוצת הביקורת בין 1T ו-2T. לא נמצא הבדל מובהק בין הקבוצות השונות במדד כיפוף הגו.

100% מהמשתתפים בקבוצת SAR השתפרו והגיעו או עברו את ההבדל המינימלי החשוב מבחינה הקלינית (MCID) בקו-ב-ARAT, - תקן הזהב לביצועי פעילות הגפיים העליונות לאחר שבץ מוחי. מחקר זה הוכיח הן את ההיתכנות והן את התועלת הקלינית של שימוש ב-SAR לאינטראקציה ארוכת טווח עם אנשים לאחר שבץ כחלק מתכנית השיקום שלהם.





טבלה 5: תוצאות קליניות והערכה עצמית

השוואה בין הקבוצות T2-T1		השוואה בתוך הקבוצה T2-T1		לאחר 5-7 שבועות (T2)	בייסליין (T1)	קבוצה	מדד
p	H	p	Z				
0.001***	13.03	.005**	-2.81	54.2 (±5.8)	43.3 (±10.6)	רובוט (n=10)	FMA-UE (0-60)
		.018	-2.37	52.1 (±13.7)	42.1 (±12.0)	מחשב (n=8)	
		.865	-1.17	40.5 (±13.1)	41.2 (±10.3)	ביקורת (n=8)	
0.023*	7.55	.005**	-2.81	50 (±7.6)	36.6 (±11.5)	רובוט (n=10)	ARAT (0-57)
		.028	-2.20	47.3 (±17.6)	37.0 (±16.6)	מחשב (n=8)	
		.673	-.42	37.5 (±13.2)	35.3 (±10.5)	ביקורת (n=8)	
0.264	2.67	**5.00	-2.67	3.8 (±1.1)	2.5 (±1.8)	רובוט (n=10)	MAL-AoU (0-5)
		.012	-2.52	3.3 (±1.5)	2.4 (±1.4)	מחשב (n=8)	
		28.0	-1.99	3.1 (±1.5)	2.2 (±1.2)	ביקורת (n=7)	
0.210	3.13	**07.0	-2.55	3.5 (±1.1)	2.2 (±1.6)	רובוט (n=10)	MAL QoM (0-5)
		12.0	-2.24	3.1 (±1.5)	2.2 (±1.3)	מחשב (n=8)	
		28.0	-1.99	2.9 (±1.3)	2.0 (±.9)	ביקורת (n=7)	
0.849	0.33	.028	-2.19	77.7 (±15.9)	68.2 (±12.2)	רובוט (n=10)	SIS: הציון הכולל (100 מ)
		.128	-1.52	74.0 (±16.2)	59.2 (±18.0)	מחשב (n=7)	
		.018	-2.36	77.6 (±12.8)	59.2 (±15.2)	ביקורת (n=7)	
0.915	0.18	0.091	-1.69	68 (±22.1)	58.5 (±21.09)	רובוט (n=10)	SIS: התאוששות המורגשת כללית (0-100)
		.147	-1.45	74.0 (±16.2)	59.2 (±18.0)	מחשב (n=7)	
		.112	-1.59	77.6 (±12.8)	59.2 (±15.2)	ביקורת (n=7)	

טבלה 5: הערכים מוצגים כממוצע (±סטטיית תקן) עבור מדידות הבסיס (בייסליין) (T1) ולאחר 5-7 שבועות (T2); הערכים המודגשים מציינים הבדל מובהק בתוך כל קבוצה. כוכביות מציינות את ערך ה-p: *p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.001. לאחר החלת התאמות Bonferroni עבור השוואות מרובות, ערך ה-p הותאם בתוך הקבוצה ונקבע כ-p < 0.01. ראשי תיבות:

- FMA-UE: Fugl Meyer Upper Extremity
- ARAT: Action Research Arm Test
- MAL: Motor Activity Log
- AoU: Amount of Use
- QoM: Quality of Movement
- SIS: Stroke Impact Scale
- logNJ: log Normalized Jerk
- NS: Not significant





המשתתפים בקבוצת ROBOT השתפרו באופן מובהק (ראה טבלה 5) במדדים של איכות תנועה ודרגת השימוש בשאלון ה-MAL. לא נמצא שיפור מובהק במדדים אלו עבור המשתתפים בקבוצת COMPUTER או קבוצת הביקורת.

אף אחת מהקבוצות לא הראתה שיפור מובהק במדדים בשאלון ה-SIS.

טבלה 6: תוצאות קליניות והערכה עצמית

השוואה בין הקבוצות T2-T1		לאחר 5-7 שבועות (T2)	בייסליין (T1)	קבוצה	מדד
p	F				
0.011**	4.647	4.9 (±.1)	5.2 (±.1)	רובוט (n=7)	logNJ
		4.7 (±.2)	5.3 (±.1)	מחשב (n=5)	
		5.3 (±.2)	4.8 (±.1)	ביקורת (n=7)	
0.077	2.619	2.9 (±.2)	3.4 (±.4)	רובוט (n=7)	TD (cm)
		3.2 (±.2)	3.4 (±.3)	מחשב (n=5)	
		3.1 (±.3)	3.3 (±.4)	ביקורת (n=7)	
0.209	1.582	188.9 (±8.8)	160.2 (±9.2)	רובוט (n=7)	מהירות (mm/sec)
		178.9 (±11.5)	150.5 (±12.1)	מחשב (n=5)	
		166.8 (±11.5)	169.5 (±8.6)	ביקורת (n=7)	

טבלה 6: הערכים מוצגים כממוצעים (± סטיית תקן) עבור מדידות הבסיס (T1) ולאחר 5-7 שבועות (T2); הערכים המודגשים מציינים הבדל מובהק בתוך כל קבוצה. כוכביות מציינות את ערך ה-p: *p≤0.05, **p≤0.01, ***p≤0.001. קיצורים: TD: Trunk Displacement, logNJ: log Normalized Jerk.

5. דיון:

כאן אנו מתארים מערכת התעמלות מבוססת רובוטים לשיקום ארוך טווח לאחר שבץ מוחי, שיכולה לעקוב אחר ביצועי המטופלים לאורך זמן. למערכת יש גם תצורה מבוססת מחשב (ללא רובוט) וכוללת מערך מיומן של משימות פונקציונליות מחיי היומיום של האדם, כמו הושטת יד אל כוס או סיבוב מפתח במנעול. אנו מדווחים גם על התוצאות של מחקר שימושיות של המטופל, שבו 33 חולי שבץ מוחי הוקצו לשתי קבוצות התערבות של תוכנית האימון עם שתי הפלטפורמות הללו על פני תקופה של 5-7 שבועות, 2-3 פעמים בשבוע, בסך כולל של 306 מפגשים, או לקבוצת ביקורת. הממצא המשמעותי ביותר של המחקר הוא השיפור הקליני המובהק שנרשם בקבוצת ההתערבות ROBOT.

המערכת שפיתחנו היא חדשנית בשני היבטים עיקריים: (א) תכנון ויישום של משחקי פעילות גופנית לחולי שבץ תוך שימוש בתנועות יד לאחיזה לאובייקטים פיזיים אמיתיים; (ii) בדיקת השימושיות של אינטראקציה ארוכת טווח של חולי שבץ עם רובוט דמוי אדם ומסך מחשב לשיקום. המחקר שלנו הראה כי מטופלים מצאו את המערכת המגוונת מרתקת ומניעה לשיקום בעקבות התערבות ארוכת טווח. המחקר שלנו הראה כי המטופלים מצאו את המערכת בסגנון משחק מעוררת עניין ומעוררת מוטיבציה לשיקום לאחר טיפול ארוך טווח. הם מצאו שהמערכת נותנת מענה לצרכיהם בשיקום הגפיים העליונות והביעו את רצונם להמשיך





להתאמן עם המערכת גם לאחר סיום המחקר. המשתתפים בקבוצת ROBOT דירגו את המערכת גבוה יותר בכל הפרמטרים; עם זאת, בניגוד להשערה הראשונה שלנו, לא מצאנו הבדל מובהק סטטיסטית בין הקבוצות בהערכתן של המערכת, אולי בשל גודל המדגם הקטן. זאת ועוד, בבחינת שיעורי הנשירה, 20% מהמשתתפים בקבוצת COMPUTER נשרו עקב חוסר רצון להמשיך בהתערבות, בעוד שאף אחד מהמשתתפים בקבוצת ROBOT לא נשר מרצונו, מה שמרמז על פוטנציאל המוטיבציוני של המערכת. היה מתאם מובהק בין הערכת המשתתפים לתרומת המערכת לשיקומם לבין נכונותם של המשתתפים להמשיך להתאמן איתה. לפיכך, לא עצם השימוש בטכנולוגיה מגביר את המוטיבציה של האדם לתרגול, אלא ההערכה של יעילותה ותרומתה של הטכנולוגיה לתהליך השיקום.

כפי שהודגש על ידי Brackenridge et al. [4] בסקירה של מכשירים רובוטיים לשיקום, מטרת המערכת היא להגביר את עבודתו של המטפל, לא להחליף אותה. הוא נועד להשלים את הפגישות האחד על אחד עם הקלינאי ולסייע לקלינאי ולמטופל להשיג הכשרה חוזרת וספציפית למשימות באופן מושך ומניע תוך שימוש במשימות וחפצים יומיומיים.

5.1 מחקר SAR לטווח ארוך - הפקת לקחים

למיטב ידיעתנו, זהו המחקר הראשון להערכת התערבות ארוכת טווח באמצעות SAR עם חולים לאחר שבץ מוחי במרכז שיקום, כחלק מתוכנית השיקום הקונבנציונלית שלהם. למרות שבתחומי הבריאות והטיפול קיים פוטנציאל גדול לרובוטים חברתיים לסייע למשתמשים על פני תקופות זמן ממושכות, עדיין יש מספר מוגבל של עבודות המתארות מחקרים אורכיים בתחום זה. Leite et al. (2013), בסקר של רובוטים חברתיים לאינטראקציה ארוכת טווח, ציין מספר סיבות לכך. ראשית, מחקרים ארוכי-טווח הם הרבה יותר עמלניים ודורשים יותר זמן מאשר מחקרים קצרי-טווח, במיוחד בסביבות אקולוגיות ובטבע הבר. שנית, רק בשנים האחרונות הטכנולוגיה הפכה לחזקה מספיק כדי לאפשר מידה מסוימת של אוטונומיה כאשר משתמשים מקיימים אינטראקציה עם רובוטים לפרקי זמן ממושכים. במחקר הנוכחי, הצבנו את המערכת במרכז שיקומי כחלק מתוכנית השיקום המתוכננת של המטופלים, שלדעתנו הייתה מנחה להצלחת יישום המערכת. המערכת המתוארת נבנתה ופותחה על ידי צוות המעבדה הרב-תחומי שלנו, שכלל גם פיזיותרפיסטית שהתמחה בשיקום לאחר שבץ מוחי וגם סטודנטים להנדסה. אנו מאמינים שצוות רב תחומי הוא מרכיב מרכזי בהצלחת הפלטפורמה הזו. התמודדנו עם כמה אתגרים טכניים, כפי שתואר. בעיות טכניות הן חלק מכל יישום טכנולוגי, במיוחד של מכשירי אב טיפוס חדשים. לכן, תמיכה טכנית בעלת תגובה מהירה והכשרת הרופא לפתור בעיות טכניות בסיסיות שעלולות להתרחש, חיוניים להצלחת הטמעת הטכנולוגיה במסגרת שיקום. מחקרים עתידיים על אינטראקציית SAR צריכים לשאוף להשתמש בחדר עם מראה חד כיוונית כך שהמשתתף יוכל לקיים אינטראקציה בטוחה עם המערכת ללא נוכחות של עוזר מחקר, שישב בצד השני של הזכוכית ויהיה מסוגל לראות את המשתתף ולהתערב במקרה של כשל טכני או אם נדרש סיוע אחר. בעת ביצוע מחקרים בשטח, כאשר המטרה היא להעניק טיפול לחולים, ובמקביל, לאסוף את כל הנתונים הרלוונטיים, יש ליצור איזון בין השניים. ביצוע יותר מדי בדיקות קליניות, או מילוי יותר מדי שאלונים, עלולים להיות מתישים עבור המטופלים ועלולים להפריע ליכולתם להפיק תועלת מהטיפול; יחד עם זאת, איסוף הנתונים הרלוונטיים עלול להפריע ליכולת להגיע למסקנה לגבי יעילות הטיפול, או התפיסה של המטופלים לגבי התהליך. לכן, ההמלצה שלנו, בעת ביצוע מחקר ארוך, היא לאפשר, בנוסף למבחנים הפרה ופוסט, במשך חמש דקות בתחילת או בסוף כל פגישה לשאול שלוש שאלות מרכזיות, כדי לאפשר מעקב אחר שינוי פוטנציאלי לאורך זמן, מבלי להתיש את החולים.





5.2 קווים מנחים מוצעים לעיצובים עתידיים של SARs לשיקום

[35] Mataric et al. הציע שתכנון האינטראקציות עם רובוטים חברתיים לשיקום לאחר שבץ מוחי צריך לפעול לפי שני עקרונות מנחים: (i) אינטנסיביות גבוהה של אימון ספציפי למשימה ו-(ii) מערכת שתהיה מרתקת וידידותית למשתמש. במערכת מבוססת הרובוטים שפיתחנו, פעלנו לפי ההנחיות הללו. בהתבסס על עבודתנו הקודמת והמחקר הנוכחי הוספנו מספר קווים מנחים המרחיבים את ההמלצות הללו: (א) מגוון משימות: כדי שמערכת תהיה ישימה על מגוון רחב של מטופלים ורמות שונות של ליקויים, וכדי שהיא תעסיק מטופלים בטווח הארוך, צריכות להיות מגוון משימות, ברמות שונות של מורכבות, שיכולות להתבצע על ידי מטופלים בתפקוד נמוך ותפקוד גבוה כאחד. המשתמשים צריכים להיות מסוגלים להתקדם במשימה בהתאם ליכולתם ולביצועים המוטוריים שלהם. המשתתפים במחקר שלנו הדגישו את מגוון המשימות שהפלטפורמה הזו הציעה להתאמן עליהן, שלא קיבלו את ההזדמנות לתרגל במפגשים טיפוליים אחרים שקיבלו כחלק מתוכנית השיקום הסטנדרטית שלהם. (ii) תקשורת: ההוראות שניתנות למשתמש צריכות להיות פשוטות, עולות בהדרגה בקושי, ומדוברות לאט וברור. עם זאת, זמן התגובה של הרובוט צריך להיות מהיר כמו באינטראקציה בין אדם לאדם. מניסיונו מהמחקר הנוכחי וממחקרים קודמים, את זמן התגובה של המערכת ארוך מ-4-5 שניות המשתתפים חווים אותו כאיטי, מה שגורם לתסכול. הוספנו לרובוט תגובה של "אני בודק" אם לקח יותר מארבע שניות לבדוק האם סדר תואם לתמונה המוצגת, כך שהמשתתף לא יחווה את זמן התגובה של הרובוטים כארוך מדי. (iii) ניהול עייפות: מאחר שחולי שבץ חווים עייפות תכופה וחולשת שרירים, לחולים צריכה להיות יכולת לנוח בעת הצורך. כאשר המטופל עייף ואינו יכול להשלים את המשימה ללא שימוש בתנועות פיצוי לא רצויות, המטופל צריך לנוח או שהמפגש צריך להסתיים. במערכת הנוכחית, בנוסף להצעה למשתתף לנוח או להשהות בעת הצורך, הוספנו גם הפסקות מתיחה מובנות. (iv) משוב ותגמול: משתמשים צריכים לקבל משוב על הביצועים שלהם ועל התוצאות שלהם, מכיוון שזהו מרכיב חיוני בלמידה המוטורית שלהם. עם זאת, כפי שצינו המשתתפים במחקר שלנו, המשוב צריך להינתן באופן ובתדירות שלא ישפיעו לרעה על היענותם להמשך אימונים. חלק מהמשתתפים במחקר שלנו, במיוחד הצעירים (מתחת לגיל 45) ציינו שהם לא רוצים לקבל משוב מילולי על הביצועים שלהם לאחר כל ניסוי, אלא מעדיפים לקבל משוב מילולי לאחר מספר ניסויים ומשוב ויזואלי (כמו הסימן של הרמת אגודל עבור "אהבתי") בעקבות הניסויים האחרים. בנוסף, המשתתפים ציינו שהם רוצים לקבל משוב על הביצועים המוטוריים שלהם. כלומר, הם חיפשו משוב על תנועות הגוף שלהם בזמן שהם ביצעו את המשימה, בין אם היו מעורבים תנועות מפצות כלשהן, בנוסף לביצוע המשימה שלהם. אנו נמצאים כעת בתהליך של פיתוח יכולת זו. (v) התאמה אישית של המערכת ושל האינטראקציה: הערך בהתאמת תכנית השיקום לצרכי האישיים של המטופל הודגש גם על ידי המשתתפים במחקר שלנו, שהזכירו את החשיבות של התאמה אישית של עיצוב HRI ו אינטראקציית אדם-מחשב (HCI) והתאמתה למשימה הספציפית וצרכי המטופל. הם ציינו שהם היו רוצים שהמערכת תוכל להסתגל לביצועים האישיים שלהם, למשל על ידי התאמת המשוב לדפוסי התנועה שלהם, ועל ידי התקדמות אוטומטית ברמות משחק של האימון על סמך אחוזי ההצלחה שלהם. התאמה אישית היא מרכיב חיוני ביצירת אמון ומרכיב חיוני כאשר מטרתם לטפח מוטיבציה.

5.3 אמון ו-SAR באינטראקציה ארוכת טווח

בעבודות קודמות נדונה חשיבות האמון בהקשר של SAR לשיקום. בשל המגבלות והתסכול שחולה שבץ עלול לחוות בגלל הליקויים שלו, מערכת המיועדת לחולי שבץ צריכה להיות אמינה ככל האפשר. Kellmeyer et al. (2018) הדגישו כי הדבר הוא חשוב במיוחד באוכלוסיות פגיעות כמו חולים עם פגיעה נוירולוגית, שבהן





אינטראקציות עם רובוטים נועדו לסייע בשמירה על משטר אימונים, וששם ביסוס אמון ארוך טווח בין המשתמש לרובוט הוא חיוני.

בעבודה הנוכחית הראינו שלמרבה הפלא - למרות שהיו תקלות במערכת, בטווח הארוך זה לא השפיע על הערכת משתתפי המערכת כאמינים או על נכונותם להמשיך להתאמן איתה. כפי שציין אחד המשתתפים: "גם בני אדם עושים טעויות". כלומר, בטווח הארוך תקלות המערכת לא השפיעו על הקבלה הכוללת של המערכת על ידי המשתתפים. ייתכן שהסיבה לכך היא ההבנה שלהם שמדובר במערכת אב טיפוס ומהיכולת של צוות המחקר לפתור את התקלות הטכניות במקום במידת האפשר.

5.4 SAR לשיקום במהלך מגיפת COVID 19

במרץ 2020, ארגון הבריאות העולמי הכריז על COVID-19 כמגיפה. עולם השיקום מתמודד כעת עם אתגרים חדשים בגלל הדרישה להתרחקות חברתית, במיוחד באוכלוסיות בסיכון. Khan ו Amatya (2020) ציינו את שני האתגרים הבאים שעומדים בפני תחום השיקום לאור COVID-19: (1) מתן סביבות פיזיות בטוחות בתוך מחלקות שיקום העומדות בריחוק חברתי והיגיינה; (2) הפחתת הסיכון (כפי שניתן) לחשיפה פוטנציאלית ל-COVID-19 לחולים ולצוות. הדרישה לשמור על מרחק חברתי ולהפחית מגע פיזי מדגישה את הצורך בכלים שיקומיים חלופיים, כגון SARs, כדי לאפשר לחולים לקבל משטר שיקום ללא הפרעה (גם אם שונה).

5.5 מגבלות מחקר והמלצות למחקרים עתידיים:

אמנם השגנו את המטרה של מחקר זה, כלומר, בדיקת השימושיות של המערכת בקרב בעלי העניין בפועל, אנשים לאחר שבץ, אך יהיה חיוני לאסוף נתונים נוספים כדי לחקור את התועלת הקלינית של שימוש ב-SAR לשיקום ארוך טווח.

ניסינו למצוא איזון בין שאלות בניסוח חיובי (כמו ב-USEQ) לבין שאלות בניסוח שלילי (כמו בשאלון הפתוח בו השתמשנו); מחקרים עתידיים צריכים לשמור על איזון בין שאלות בניסוח חיובי ושלילי בעת לימוד תפיסות המשתמשים.

למרות שלא היו משתתפים עיוורי צבעים בניסוי הנוכחי, יהיה זה ערך לאמת בעבודה עתידית שהשימוש בצבע כמאפיין מבדיל במשחקי התעמלות אינו משפיע על יכולתם של אנשים עם עיוורון צבעים להפיק תועלת מתרגילים אלה.

בעוד שמחקר קודם (Lee et al. (2006) מצא רובוט מגולם שמועדף על ידי המשתתפים על פני אוטאר וירטואלי, יכול להיות מלמד לחקור במחקר עתידי גרסה שונה של מצב המחשב, שתכלול קבלת פנים. מסר ותגובות חגיגיות המועברות על ידי, למשל, אוטאר.

אנו מעוניינים להעביר את הכלים מהפרויקט הזה במקור פתוח בעתיד. על חוקרים המעוניינים ליצור קשר עם המחבר המקביל.

6. מסקנות:

הצגנו את אפשרות השימוש בפלטפורמה שפיתחנו לשיקום ארוך טווח עם חולי שבץ בסביבה קלינית ומצאנו מגמה חזקה של קבלת ה-SAR על ידי חולים לאחר שבץ בעקבות אינטראקציה ארוכת טווח זו. האפקט החדשני של ה-SAR לא נעלם אפילו לאחר 15 מפגשי טיפול. הממצא המשמעותי ביותר של המחקר הוא השיפור הקליני המובהק שנרשם בקבוצת ההתערבות ROBOT. מצאנו כי לא רק השימוש הפשוט בטכנולוגיה





מגביר את המוטיבציה של האדם לתרגל, אלא בעיקר ההערכה של המשתמש ליעילות הטכנולוגיה ולתרומתה לתהליך השיקום. מצאנו שכשלים במערכת לא השפיעו על האמון ארוך הטווח שחשו המשתמשים כלפי המערכת. בנוסף, אנו מספקים רשימת מנחיות שימושיות שניתן להשתמש בהן בעת עיצוב ויישום של כלים טכנולוגיים נוספים לצורך שיקום. מחקר עתידי יכול לבחון את התרומה הקלינית של ה-SAR לשיקום של אנשים סובלים משבץ ולכלול משוב על איכות התנועה.

7. ביבליוגרפיה:

1. B. French *et al.*, Does repetitive task training improve functional activity after stroke? A Cochrane systematic review and meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine* **42**, 9-15 (2010).
2. L. G. Richards, K. C. Stewart, M. L. Woodbury, C. Senesac, J. H. Cauraugh, Movement-dependent stroke recovery: a systematic review and meta-analysis of TMS and fMRI evidence. *Neuropsychologia* **46**, 3-11 (2008).
3. S. A. Combs *et al.*, Effects of a repetitive gaming intervention on upper extremity impairments and function in persons with chronic stroke: a preliminary study. *Disability Rehabilitation* **34**, 1291-1298 (2012).
4. J. Brackenridge, L. V. Bradnam, S. Lennon, J. J. Costi, D. A. Hobbs, A review of rehabilitation devices to promote upper limb function following stroke. *Neuroscience Biomedical Engineering* **4**, 25-42 (2016).
5. I. Hubbard, M. Parsons, The conventional care of therapists as acute stroke specialists: a case study. *International Journal of Therapy Rehabilitation* **14**, 357-362 (2007).
6. I. J. Hubbard, M. W. Parsons, C. Neilson, L. M. Carey, Task-specific training: evidence for and translation to clinical practice. *Occupational Therapy International* **16**, 175-189 (2009).
7. R. Lewthwaite *et al.*, Accelerating stroke recovery: body structures and functions, activities, participation, and quality of life outcomes from a large rehabilitation trial. *Neurorehabilitation Neural Repair* **32**, 150-165 (2018).
8. S. M. Michaelsen, R. Dannenbaum, M. F. Levin, Task-specific training with trunk restraint on arm recovery in stroke: randomized control trial. *Stroke* **37**, 186-192 (2006).
9. N. A. Bayona, J. Bitensky, K. Salter, R. Teasell, The role of task-specific training in rehabilitation therapies. *Topics in stroke rehabilitation* **12**, 58-65 (2005).
10. L. H. Thomas *et al.*, Repetitive task training for improving functional ability after stroke: a major update of a Cochrane review. *Stroke* **48**, e102-e103 (2017).





- B. French *et al.*, Repetitive task training for improving functional ability after stroke. *Cochrane database of systematic reviews*, (2016). 11.
- C. Winstein, B. Kim, S. Kim, C. Martinez, N. Schweighofer, Dosage Matters: A Phase IIb Randomized Controlled Trial of Motor Therapy in the Chronic Phase After Stroke. *Stroke* **50**, 1831-1837 (2019). 12.
- M. F. Levin, M. Demers, Motor learning in neurological rehabilitation. *Disability Rehabilitation* **43**, 3445-3453 (2021). 13.
- R. L. Birkenmeier, E. M. Prager, C. E. Lang, n. repair, Translating animal doses of task-specific training to people with chronic stroke in 1-hour therapy sessions: a proof-of-concept study. *Neurorehabilitation* **24**, 620-635 (2010). 14.
- A. Pollock *et al.*, Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2014). 15.
- A. A. Timmermans *et al.*, Sensor-based arm skill training in chronic stroke patients: results on treatment outcome, patient motivation, and system usability. *IEEE Transactions on Neural Systems Rehabilitation Engineering* **18**, 284-292 (2010). 16.
- M. Acciarresi, J. Bogousslavsky, M. Paciaroni, Post-stroke fatigue: epidemiology, clinical characteristics and treatment. *J European Neurology* **72**, 255-261 (2014). 17.
- T. B. Cumming, M. Packer, S. F. Kramer, C. English, The prevalence of fatigue after stroke: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Stroke* **11**, 968-977 (2016). 18.
- M. Goršič, I. Cikajlo, D. Novak, Competitive and cooperative arm rehabilitation games played by a patient and unimpaired person: effects on motivation and exercise intensity. *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* **14**, 1-18 (2017). 19.
- M. D. Popović, M. D. Kostić, S. Z. Rodić, L. M. Konstantinović, Feedback-mediated upper extremities exercise: increasing patient motivation in poststroke rehabilitation. *BioMed Research International* **2014**, (2014). 20.
- J. Rapolienė, E. Endzelytė, I. Jasevičienė, R. Savickas, Stroke patients motivation influence on the effectiveness of occupational therapy. *Rehabilitation Research Practice*, (2018). 21.
- D. Novak, A. Nagle, U. Keller, R. Riener, Increasing motivation in robot-aided arm rehabilitation with competitive and cooperative gameplay. *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* **11**, 64 (2014). 22.
- M. Goršič, I. Cikajlo, M. Javh, N. Goljar, D. Novak, paper presented at the 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2019. 23.





- S. Kashi, R. Feingold Polak, B. Lerner, L. Rokach, S. Levy-Tzedek, A machine-learning model for automatic detection of movement compensations in stroke patients. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, (2020). 24.
- E. V. D. Brown, B. J. Dudgeon, K. Gutman, C. T. Moritz, S. W. McCoy, Understanding upper extremity home programs and the use of gaming technology for persons after stroke. *Disability Health Journal* **8**, 507-513 (2015). 25.
- B. Dudgeon, E. D. Brown, Stroke Survivors' Perspectives on Home Exercise Programs and the Use of Gaming Technology. *American Journal of Occupational Therapy* **69**, (2015). 26.
- A. Warland *et al.*, The feasibility, acceptability and preliminary efficacy of a low-cost, virtual-reality based, upper-limb stroke rehabilitation device: a mixed methods study. *Disability Rehabilitation* **41**, 2119-2134 (2019). 27.
- L. Dipietro *et al.*, Learning, not adaptation, characterizes stroke motor recovery: evidence from kinematic changes induced by robot-assisted therapy in trained and untrained task in the same workspace. *IEEE Transactions on Neural Systems Rehabilitation Engineering* **20**, 48-57 (2011). 28.
- F. Bressi *et al.*, Robotic treatment of the upper limb in chronic stroke and cerebral neuroplasticity: a systematic review. *Journal of Biological Regulators Homeostatic Agents* **34**, 11-44. Technology in Medicine (2020). 29.
- J. Patel *et al.*, Intensive virtual reality and robotic based upper limb training compared to usual care, and associated cortical reorganization, in the acute and early sub-acute periods post-stroke: a feasibility study. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* **16**, 1-12 (2019). 30.
- J. M. Veerbeek, A. C. Langbroek-Amersfoort, E. E. Van Wegen, C. G. Meskers, G. Kwakkel, Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Neurorehabilitation Neural Repair* **31**, 107-121 (2017). 31.
- R. Bertani *et al.*, Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis. *Neurological Sciences* **38**, 1561-1569 (2017). 32.
- H. Rodgers *et al.*, Robot assisted training for the upper limb after stroke (RATULS): a multicentre randomised controlled trial. *The Lancet* **394**, 51-62 (2019). 33.
- A. Tapus, C. Țăpuș, M. J. Matarić, User—robot personality matching and assistive robot behavior adaptation for post-stroke rehabilitation therapy. *Intelligent Service Robotics* **1**, 169 (2008). 34.
- M. Matarić, A. Tapus, C. Winstein, J. Eriksson, Socially assistive robotics for stroke and mild TBI rehabilitation. *Advanced Technologies in Rehabilitation* **145**, 249-262 (2009). 35.
- M. J. Matarić, J. Eriksson, D. J. Feil-Seifer, C. J. Winstein, Socially assistive robotics for post-stroke rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering Rehabilitation* **4**, 5 (2007). 36.





- K. Swift-Spong, E. Short, E. Wade, M. J. Matarić, paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015. 37.
- R. Mead *et al.*, paper presented at the 19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication, 2010. 38.
- J. Fasola, M. J. Matarić, A socially assistive robot exercise coach for the elderly. *Journal of Human-Robot Interaction* **2**, 3-32 (2013). 39.
- J. Fasola, M. J. Matarić, Socially assistive robot exercise coach: motivating older adults to engage in physical exercise. *Experimental Robotics*, 463-479 (2013). 40.
- O. Avioz-Sarig, S. Olatunji, V. Sarne-Fleischmann, Y. Edan, Robotic System for Physical Training of Older Adults. *International Journal of Social Robotics*, 1-16 (2020). 41.
- W.-Y. G. Louie, D. McColl, G. Nejat, Acceptance and attitudes toward a human-like socially assistive robot by older adults. *Assistive Technology* **26**, 140-150 (2014). 42.
- G. Laban, Z. Ben-Zion, E. S. Cross, Social robots for supporting Post-Traumatic Stress Disorder diagnosis and treatment. *Frontiers in psychiatry* **12**, (2021). 43.
- C. Mucchiani, P. Cacchione, R. Mead, M. J. Johnson, M. Yim, paper presented at the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). October 25-29, 2020, , Las Vegas, NV, USA (Virtual), 2020. 44.
- B. Scassellati, M. Vázquez, The potential of socially assistive robots during infectious disease outbreaks. *Science Robotics* **5**, eabc9014 (2020). 45.
- R. Feingold Polak, O. Barzel, S. Levy-Tzedek, A robot goes to rehab: a novel gamified system for long-term stroke rehabilitation using a socially assistive robot-methodology and usability testing. *Journal of NeuroEngineering Rehabilitation* **18**, (2021). 46.
- R. Feingold Polak, A. Bistritsky, Y. Gozlan, S. Levy-Tzedek, paper presented at the 2019 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR), 2019. 47.
- R. Feingold Polak, S. Levy-Tzedek, paper presented at the Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 2020. 48.
- R. Kizony, N. Katz, D. Rand, P. L. T. Weiss, paper presented at the Proceedings of 11th Annual CyberTherapy 2006 Conference: Virtual Healing: Designing Reality, Canada: Gatineau, 2006. 49.
- Y. Koren, R. Feingold Polak, S. Levy-Tzedek, Extended Interviews with Stroke Patients Over a . *unpublished* Long-term Rehabilitation Using Human-Robot or Human-Computer Interactions. *data*, (2021). 50.
- J.-H. Lin *et al.*, Psychometric comparisons of 4 measures for assessing upper-extremity function in people with stroke. *Physical Therapy* **89**, 840-850 (2009). 51.





- R. Feingold-Polak, A. Yelkin, S. Edelman, A. Shapiro, S. Levy-Tzedek, The effects of an object's height and weight on force calibration and kinematics when post-stroke and healthy individuals reach and grasp. *J Scientific Reports* **11**, 1-18 (2021). 52.
- L. D. Riek, Healthcare robotics. *Communications of the ACM* **60**, 68-78 (2017). 53.
- J. C. Pulido *et al.*, A socially assistive robotic platform for upper-limb rehabilitation: a longitudinal study with pediatric patients. *IEEE Robotics Automation Magazine* **26**, 24-39 (2019). 54.
- E. Broadbent *et al.*, Using robots at home to support patients with chronic obstructive pulmonary disease: pilot randomized controlled trial. *Journal of Medical Internet Research* **20**, e45 (2018). 55.
- N. Céspedes Gómez *et al.*, A Socially Assistive Robot for Long-Term Cardiac Rehabilitation in the Real World. *Frontiers in Neurorobotics* **15**, 21 (2021). 56.
- I. Leite, C. Martinho, A. Paiva, Social robots for long-term interaction: a survey. *International Journal of Social Robotics* **5**, 291-308 (2013). 57.
- S. Honig, T. Oron-Gilad, Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development. *Frontiers in psychology* **9**, 861 (2018). 58.
- R. Quintas *et al.*, Describing functioning, disability, and health with the international classification of functioning, disability, and health brief core set for stroke. *American journal of Physical Medicine Rehabilitation* **91**, S14-S21 (2012). 59.
- J. Bernhardt *et al.*, Agreed definitions and a shared vision for new standards in stroke recovery research: the stroke recovery and rehabilitation roundtable taskforce. *International Journal of Stroke* **12**, 444-450 (2017). 60.
- C. A. Doman, K. J. Waddell, R. R. Bailey, J. L. Moore, C. E. Lang, Changes in upper-extremity functional capacity and daily performance during outpatient occupational therapy for people with stroke. *American Journal of Occupational Therapy* **70**, (2016). 61.
- K. J. Waddell *et al.*, Does task-specific training improve upper limb performance in daily life poststroke? *Neurorehabilitation Neural Repair* **31**, 290-300 (2017). 62.
- F. Jones, A. Riazi, Self-efficacy and self-management after stroke: a systematic review. *Disability Rehabilitation* **33**, 797-810 (2011). 63.
- A. Bandura, V. S. Ramachaudran, Encyclopedia of human behavior. *New York: Academic Press* **4**, 71-81 (1994). 64.
- G. Robinson-Smith, M. V. Johnston, J. Allen, Self-care self-efficacy, quality of life, and depression after stroke. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation* **81**, 460-464 (2000). 65.





- F. E. Buma *et al.*, Brain activation is related to smoothness of upper limb movements after stroke. *Experimental Brain Research* **234**, 2077-2089 (2016). 66.
- N. Hogan, D. Sternad, Sensitivity of smoothness measures to movement duration, amplitude, and arrests. *Journal of Motor Behavior* **41**, 529-534 (2009). 67.
- M. Cirstea, M. F. Levin, Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain* **123**, 940-953 (2000). 68.
- D. Fruchter, R. Feingold Polak, S. Berman, S. Levy-Tzedek, Hierarchy in algorithm-based feedback to patients working with a robotic rehabilitation system: towards user-experience optimization *IEEE Transactions on Human-Machine Systems (THMS)*, (2022). 69.
- H.-M. Chen, H.-L. Lee, F.-C. Yang, Y.-W. Chiu, S.-Y. Chao, Effectiveness of Motivational Interviewing in Regard to Activities of Daily Living and Motivation for Rehabilitation among Stroke Patients. *International Journal of Environmental Research Public Health* **17**, 2755 (2020). 70.
- K. Oyake, M. Suzuki, Y. Otaka, K. Momose, S. Tanaka, Motivational Strategies for Stroke Rehabilitation: A Delphi Study. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation* **101**, 1929-1936 (2020). 71.
- C. Winstein, R. Varghese, Been there, done that, so what's next for arm and hand rehabilitation in stroke? *NeuroRehabilitation* **43**, 3-18 (2018). 72.
- A. Specian, R. Mead, S. Kim, M. Matarić, M. Yim, Quori: A Community-Informed Design of a Socially Interactive Humanoid Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, (2021). 73.
- A. Langer, R. Feingold Polak, O. Mueller, P. Kellmeyer, S. Levy-Tzedek, Trust in socially assistive robots: Considerations for use in rehabilitation. *Neuroscience Biobehavioral Reviews* **104**, 231-239 (2019). 74.
- F. Khan, B. Amatya, Medical rehabilitation in pandemics: towards a new perspective. *Journal of Rehabilitation Medicine* **52**, 5-8 (2020). 75.
- M. Folstein, S. Folstein, P. McHugh, "Mini-mental state." A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *J Psychiatr Res* **12**, 189-198 (1975). 76.
- N. Carson, L. Leach, K. Murphy, A re-examination of Montreal Cognitive Assessment (MoCA) cutoff scores. *International Journal of Geriatric Psychiatry* **33**, 379-388 (2018). 77.
- A. R. Fugl-Meyer, L. Jääskö, I. Leyman, S. Olsson, S. Steglind, The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of Rehabilitation Medicine* **7**, 13 (1975). 78.





- E. J. Woytowicz *et al.*, Determining levels of upper extremity movement impairment by applying a cluster analysis to the Fugl-Meyer assessment of the upper extremity in chronic stroke. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation* **98**, 456-462 (2017). 79.
- M. F. Levin, D. G. Liebermann, Y. Parmet, S. Berman, Compensatory versus noncompensatory shoulder movements used for reaching in stroke. *Neurorehabilitation Neural Repair* **30**, 635-646 (2016). 80.
- K. F. Schulz, D. G. Altman, D. Moher, C. Group, CONSORT 2010 statement: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials. *Trials* **11**, 32 (2010). 81.
- A. Turton *et al.*, Home-based Reach-to-Grasp training for people after stroke is feasible: a pilot randomised controlled trial. *Clinical Rehabilitation* **31**, 891-903 (2017). 82.
- H. Park, S. Kim, C. J. Winstein, J. Gordon, N. Schweighofer, Short-duration and intensive training improves long-term reaching performance in individuals with chronic stroke. *Neurorehabilitation Neural Repair* **30**, 551-561 (2016). 83.
- A. A. Mullick, S. K. Subramanian, M. F. Levin, Emerging evidence of the association between cognitive deficits and arm motor recovery after stroke: a meta-analysis. *Restorative Neurology Neuroscience* **33**, 389-403 (2015). 84.
- M. L. Woodbury *et al.*, Dimensionality and construct validity of the Fugl-Meyer Assessment of the upper extremity. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation* **88**, 715-723 (2007). 85.
- K.-c. Lin *et al.*, Minimal detectable change and clinically important difference of the Stroke Impact Scale in stroke patients. *Neurorehabilitation neural repair* **24**, 486-492 (2010). 86.
- R. C. Lyle, A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research. *International Journal of Rehabilitation Research* **4**, 483-492 (1981). 87.
- G. Uswatte, E. Taub, D. Morris, K. Light, P. Thompson, The Motor Activity Log-28: assessing daily use of the hemiparetic arm after stroke. *Neurology* **67**, 1189-1194 (2006). 88.
- P. W. Duncan *et al.*, The stroke impact scale version 2.0: evaluation of reliability, validity, and sensitivity to change. *Stroke* **30**, 2131-2140 (1999). 89.
- M. Mulder, R. Nijland, Stroke Impact Scale. *Journal of Physiotherapy* **62**, 117 (2016). 90.
- M. Goffredo *et al.*, Retrospective Robot-Measured Upper Limb Kinematic Data From Stroke Patients Are Novel Biomarkers. *Frontiers in Neurology* **12**, (2021). 91.
- G. Thrane, K. S. Sunnerhagen, M. A. Murphy, Upper limb kinematics during the first year after stroke: the stroke arm longitudinal study at the University of Gothenburg (SALGOT). *Journal of NeuroEngineering Rehabilitation* **17**, 1-12 (2020). 92.





- R. Feingold-Polak, O. Barzel, S. Levy-Tzedek, A robot goes to rehab: a novel gamified system for long-term stroke rehabilitation using a socially assistive robot—methodology and usability testing. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* **18**, 1-18 (2021). 93.
- R. Kizony, N. Katz, D. Rand, P. L. T. Weiss, in *Cyberpsychology & Behavior*. (MARY ANN LIEBERT INC 140 HUGUENOT STREET, 3RD FL, NEW ROCHELLE, NY 10801 USA, 2006), vol. 9, pp. 687-688. 94.
- J.-A. Gil-Gómez *et al.*, USEQ: a short questionnaire for satisfaction evaluation of virtual rehabilitation systems. *Sensors* **17**, 1589 (2017). 95.

