

אוניברסיטת בן-גוריון
הפקולטה למדעי ההנדסה
המחלקה להנדסת תעשייה וניהול

ניתוח תנועות פיצוי אצל נבדקים לאחר שבץ

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מוסמך
בהנדסת תעשייה וניהול M.Sc.

מאת: איילת דוידי

מנחים: פרופ' ישראל פרמט, פרופ' סיגל ברמן

אוניברסיטת בן-גוריון
הפקולטה למדעי ההנדסה
המחלקה להנדסת תעשייה וניהול

ניתוח תנועות פיצוי אצל נבדקים לאחר שבץ

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מוסמך
בהנדסת תעשייה וניהול M.Sc.

מאת: איילת דוידי

מנחים: פרופ' ישראל פרמט, פרופ' סיגל ברמן

תאריך: 14.10.2019	אילת דוידי	חתימת המחבר: איילת דוידי
תאריך: 14.10.2019	ישראל פרמט	אישור המנחה: פרופ' ישראל פרמט
תאריך: 15.10.2019	סיגל ברמן	אישור המנחה: פרופ' סיגל ברמן
תאריך: 17/10/2019	אילת דוידי	אישור יו"ר וועדת הוראה מחלקתית:

תקציר

אחת ההפרעות השכיחות שנצפו לאנשים שעברו אירוע נירולוגי, כמו שבץ מוחי, היא הפרעה מוטורית שעלולה להוביל לסיבוכים משניים. ההפרעה בתנועה באה לידי ביטוי בהגבלה בטווח התנועה, וכן במכלול התנועות. שליטה מוטורית היא התהליך שבאמצעותו בני אדם מפעילים ומתאמים שרירים וגפיים כחלק מביצוע פעולות יומיומיות. תהליך זה דורש אינטראקציה בין מערכת העצבים המרכזית למערכת השלד, לפיה האיברים המעורבים נדרשים לפעול כדי לייצר תנועה. ספסטייות היא בעיה בשליטה המוטורית המאופיינת בביצועי תנועה שונים הכוללים שיתוק, ירידה או לחלופין עלייה חדה בטונוס השרירים. אסטרטגיות חדשות ננקטות לצורך פיצוי על ליקויים אלו בפעילויות פשוטות ויום-יומיות כמו בשתיית מים באופן עצמאי. בחינת תנועות אלה יכולה לעזור במיקוד שיקום הפיזיותרפיה ובכך למזער נזקים קשים שעלולים להופיע לאחר אימוץ אסטרטגיות חדשות.

המחקר הנוכחי עוסק בבחינת תנועות פיצוי בקרב נבדקים, לאחר שבץ מוחי, במשימת הושטה-תפיסה בהשוואה לקבוצת בקרה ולמדדי הספסטייות המקובלים. בחינת תנועות הפיצוי נעשתה תוך הבחנה בין שני סוגי מטרות, מטרות קרובות ומטרות רחוקות, כאשר בין המטרות הרחוקות נבחנו הן התנועה לכיוון היד המבצעת והן התנועה לכיוון הצד המנוגד. לשם כך, חושבו מסלולי התנועה של זוויות סיבוב הגו ומישור היד וכן, מדדי ביצועי-קצה להערכת התנועה. כמו כן, המחקר עוסק בבחינת קיום נקודת שינוי בתנועה אשר מחלקת את התנועה לשתי תתי-תנועות בעלי מסלולי תנועה שונים כך שחלקה הראשון של התנועה, יתאפיין בהרמת ידו של הנבדק ואילו בחלקה השני בהושטת היד לעבר המטרה. אמידת נקודת השינוי נעשתה תוך בחינת שתי שכבות של הנתונים: שכבת הנתונים הראשונה, הנתונים הגולמיים, המוקלטים, ממשימת ההושטה-תפיסה ושכבת הנתונים השנייה, שכבת מסלולי התנועה המכילה הן את מסלולי התנועה שחושבו לבחינת תנועות הפיצוי (עבור הגו ומישור היד) והן את מסלולי התנועה של דרגות החופש (זוויות) של מפרקי הגפה העליונה, מפרק כף היד, המרפק והכתף. האלגוריתם לחישוב נקודות השינוי נעשה עבור כל שכבת נתונים, כלל שלב ראשוני של בחינת כיוון וחוזק הקשרים, שלב של הורדת מימד שמבוצע באמצעות PCA ושלב אחרון בו מתבצעת התאמת מודל רגרסיה למקוטעין לרכיבי ה-PC אשר אומד את נקודות השינוי בתנועה. למעשה לכל נבדק בכל חזרה של הניסוי התקבלו שלוש נקודות שינוי ולכן, ממוצע משוקלל (weighted average) הנשען על אחוז השונות המוסברת בוצע על רכיבי ה-PC ומיצוע לפי המטרות בוצע כך שלכל נבדק התקבלו לבסוף ארבע נקודות שינוי, האחת לכל מטרה. לצורך בחינת ביצועי הנבדקים, הן בתנועה המלאה והן בתנועה המחולקת, עבור כל אחד מסלולי התנועה של זוויות סיבוב הגו ומישור היד ועבור איבר הקצה מפרק שורש כף היד, חושבו מדדי תנועה וביניהם מדדים קלאסיים כדוגמת מהירות, טווח תנועה, אורך הנתיב והזווית הסופית. עבור סט מדדי התנועה הנבחרים נבחנו ההבדלים בין קבוצות הנבדקים ועבור כל מדד הותאם מודל רגרסיה ליניארי מעורב לבחינת השפעות גורמי הקבוצה, המטרה והאינטראקציה ביניהם. בבחינת מדדי התנועה המחולקת אשר נבחנו עבור

כל שכבה לגופה, נוסף גורם תוך-נבדקי החלק בתנועה ונבחנו בנוסף האינטראקציות הזוגיות מול גורם הקבוצה וגורם המטרה וכן, האינטראקציה המשולשת.

ממצאי המחקר הראו כי הנבדקים מקבוצת הבקרה מבצעים תבניות תנועה דומות בעוד תנועות נבדקי קבוצת המטופלים שונות ביחס לקבוצת הבקרה וביניהם. הראנו כי נבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש בתנועות פיצוי במהלך משימת ההושטה-תפיסה אשר התבטאו בהרמת המרפק ובשימוש בגו. משך התנועה של נבדקי קבוצת המטופלים היה ארוך יותר, תנועתם הייתה פחות חלקה ולא הייתה תבנית קבועה לתנועה מה שהתבטא בפיזור לא אחיד של מסלולי התנועה ומצביע על קושי בחזרה על תבנית תנועה קבועה. בוצע שימוש גדול יותר המתבטא באורך נתיב גדול יותר, בכל אחד מחמשת מסלולי התנועה ונראתה מגמה דומה בשימוש ברוטציות הגו בין המטרות השונות. לעומת זאת, בחינת הזוויות הסופיות הצביעו על מנחים סופיים דומים בקרב קבוצת הבקרה בעוד נבדקי קבוצת המטופלים אופיינו בשונות גבוהה.

בנוסף, ממצאי המחקר הראו כי בשני חלקי התנועה המתקבלים כתוצאה מחלוקת התנועה על ידי נקודות השבר, בוצע שימוש בתנועות פיצוי על ידי הנבדקים מקבוצת המטופלים כאשר תנועות פיצוי אלו לא נצפו בקבוצת הבקרה. כמו כן, למרות שהבדלי הזוויות הסופיות של הנבדקים בשני חלקי התנועה אינם מובהקים בין הקבוצות נראה מבנה קבוע בקבוצת הבקרה בעוד שונות התוצאות בקבוצת המטופלים גדול יותר. למרות הבדלים אלו ישנה מגמה תוך-קבוצתית זהה במדדי אורכי הנתיב בין המטרות השונות בין חלקי התנועה כאשר ההבדל בין קבוצות הנבדקים ניכר כקבוע. התנועה המחולקת על ידי השכבה הראשונה, שכבת הנתונים הגולמיים, מאופיינת בשימוש תוך-קבוצתי דומה ברוטציות הגב בתנועה בין חלקי התנועה כאשר בשכבה השנייה, שכבת נתוני דרגות החופש, התנועה מאופיינת בשימוש שונה בין חלקי התנועה בעוד בחלקה הראשון של התנועה נצפה שימוש נמוך ברוטציות הגב והשימוש במרפק הנצפה בקרב המטופלים גבוה ואינו תלוי במטרה אליה מבוצעת התנועה. לעומת זאת, בחלקה השני של התנועה נראה דמיון בשימוש. לפיכך, לא נמצאה תאימות במדדי הביצוע בחלקה הראשון של התנועה בין הקבוצות אל מול הבדלי הביצועים שנצפו בחלקה השני של התנועה.

מילות מפתח: שבץ, תנועות פיצוי, נקודת שינוי, סינרגיות פתולוגיות, תנועה מקוטעת

תוכן עניינים

III.....	תקציר
5.....	תוכן עניינים
7.....	רשימת טבלאות
8.....	רשימת איורים
10.....	רשימת קיצורים
11.....	1 מבוא
14.....	2 סקר ספרות
14.....	2.1 הקדמה
14.....	2.2 שבץ וספסטיות
15.....	2.2.1 הערכת פוגל-מאייר (FMA) Fugl-Meyer Assessment
15.....	2.2.2 (MAS) Modified Ashworth Scale
15.....	2.3 סינרגיה פתולוגית
16.....	2.4 תנועות פיצוי
17.....	2.5 הערכת תנועה
17.....	2.6 השערות ומטרות
19.....	3 שיטה
20.....	3.1 הניסוי
20.....	3.1.1 נבדקים
20.....	3.1.2 פרוטוקול הניסוי
22.....	3.1.3 מהלך הניסוי
22.....	3.2 ארגון ועיבוד מקדים של הנתונים
22.....	3.2.1 קריטריונים לפסילת נתונים
22.....	3.2.2 סגמנטציה
23.....	3.3 מסלולי התנועה
23.....	3.3.1 מישור היד והגו
25.....	3.3.2 מסלולי התנועה של זוויות המפרקים
26.....	3.4 ניתוח
26.....	3.4.1 נקודות השינוי בתנועה
29.....	3.4.2 מדדי התנועה
32.....	3.5 ניתוח סטטיסטי
34.....	4 תוצאות
34.....	4.1 מסלולי הגו ומישור היד
36.....	4.2 נקודות השינוי
36.....	4.2.1 שכבה 1 – שכבת הנתונים הגולמיים
40.....	4.2.2 שכבה 2 – שכבת דרגות החופש
44.....	4.3 מדדי התנועה

45	4.3.1 התנועה המלאה
50	4.3.2 תאימות מול מדדי הערכת תנועה וספסטייות
51	4.3.3 התנועה המחולקת
61	5 דיון ומסקנות
65	ביבליוגרפיה
67	נספחים
67	נספח A1 – מערכת המעקב G4 Polhemus
68	נספח A2 – סדר החזרות למטרות המתוקן
69	נספח A3 – הגדרת דרגות החופש של המפרקים
69	נספח A4 – מודל רגרסיה למקוטעין לעומת רגרסיה ליניארית
70	נספח B1 – תוצאות מסלולי הגו ומישור היד
72	נספח B2 – שכבה 1, קורלציות
73	נספח B3 – שכבה 1, ממוצע מקדמי ההעמסה של קבוצת המטופלים
74	נספח B4 – שכבה 1, פלטים של מודל הרגרסיה
77	נספח B5 – שכבה 2, קורלציות
78	נספח B6 – שכבה 2, ממוצע מקדמי ההעמסה של קבוצת המטופלים
79	נספח B7 – שכבה 2, פלטים של מודל הרגרסיה
85	נספח C1 – תבניות תנועה לעבר המטרות המרכזיות
86	נספח C2 – תבניות תנועה לעבר המטרות הרחוקות
87	נספח D1 – ממשק ה-Shiny
98	Abstract

רשימת טבלאות

30	טבלה 1 - מדדי התנועה של מפרק כף היד
31	טבלה 2 - מדדי התנועה של מישור היד
31	טבלה 3 - מדדי התנועה של משתני הגו
38	טבלה 4 - שכבה 1, מיצוע מקדמי ההעמסה של קבוצת הבקרה
39	טבלה 5 - תוצאות נקודות השינוי שנמדדו במיצוע לפי מטרה לכל קבוצה
42	טבלה 6 - שכבה 2, ממוצעי וסטיות תקן של מקדמי העמסה של קבוצת הבקרה
43	טבלה 7 - שכבה 2, ממוצעי וסטיות התקן של נקודות השינוי לפי מטרה לכל קבוצה
45	טבלה 8 - סיכום מדדי התנועה בחלוקה של הקבוצות למטרות בשונות
51	טבלה 9 - סיכום ערכי נקודות השינוי בשתי שכבות הנקודות
53	טבלה 10 - סיכום מדדי התנועה המחולקת של הקבוצות למטרות בשונות
63	טבלה 11 - סיכום השערות המחקר
68	טבלה A.1 - סדר החזרות למטרות
69	טבלה A.2 - הגדרות דרגות החופש של המפרקים
69	טבלה A.3 - מודל רגרסיה למקוטעין לעומת מודל ליניארי פשוט
70	טבלה B.1 - מסלולי משתני הגו ומישור היד
73	טבלה B.2 - ממוצעי מקדמי העמסה של קבוצת המטופלים
74	טבלה B.3 - שכבה 1, PC1, תוצאות מבחני פוסט-הוק
75	טבלה B.4 - שכבה 1, PC2, תוצאות מבחני פוסט-הוק
78	טבלה B.5 - ממוצע מקדמי עמסה של קבוצת המטופלים
79	טבלה B.6 - שכבה 2, PC1, תוצאות מבחן פוסט-הוק
81	טבלה B.7 - שכבה 2, PC2, הבדלים פנים-קבוצתיים
83	טבלה B.8 - שכבה 2, PC3, תוצאות מבחני פוסט-הוק
85	טבלה B.9 - הבדלי המדדים בין המטרות הקרובות
86	טבלה B.10 - הבדלי המדדים בין המטרות הרחוקות

רשימת איורים

- 19 איור 1 - שלבי הפרויקט
- איור 2 - המנח הראשוני של הנבדק ומיקומי המטרות באיור הימני, מיקומי המטרות ניתן לראות נבדק ימני כאשר מטרה 1 מייצגת את המטרה הקרובה למרכז, מטרת ה-NC; מטרה 2 מייצגת את המטרה הרחוקה למרכז, מטרת ה-FC; מטרה 3 מייצגת את המטרה המנוגדת, מטרת ה-CO, שכן הנבדק ימני והמטרה ממוקמת משמאל למרכז; מטרה 4 מייצגת את המטרה בכיוון היד המבצעת, מטרת ה-IP, שכן נמצאת מימין למרכז
- 21 איור 3 - מיקומי מרכזי המפרקים, מערכות צירים תיאורטיות ומיקומי החיישנים (Davidowitz, 2017)
- 21 איור 4 - כיווני סיבובי הצירים (אתר אפל)
- 24 איור 5 - מישור היד ורוטרציות הגו (Levin et al 2016)
- 25 איור 6 - מסלולי זווית מישור היד של נבדק מקבוצת המטופלים (A) לעומת נבדק מקבוצת הבקרה (B). איור A הינו מסלול של נבדקת 1 מקבוצת המטופלים, ציון FMA=39, MAS=+1; איור B הינו מסלול של נבדקת 1 מקבוצת הבקרה. שתי הנבדקות ביצעו את המשימה ביד ימין וכן חזרה זו בוצעה אל עבר המטרה
- 34 האמצעית הרחוקה.
- 35 איור 7 - מסלולי הגו ומישור היד לעבר המטרות השונות של נבדקת 1 מקבוצת הבקרה
- איור 8 - מסלולי הגו ומישור היד לעבר המטרות השונות של נבדקת 2 מקבוצת המטופלים, ציון FMA=33, MAS=+1
- 36 איור 9 - שכבת הנתונים הגולמיים, קורלציות ממוצעות לעבר המטרה הרחוקה
- 37 איור 10 - שכבת 1, אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים החדש
- 38 איור 11 - שכבה 1, תרשים אינטראקציה בין קבוצה למטרה לכל רכיב
- 40 איור 12 - שכבה 2, קורלציה ממוצעת לעבר המטרה הקרובה עבור קבוצת המטופלים (מימין) וקבוצת הבקרה (משמאל)
- 41 איור 13 - שכבה 2, אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים החדשים
- 42 איור 14 - שכבה 2, תרשים אינטראקציה בין הקבוצה למטרה לכל רכיב
- 44 איור 15 - תרשימי קופסא (boxplot) עבור משך התנועה, אינדקס העקמומיות והמהירות הממוצעת. (A) משך התנועה; (B) אינדקס העקמומיות; (C) המהירות הממוצעת של תנועת הקצה, מפרק שורש כף היד.
- 46 איור 16 - תרשימי קופסא (boxplot) של אורכי הנתיב של רוטציות הגו
- 48 איור 17 - תרשימי קופסא (boxplot) עבור אורך נתיב תנועת הגו, הזווית הסופית של מישור היד ומספר שינויי כיוונו
- 49 איור 18 - תרשימי קופסא (boxplot) עבור הזוויות הסופיות של רוטציות הגו
- 50 איור 19 - תאימות השימוש בגו מול מדדי הספסטיות
- 50 איור 20 - תרשים אינטראקציה בין קבוצת הנבדק ושכבת הנתונים עבור נקודות השינוי
- 51 איור 21 - תרשים אינטראקציה בין שכבת הנתונים למדד ה-MAS לנקודות השינוי
- 52 איור 22 - התנועה המחולקת משכבה 1, אורכי נתיב מסלולי הגו
- 54 איור 23 - התנועה מחולקת מהשכבת הנתונים הראשונה, הזוויות הסופיות של רוטציות הגו הצדדית והקדמית
- 56 איור 24 - התנועה המחולקת מהשכבת הנתונים השנייה, אורכי נתיב מסלולי הגו
- 58 איור 25 - התנועה המחולקת מהשכבת הנתונים השנייה, הזוויות הסופיות עבור הרוטציה הקידמית והצדדית של הגו ומישור היד
- 60 איור A.1 משדר ה-G4 polhemus ושלושה חיישנים אלחוטיים
- 67

72.....	איור B.1 - שכבה 1, קורלציות ממוצעות
74.....	איור B.2 - שכבה 1, PC1, תוצאות ANOVA
75.....	איור B.3 - שכבה 1, PC2, תוצאות ANOVA
76.....	איור B.4 - שכבה 1, PC2, הבדלי הקבוצות ביחס למטרות השונות
76.....	איור B.5 - שכבה 1, PC3, תוצאות ANOVA
76.....	איור B.6 - שכבה 1, PC3, הבדלי הקבוצות ביחס למטרות השונות
77.....	איור B.7 - שכבה 2, קורלציות ממוצעות לכל קבוצה
79.....	איור B.8 - שכבה 2, PC1, תוצאות ANOVA
80.....	איור B.9 - שכבה 2, PC1, הבדלים פנים-קבוצתיים
80.....	איור B.10 - שכבה 2, PC1, הבדלים בין-קבוצתיים
80.....	איור B.11 - שכבה 2, PC1, הבדלים ביחס למטרות השונות
81.....	איור B.12 - שכבה 2, PC2, תוצאות ANOVA
82.....	איור B.13 - שכבה 2, PC1, הבדלים פנים-קבוצתיים
82.....	איור B.14 - שכבה 2, PC2, הבדלים בין-קבוצתיים
82.....	איור B.15 - שכבה 2, PC3, תוצאות ANOVA
84.....	איור B.16 - שכבה 2, PC3, הבדלים פנים-קבוצתיים
84.....	איור B.17 - שכבה 2, PC3, הבדלים בין-קבוצתיים

רשימת קיצורים

ABADs	Shoulder abduction-adduction
ABADw	Wrist abduction-adduction
AP	Arm-plane
ARAT	The Action Research Arm Test
CNS	Central Nervous System
CO	Contralateral target
DOF	degrees of freedom
DR	Data reduction
FA	Final angle
FC	Far Center target
FEe	Elbow flexion-extension
FEs	Shoulder flexion-extension
FEw	Wrist flexion-extension
FMA	Fugl-Meyer Assessment
IA	Initial angle
IC	Index of curve
IP	Ipsilateral target
LMER	Linear Model with Random effects
MAS	Modified Ashworth Scale
MV	Mean velocity
NC	Near Center target
NPTV	Number of peaks Trajectory velocity
PA	Plane-angle
PA	Arm-Plane angle
PCA	Principal components analysis
PL	Path length
R	Range
ROTs	Shoulder internal-external rotation
SPe	Elbow supination-pronation
tFD	Trunk forward distance
TP	Trunk and arm-plane
tPitch	Trunk lateral rotation
tRoll	Trunk rotation
TSRT	tonic stretch reflex threshold
tYaw	Trunk yaw rotation
UCM	uncontrolled manifold
UL	Upper limb
VR	Virtual reality

1 מבוא

1.1 רקע ומוטיבציה

שבץ מוחי הוא אחד משלושת הגורמים העיקריים לתמותה בעולם המערבי והגורם העיקרי לנכות כתוצאה ממחלה בעוד בישראל ישנם כ-18,000 מקרים חדשים של שבץ מוחי מדי שנה. אחת ההפרעות השכיחות שנצפו באנשים שעברו אירוע נוירולוגי, כמו שבץ מוחי, הוא הפרעה מוטורית העלולה להוביל לסיבוכים משניים. רק כ-40% מהמקרים מגיעים בחלון הזמן המתאים לטיפולם מתקדמים מונעי נכות. בסקר שערכו משרד הבריאות בשנת 2013 נמצא כי רוב הנפגעים נשארים בעלי נכות וזקוקים לשיקום ולעזרה בתפקוד בסיסי (משרד הבריאות, <https://www.health.gov.il/Subjects/disease/Pages/stroke.aspx>). ההפרעה בתנועה באה לידי ביטוי בהגבלה בטווח התנועה, וכן במכלול התנועות וכתוצאה ממנה, אסטרטגיות חדשות ננקטות לצורך פיצוי על ליקויים אלו ומשתקפות בפעילויות פשוטות ויום-יומיות החל משתיית מים באופן עצמאי. בחינת תנועות אלה יכולה לעזור במיקוד שיקום הפיזיותרפיה ובכך למזער נזקים קשים שעלולים להופיע לאחר אימוץ האסטרטגיות החדשות. הנתונים במחקר זה לקוחים מפרויקט ENHANCE, פרויקט בינלאומי בשיתוף שלוש מדינות: ישראל הודו וקנדה ועוסק בזיהוי גורמים מתערבים לשיקום התנועה הרצונית של הגפה העליונה לאנשים לאחר אירוע מוחי. ENHANCE חוקרים טיפול חדשני ומבצעים שלושה ניסויי הקלטה של משימת הושטה-תפיסה לצורך בחינת יעילות הטיפול: לפני הטיפול, שבועיים לאחר הטיפול וחודש לאחר מכן. הנתונים במחקר זה הינם נתוני הנבדקים לפני קבלת הטיפול בלבד, ולכן לא נתייחס לנושא הטיפול בהמשך.

1.2 מטרות ותרומה

מטרת מחקר זה הינה בחינת תנועות הפיצוי בקרב נבדקים, לאחר שבץ מוחי, במשימת הושטה-תפיסה בהשוואה לקבוצת בקרה ולמדדי הספסטיות המקובלים. בחינת תנועות הפיצוי תעשה תוך הבחנה בין שני סוגי מטרות, מטרות קרובות ומטרות רחוקות, כאשר בין המטרות הרחוקות נבחן הן את התנועה לכיוון היד המבצעת והן את התנועה לכיוון הצד המנוגד. לשם כך, חושבו חמישה מסלולי תנועה האופייניים לתנועות פיצוי בתנועת הגפה העליונה הכוללים את שלוש זוויות הסיבוב של הגו, תנועת הגו קדימה ואת הזווית בין מישור היד לגו, ובנוסף חושבו מדדי ביצועי-קצה המייצגים את תנועת מפרק כף היד. מטרה נוספת במחקר זה, הינה בחינת נקודת השינוי בתנועה המחלקת אותה לשתי תתי-תנועות בעלות מסלולי תנועה שונים כך שבחלקה הראשון של התנועה, הנבדק מרים את ידו ואילו בחלקה השני מושיט את ידו לעבר המטרה. חישוב נקודות השינוי נעשה בשתי שכבות של הנתונים: שכבת הנתונים הראשונה, הנתונים הגולמיים, נתוני התנועה המוקלטים ממשימת ההושטה-תפיסה, והשכבה השנייה, שכבת מסלולי התנועה המכילה את עשר דרגות החופש בתנועה: ארבעה מחמשת מסלולי התנועה שחושבו לבחינת תנועות הפיצוי (שלוש רוטציות הגו והזווית בין מישור היד לגו) ודרגות החופש (הזוויות) של מפרקי הגפה העליונה הכוללים את מפרק כף היד, המרפק והכתף. שאלות המחקר בנושא זה עוסקות הן בקיום נקודות השינוי והן בביצועי הנבדקים בחלקי התנועה

השונים. לחישוב נקודות השינוי פותח כלי חצי-אוטומטי אשר הופעל עבור כל שכבת נתונים, המתחיל בבחינת כיוון וחוזק הקשרים בכל שכבה וממשיך בהטמעת האלגוריתם המכיל תחילה שלב של הורדת מימד שמבוצע באמצעות Principal Component Analysis (PCA) וממשיך בהתאמת מודל רגרסיה למקוטעין לרכיבי ה-PC שבאמצעותו נאמדות נקודות השינוי.

לבחינת ביצועי הנבדקים הן בתנועה המלאה והן בתנועה המחולקת, חושבו מדדי תנועה וביניהם מדדים קלאסיים כדוגמת מהירות, טווח תנועה, אורך הנתיב והזווית הסופית, עבור כל אחד ממסלולי התנועה אשר מייצגים את תנועות הפיצוי. לבחינת קיום ההבדלים וחישובם הותאמו למדדים נבחרים מודל רגרסיה ליניארי מעורב עם אפקטים אקראיים ונבחנה השפעת קבוצת הנבדק והמטרה אליה מבוצעת ההושטה. ממשק Shiny פותח להצגת התוצאות, חקירתם ויכולת הבנה טובה יותר. הממשק כולל את כלל חישובי הפרויקט ומכיל את התוצאות בצורתן הגולמית, גרפים חשובים, כדוגמת מסלולי התנועה, וכן ניתן לבצע דרכו התאמה של מודלים סטטיסטיים ולצפות בתוצאות ההתאמה וההבדלים בין הקבוצות. היכולת של ה-Shiny לעבוד ללא תלות ברשת הובילה לפיתוח כלי זה כחלק משיתוף הפעולה עם פרויקט ENHANCE (סקירתו מוצגת בנספח D1). הרציונל מאחורי פיתוח ממש זה נשען על כמות הנתונים הגדולה והצורך במבט על לצורך ראייה רחב יותר ועל המודולריות המאפשרת הזנת קלט מהמשתמש ויעילה הן בהפקת חישובים או גרפים והן בהתאמת מודלים ומבחנים סטטיסטיים נוספים.

ממצאי המחקר הראו כי הנבדקים מקבוצת הבקרה מבצעים תבניות תנועה דומות בעוד תנועות נבדקי קבוצת המטופלים שונות ביחס לקבוצת הבקרה וביניהם. הראנו כי נבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש בתנועות פיצוי במהלך משימת ההושטה-תפיסה אשר התבטאו בהרמת המרפק ושימוש בגו. תנועות הפיצוי התבטאו בשילוב דרגות חופש של המרפק והגו ליצירת אסטרטגיות תנועה אשר היו שונות בין הנבדקים. בוצע שימוש רב יותר בכל אחד מחמשת מסלולי התנועה שאפיינו את תנועות הפיצוי וכן נצפתה מגמה דומה בשימוש ברוטציות הגו בין המטרות השונות. לעומת זאת, הזוויות הסופיות הצביעו על מנחים סופיים דומים בקרב קבוצת הבקרה בעוד נבדקי קבוצת המטופלים אופיינו בשונות גבוהה.

בנוסף, ממצאי המחקר הראו כי בשני חלקי התנועה המתקבלים כתוצאה מחלוקת התנועה על ידי נקודות השינוי, בוצע שימוש בתנועות הפיצוי על ידי הנבדקים מקבוצת המטופלים כאשר תנועות פיצוי אלו לא נצפו בקרב קבוצת הבקרה. הסינרגיות אשר נמדדות באמצעות מטריצת הקורלציה בין דרגות החופש נבחנו בשתי שכבות הנתונים, שכבת הנתונים הגולמיים ושכבת דרגות החופש, כאשר בשתייהן נמצאו פחות קשרים בקרב נבדקי קבוצת המטופלים והקשרים הקיימים אף חלשים יותר. ממצאים אלו מאששים את השערת המחקר בנושא זה. למרות שהבדלי הזוויות הסופיות של הנבדקים בשני חלקי התנועה אינם מובהקים סטטיסטית בין הקבוצות, נראה מבנה קבוע בקבוצת הבקרה בעוד שונות התוצאות בקבוצת המטופלים גדול יותר. למרות הבדלים אלו נראה כי ישנה

מגמה זהה במדדי התנועה בין המטרות השונות בין חלקי התנועה בין קבוצות הנבדקים כאשר קיימת סטייה.

2 סקר ספרות

2.1 הקדמה

מטרת פרק זה הינה לסקור ולבחון את השיטות בהן תנועות הפיזיו מכומתות במחקרים קודמים תוך סקירה של מדדי הערכת תנועה וספסטיות (Spasticity) מקובלים והבחנה מהן סינרגיות פתולוגיות. בפרק 2.2 ישנה הקדמה שבה יוסבר מהו שבץ, סקירה אודות מונח הספסטיות תהיה מורחבת ותתי הפרקים 2.2.1 ו- 2.2.2 יסקרו מדדים קליניים, מדד להערכת התפקוד המוטורי ומדד לכימות ספסטיות המרפק שנעשה בהם שימוש בפרויקט זה. בפרק 2.3 יסקר נושא הסינרגיות הפתולוגיות אשר מהוות את הבסיס לתנועת האדם המעורבות בתנועת הגפה העליונה. בפרק 2.4 ייבחנו תנועות הפיזיו השכיחות שנצפו במחקרים קודמים בקרב נבדקים שעברו שבץ בביצוע משימות זהות. בפרק 2.5 נסקור את נושא הערכת התנועה וכן בפרק האחרון, פרק 2.6 נציג את ההשערות והמטרות של מחקר זה.

2.2 שבץ וספסטיות

שבץ הינו אירוע מוחי המאופיין בהפסקה או ירידה משמעותית באספקת הדם לאזור מסוים במוח אשר נגרם כתוצאה מחסימה או מפיצוץ של כלי דם. הפרעה זו עלולה לגרום לנזק לתאי המוח עקב ירידה בכמות החמצן ובחומרים המזינים הדרושים לתפקודו. בתוך דקות מאירוע השבץ, תאי מוח מתחילים למות ולכן טיפול מיידי הינו קריטי בעוד נקיטת פעולות מוקדמות יכולות למזער את הנזק שעתיד להיגרם ואת הפוטנציאל לסיבוכים. האירוע המוחי מאופיין בהופעה פתאומית של סימנים קליניים אשר יופיעו בצד הנגדי לצד במוח שבו התרחש אירוע השבץ (Sommerfeld et al. 2004).

תסמונת תאי העצב המוטוריים העליונים באה לידי ביטוי בשינויים אשר עלולים להתרחש בשרירי השלד לאחר שבץ מוחי. התסמונת עלולה להתבטא בביצועים שונים בתנועות, כמו חולשה, ירידה ברמת הדיוק ובמהירות הביצוע ואף שיתוק ורפלקסים גדיים מוגברים. השילוב של ההתכווצות הטונית של השרירים כתגובה לכוח מתיחה, המיוחס לרפלקס הגידים, יחד עם שיתוק והפגיעה במערכת העצבים המרכזית ומיוחס לעיתים לספסטיות (Sommerfeld et al., 2004).

המצב הבסיסי בו נמצאים שרירי גופנו הוא התכווצות חלקית, המאפשרת לנו תנועה ושמירה על יציבות. התכווצות חזקה או רפיון מלא הם מצבים לא רגילים של השריר ולרוב מעידים על הפרעה במערכת הנקראת טונוס השרירים הקבוע. ספסטיות היא מצב בו שריר או כמה שרירים נמצאים בהתכווצות יתר (טונוס שרירים גבוה), בעוד הינה הפרעה מוטורית המאופיינת בעלייה תלולה במהירות הרפלקסים התלוי בטונוס השרירים עם טלטלות גידים מוגברות הנובעות מרגישות יתר של רפלקס המתיחה (Sommerfeld et al. 2004). ישנן מספר דרכים לטפל בחולים אשר סובלים מספסטיות. כטיפול ראשוני, ניתן להפחית ספסטיות באמצעות תרגילי מתיחות, הידרותרפיה, גירוי חשמלי, עמידה ונשיאת משקל. בנוסף, קיים טיפול תרופתי, אולם יעילותו בעייתית, לאור תופעות הלוואי הקשות הכרוכות בתרופות אלו, כגון פגיעה בכבד והפרעות נפשיות. כמו כן, בספסטיות

מקומית, הממוקדת בקבוצת שרירים ספציפית, ניתן לנסות הזרקה מקומית לשיתוק עצבים. במקרים קשים במיוחד של ספסטיות, יישקל טיפול בניתוח או השתלה תת-עורית של משאבה המשחררת תרופות במינון נמוך ישירות לנוזל חוט השדרה (מרכז מידע רעות אשל, <https://www.reutheshel.org.il/מה-זה-ספסטיות/>). ספסטיות הינה תופעה רפואית מבין הנפוצות ביותר של מערכת העצבים המרכזית ומדידתה באופן מדויק יכולה להועיל בהערכת מצבם של חולים, לאחר אירוע מוחי, בטיפול הפיזיותרפיה, תוך כימות מידת הספסטיות בין הטיפולים. בפרקים 2.2.1, 2.2.2 יסקרו מדד להערכת תנועה מוטורית ומדד לכימות ספסטיות המרפק.

2.2.1 הערכת פוגל-מאייר (FMA) Fugl-Meyer Assessment

מבחן פוגל-מאייר (Fugl-Meyer) הינו מבחן נפוץ לבחינת כושר התנועה לאחר אירוע-מוחי שבאמצעותו ניתן לכמת את יכולות התנועה המוטורית הרצונית והקואורדינציה של הגפה. מבחן פוגל-מאייר הבוחן את תפקוד הגפיים העליונות הינו נפוץ לכימות ומדידת השיקום המוחי של חיישני התנועה וכן לכימות הקשרים הלא תקינים בין המפרקים השונים הכלולים בתנועה. תוצאת מבחן זה עבור הגפה העליונה מבוטאת במספר שלם בטווח בין 9 ל 66. תוצאת מדידה נמוכה תעיד על ליקויים מוטוריים חמורים יותר (Duncan et al. 1983; Fugl-Meyer et al. 1975).

2.2.2 MAS Modified Ashworth Scale

מדד ה-MAS הינו מדד סובייקטיבי קטגוריאלי לספסטיות המוגדר כסולם בעל שבע רמות. על מנת לקבוע ציון MAS לחולה שעבר שבץ בודקים את ההתנגדות הידנית של השריר למתיחה פאסיבית, כאשר ככל שהציון נמוך יותר הוא מאפיין ליקוי גבוה יותר. בניסוי לבחינת מדד זה בו נערכה מדידה על ידי שני מטפלים ל-30 חולים נמצאה קורלציה מובהקת 0.874 ($p < 0.001$) בדירוג המטפלים ולכן, בשל אופיו הסובייקטיבי של המדד נדרשת מדידה על ידי מטפלים מנוסים לצורך השגת תוצאת ספסטיות מהימנות. תוצאה "0" משמעותה היעדר שינוי בטונוס השרירים ולכן במצב זה אין כלל ספסטיות. תוצאה "1", משמעותה עלייה קלה בטונוס השרירים אשר באה לידי ביטוי על ידי תפיסה או בהתנגדות מינימלית בסוף טווח התנועה. תוצאה "+1" דומה לתוצאה הקודמת, ומשמעותה עלייה קלה בטונוס השרירים אשר בא לידי ביטוי בתפיסה ומיד לאחר מכן בהתנגדות מינימלית לעבר המטפל כמעט בחצי מטווח התנועה. תוצאה "2" – עלייה חדה בטונוס השרירים לאורך מרבית טווח התנועה אך תנועת הגו נעשית בקלות. תוצאה "3" – עלייה חדה מאוד בטונוס השרירים, וקישיון (נוקשות בתנועה מסיבה רפואית) בתנועה פאסיבית. תוצאה "4" – תוצאת הספסטיות הגבוהה ביותר שבה ישנו קישיון של הגפה הן ביישור והן בכיפוף (Bohannon et al 2014).

2.3 סינרגיה פתולוגית

מקור המילה סינרגיה הינה מהשפה היוונית ומשמעותה "עובדים יחד". כל שילוב של אלמנט אחד או יותר כדוגמת מפרק או שריר, עלולים להיחשב סינרגיה (Dipietro et al. 2007). בשיקום נוירולוגי, ניתן

להגדיר את הסינרגיה מוטורית כתנועות סטראוטיפיות של כלל הגפה אשר משקפות אובדן שליטה במפרקים עצמאיים והגבלת היכולת לתאם מפרקים בתנועות ובכך מונעת ביצוע של משימות מוטוריות פונקציונליות רבות (Kordelaar et al. 2012).

הסינרגיה באה לידי ביטוי גם במערכת התנועה בהפחתת דרגות החופש הקשורות במשימה מסוימת. המפרקים המעורבים בתפקוד הפונקציונלי הינם מקושרים או במילים אחרות קיימת ביניהם סינרגיה, חולקים אפוא, דפוס תנועה משותף המאומץ בביצוע משימה פונקציונלית, למשל במשימת הושטה (reaching). קשרים תפקודיים אלו או סינרגיות משתנים בקרב חולים עם שבץ מוחי ביחס למשימות הושטה והצבעה (reaching, pointing) וכן ניכר כי חולים שעברו אירוע מוחי משתמשים בפחות שילובי מפרקים בהשוואה לנבדקים בריאים (Reisman et al. 2003).

2.4 תנועות פיצוי

תנועות הפיצוי הינן דרגות חופש חדשות אשר מאומצות לצורך השלמת המשימה. ניתן לראות ממחקרים קודמים כי נבדקים לאחר שבץ מוחי גייסו דרגות חופש חדשות אשר בדרך כלל אינן בשימוש או בשימוש מופחת בקרב נבדקים בריאים. כל דרגת חומרה אימצה אסטרטגיה מפצה אחרת כדי להשיג את התנועה הרצויה. חולים לאחר אירוע מוחי משתמשים בקשרים שונים או סינרגיה פונקציונלית שונה בזמן שהם מבצעים פעולות פונקציונליות רבות (למשל משימה הושטה-תפיסה). השימוש בתנועת הגו (Trunk) לצורך פיצוי על היעדר התרומה של הכתף והמרפק לתנועה מרמז כי סינרגיה בסיסית בגפה ושליטה מוטורית מפצה ממלאים תפקיד מכריע במהלך משימת ההושטה-תפיסה (reach-to-grasp) (Kordelaar et al. 2012). סינרגיה קלאסית מפצה בחולים שעברו אירוע מוחי, היא הרמה לא רצונית של המרפק כלפי מעלה בעת ניסיון להגיע לצד המנוגד. התזמון היחסי של תנועות הכתפיים והמפרקים מופר אצל חולים עם אירוע מוחי ותלוי בכיוון בו יש להזיז את היד (Levin 1996).

תנועות הפיצוי הינן חלק מתבנית תנועה אשר חולים לאחר שבץ מאמצים כאסטרטגיה להשלמת משימות יומיומיות שעלולות לגרום לנזקים אחרים. השימוש בגו לפיצוי על תנועת הכתף והמרפק עלול להעמיד את הגו בסיכון שכן כעת מתבצעת תנועה שאינה טבעית עימו, דבר אשר חושף את הגו לנזק. לפיכך, המטופלים זקוקים לשיקום בכדי ללמוד ולתרגל, ובתקווה להתאים דפוסים טובים יותר למשימות יומיומיות, הכוללים שימוש במספר דרגות חופש גדול יותר וכן בפחות סינרגיות, מה שיגדיל את טווח התנועה. הפחתה בכמות סינרגיות פתולוגיות נתפשות לרוב כהשתקפות של "תיקון" ניורולוגי אמיתי" (Kwakkel et al. 2004; Prabhakaran et al. 2008; Zarahn et al. 2011).

מתצפיות המחקר של לוין ואחרים (2009) עולה כי אלה תומכים בהשערה כי הסינרגיות הפתולוגיות המאופיינות בקשרים התפקודיים בין הכתף והמרפק מצמצמות את מספר דרגות החופש בגפה העליונה שניתן להשתמש בהם במשימת הושטה וכי משתמשים בתנועות הגו כדי לפצות על הפחתה זו בדרגות החופש (Levin et al. 2009). כמות השימוש בגו נמצאה קשורה לרמת הפגיעה (Levin et al. 2009).

(al. 2015) וכן, מסלולים תנועתיים מנוגדים (contralateral) עלולים להיפגע קשות לאחר שבץ מוחי, שרירי הגו עשויים להיות תלויים במסלולים שבוצעו אל עבר מטרות בצד של היד המבצעת (ipsilateral), מה שעשוי להסביר את נטייתם של חולים שעברו אירוע מוחי להשתמש בתנועות הגו לאסטרטגיה לפיצוי על הליקויים בגפיים העליונות (Kordelaar et al. 2012).

2.5 הערכת תנועה

הערכת תנועה נעשית על ידי בחינה של משתני התנועה ולכן בראשונה יש להגדיר ובמידת הצורך לחשב את משתנה התנועה שנרצה לבחון. במחקרם של Cirstea et al. (2000) על תנועות פיצוי התייחסו לאורכי נתיב התנועה, למהירויות ביצוע, משך תנועה, מספר המקטעים שנעשים בתנועה תוך חישוב מספר השינויים בכיוון התנועה. המדד האחרון הינו מדד לחלקות התנועה וכאשר המדד גבוה הוא מצביע על תנועה פחות חלקה (תנועה בעלת שינויי כיוון רבים יותר מדומה לתנועה מקוטעת). במאמרם של Levin et al. (2018) ניתן לראות שבנוסף למדדים אלו חושב אינדקס העקמומיות לאיבר הקצה הבוחן את מידת חלקות נתיב התנועה ומוגדר כיחס בין אורך נתיב התנועה בפועל לבין המרחק האמיתי (ככל שהערך גדול וקרוב לאחד הוא מרמז על תנועה חלקה יותר). כמו כן, בבחינת מטריצת הקורלציות של דרגות החופש של המפרקים נמדדת היכולת לתנועה עצמאית של כל מפרק, בעיקר הכתף והמרפק.

2.6 השערות ומטרות

לסיכום, מסקר הספרות עולה כי השימוש בתנועות הפיצוי נפוץ בקרב נבדקים שעברו שבץ וניתן להבחין במספר דברים עיקריים הן בקשרים השונים בין דרגות החופש בתנועה בשימוש העיקרי, הן בשימוש בדרגות חופש חדשות של המרפק והכתף והן בשימוש גדול יותר בגו לצורך פיצוי על הליקוי בתנועה שנובע עקב התפקוד המוטורי הלקוי. כמו כן, בדיקת תאימות של השימוש בתנועות הפיצוי תיעשה מול מדד הערכת התנועה, ה-FMA, ומול מדד הספסטיות, ה-MAS. עולה השאלה, האם השימוש בתנועות הפיצוי ניכר בקרב הנבדקים לאחר שבץ מוחי ביחס לקבוצת הבקרה (בריאים), וכן האם אסטרטגיית התנועה שאומצה על ידי נבדקים אלו דומה. במחקרי עבר נבחנה תנועת הנבדקים במשימה כולה בעוד בדיקה האם בחלק מסוים הפיצוי שהתבצע היה רב יותר אינה נעשתה. לפיכך, נרצה לבחון האם בחלק מסוים בתנועה התבצע שימוש רב יותר בתנועות הפיצוי והאם ניתן לחלק את התנועה לשני מקטעים. לניתוח נקודות השינוי בתנועה פותחה שיטה הנשענת על הפנמת כלים הסתברותיים על משתני התנועה ותואר בתת פרק 3.4.1, בפרק הניתוח.

מכאן נגזרות השערות המחקר העוסקות בשני אספקטים, נקודות השינוי ותנועות הפיצוי:

(H1) נצפה לראות קשר בין כמות השימוש בתנועות של המרפק והגו לבין השיוך לקבוצת הנבדקים, מטופלים (לאחר השבץ) ובקרה. נצפה שבקבוצת המטופלים ימצאו הבדלים חיוניים באורכי הנתיב עבור משתני התנועה של תנועות הפיצוי שיתבטאו באורכי נתיב גדולים יותר ומכך גם משך תנועות ארוך יותר. וכן, נצפה למצוא הבדלים בזוויות הסופיות הן של המרפק והן של הגו.

(H2) נצפה שהסינרגיות, הקשרים, יתקיימו באופן דומה למחקרים קודמים, ויהיו נמוכים יותר בקרב קבוצת המטופלים דבר שיתבטא בקשרים חלשים יותר.

כמו כן, נקודות השינוי יוצרות למעשה חלוקה של תנועות הנבדקים לשתי תתי-תנועות ומכך עולות שאלות הן על נקודות השינוי והן על ביצועי הנבדקים בשתי תתי-התנועות שהתקבלו כתוצאה מחלוקת התנועה לשני מקטעים, מתחילת התנועה עד נקודת השינוי, ומנקודת השינוי עד סוף התנועה.

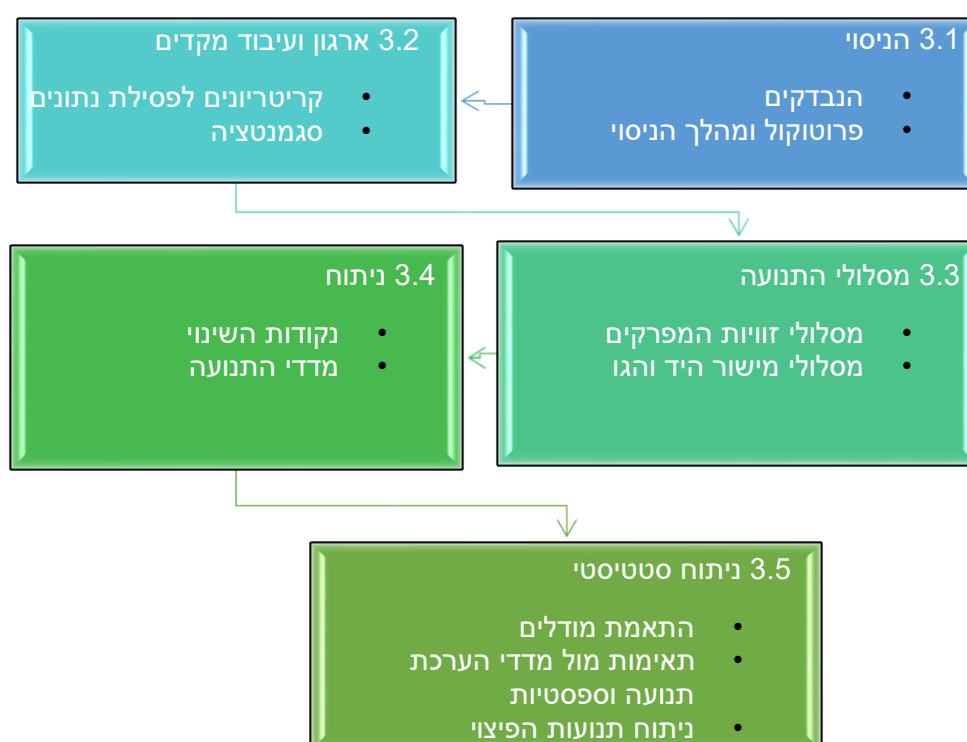
(H3) נצפה תחילה למציאת נקודת השינוי, לפחות בקרב קבוצת הבקרה וכן נצפה להבדלים בערכי נקודות השינוי בקרב הקבוצות בעוד השינוי יתרחש מאוחר יותר בקרב המטופלים מפאת הליקוי בתנועה.

(H4) נצפה לראות פיצוי גדול יותר בחלקה השני של התנועה מה שיתבטא בהבדלים באסטרטגיות התנועה שאומצו בין קבוצות הנבדקים רק בחלקה השני של התנועה. השערה זו מתבססת על משמעות נקודת השינוי כיוון שנקודת השינוי בתנועה מאפיינת את הנקודה שבה מתבצע המעבר בתנועה מהרמת היד עד לגובה השולחן להושטת היד. לפיכך בחלקו השני של התנועה מוכלת ההושטה אל עבר המטרה ולכן בחלק זה נצפה לראות פיצוי גדול יותר מחלק התנועה הראשון, נצפה מצד אחד לראות תאימות במדדי הביצוע בחלקה הראשון של התנועה ואילו בחלקה השני נצפה לראות פער במדדי התנועה דבר אשר ידגיש את השימוש בתנועות הפיצוי.

3 שיטה

הנתונים במחקר זה מעובדים במספר שלבים החל מקליטת הנתונים המוקלטים ממשימת הושטה-תפיסה, שלב ארגון מקדים שעיקרו סידור הנתונים וקיטוע החלק הרצוי בתנועה, קביעת משתני התנועה הרצויים שנרצה לבחון, חישוב נקודות השינוי בתנועה ומדדי התנועה המאפיינים את השימוש בתנועות הפיזיו בעת ביצוע המשימה ובשלב האחרון, ניתוח סטטיסטי (איור 1).

בפרק 3.1 נסקור את הניסוי הכולל את משימת ההושטה-תפיסה, נתאר את מהלך הניסוי ואת סביבתו. בפרק 3.2 נסקור את שלב הסידור המקדים של הנתונים הכולל הגדרת קריטריונים עבור פסילת נתונים והגדרת קיטוע החלק הרצוי בתנועה. בפרק 3.3 אשר מחולק לשני תתי פרקים נתאר את מסלולי התנועה. בתת פרק 3.3.1 ייסקרו מסלולי התנועה של תנועות הפיזיו הכוללים את דרגות החופש של הגו ושל מישור היד ובפרק 3.3.2 יצינו דרגות החופש של המפרקים השונים של הגפה העליונה שבהם ייעשה שימוש למציאת נקודות השינוי. בפרק הניתוח (פרק 3.4) אשר מחולק גם הוא לשני תתי-פרקים, נסקור בפרק 3.4.1 את המתודולוגיה למציאת נקודות השינוי בתנועה ובפרק 3.4.2 נסקור את מדדי התנועה אשר מאפיינים הן את ביצוע המשימה והן את איכות הביצוע וחושבו בשני אופנים: עבור התנועה המלאה ועבור התנועה המחולקת פעמיים, האחת עם נקודות השינוי של כל שכבת נתונים. הפרק האחרון (פרק 3.5) יציג את הכלים הסטטיסטיים שהם נעשה שימוש בחקירת הנתונים.



איור 1 - שלבי הפרויקט

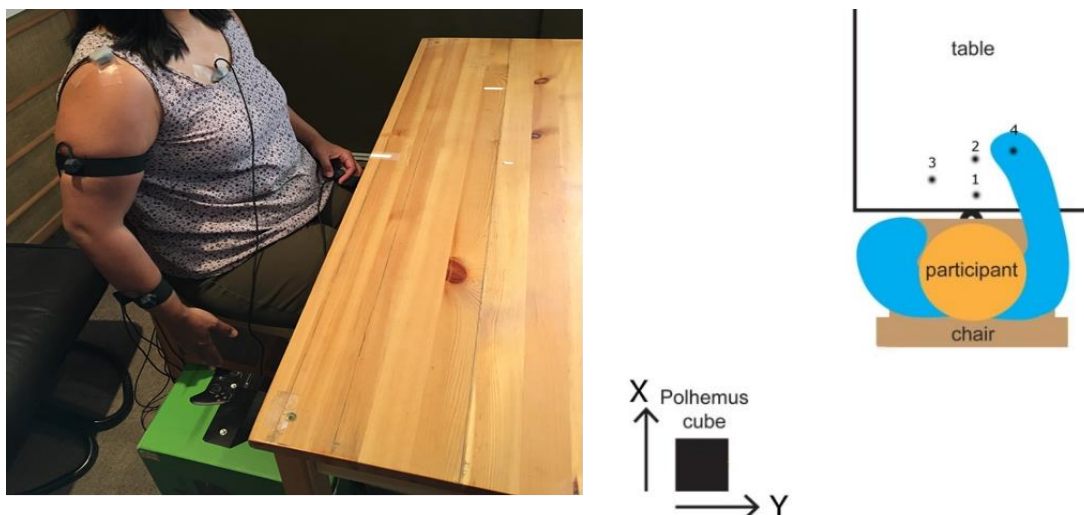
3.1 הניסוי

3.1.1 נבדקים

הניסוי כלל 45 נבדקים משתי קבוצות, קבוצת המטופלים כללה שלושים ושניים נבדקים לאחר שבץ. בקבוצה זו נכללו 21 נשים ו-11 גברים; ממוצע הגילאים 55.25 ($SD=10.1$), וקבוצת הבקרה הכללה שלושה עשר נבדקים בגילאים תואמים. בקבוצת זו נכללו, 9 גברים ו-4 נשים, ממוצע גילאים 60.46 ($SD=8.69$). קבוצת המטופלים כללה 14 נבדקים מישראל, 14 נבדקים מהודו ו-4 נבדקים מקנדה ואילו קבוצת הבקרה כללה 12 נבדקים מישראל ונבדק אחד מקנדה. המשתתפים מקבוצת המטופלים מאופיינים בכך שזהו האירוע המוחי הראשון שעברו ואושר בהדמיית תהודה מגנטית רפואית או טומוגרפיה ממוחשבת, וסובלים מהפרעה בתנועה בגפה העליונה המלווה בספסטיות (Chedoke-McMaster Stroke Assessment 2-6/7) (Gowland, et al., 1993) אך מסוגלים לבצע תנועת כיפוף רצונית במרפק של לפחות 30 מעלות לכל כיוון, ויכלו לתת את הסכמתם להשתתפות בניסוי. נפסלו מהשתתפות בניסוי נפגעי שבץ מוחי הסובלים בעיות נוירולוגיות, עצביות או אורתופדיות, מכאבים, מקושי בהבנת ההוראות או אם טופלו בתרופות כנגד הספסטיות. לעומת זאת, המשתתפים מקבוצת הבקרה לא סבלו מהפרעה נוירולוגית, מוטורית או אורתופדית. ליקויים בגפיים העליונות בקבוצת המטופלים נמדדו באמצעות מבחן פוגל-מאייר (FMA). במחקר זה נמדד הציון המקסימלי שנצפה היה 54 למרות שהמקסימום האפשרי הוא 66 כיוון שהמוטיבציה הינה בחינת תנועה של נבדקים עם מוגבלות. בנוסף, ספסטיות המרפק נמדדה בשני אופנים, בדירוג ה-MAS ובחישוב ה-TSRT. ציון ה-FMA הממוצע של המטופלים היה 33.09 ($SD = 4.21$), בדירוג ה-MAS תוצאת +1 הייתה השכיחה ביותר.

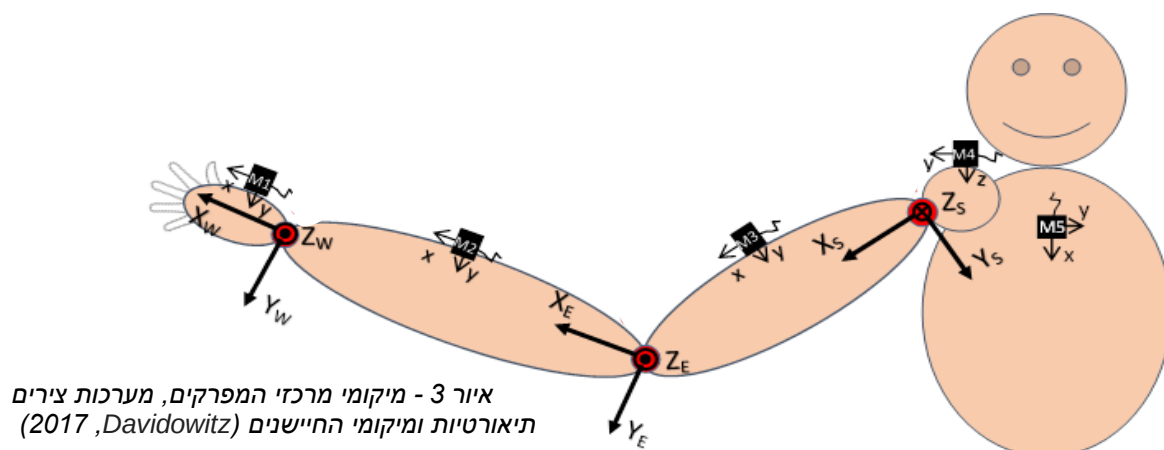
3.1.2 פרוטוקול הניסוי

המיקום הראשוני של הנבדק היה בעודו יושב על כיסא עם כפות הרגליים נתמכות ברצפה והיד מונחת לצד הגוף בעוד המרפק נמשך ל-180 מעלות (ראו תמונה באיור 2). לכיסא ישנה תמיכה לגו, קרי משענת, אשר אינה מגבילה את תנועתו. ארבע מטרות הוצגו באמצעות קונוסים חלולים סטנדרטיים ברדיוס 10 מ"מ X 30 מ"מ והונחו על השולחן מול הנבדק. מיקום שתיים מהמטרות הינו במישור האמצעי כאשר אחת קרובה למרכז (Near center (NC) target) וממוקמת כ- 2/3 מאורך הזרוע ואילו השנייה רחוקה מהמרכז (Far center (FC) target) וממוקמת במרחק השווה לאורך הזרוע. שתי המטרות הנוספות, האחת מנוגדת והשנייה בכיוון היד המבצעת (Contralateral (CO) and Ipsilateral (IP)) ממוקמות במרחק השווה לאורך הזרוע כ- 20-30 ס"מ מהמישור האמצעי משמאל (המטרה המנוגדת בביצוע המשימה ביד ימין) ומימין (למטרה ה-IP עם אותו תנאי).



איור 2 - המנח הראשוני של הנבדק ומיקומי המטרות באיור הימני, מיקומי המטרות ניתן לראות נבדק ימני כאשר מטרה 1 מייצגת את המטרה הקרובה למרכז, מטרת ה-NC; מטרה 2 מייצגת את המטרה הרחוקה למרכז, מטרת ה-FC; מטרה 3 מייצגת את המטרה המנוגדת, מטרת ה-CO, שכן הנבדק ימני והמטרה ממוקמת משמאל למרכז; מטרה 4 מייצגת את המטרה בכיוון היד המבצעת, מטרת ה-IP, שכן נמצאת מימין למרכז¹

תנועת הנבדקים הוקלטה באמצעות מערכת אלקטרומגנטית אלחוטית, G4™ Polhemus (פרטים אודות המערכת מפורטים בנספח A1). לצורך מעקב המיקומים של דרגות החופש המעורבות בתנועה מוקמו חיישנים (M1-M5) כפי שניתן לראות באיור 3, לצורך מעקב התנועה של הגפה העליונה, של הכתף ושל הגו בזמן אמת כאשר לכל חיישן ישנן שש דרגות חופש והינו בקצב דגימה של 120Hz. החיישנים הונחו על גוי שורש האמצע המורה (M1), בחלק החיצוני של האמה (1/3 מאורך האמה בקירוב לראש של הגומד) (M2), על המשטח הצידי של הזרוע העליונה בערך באמצע של הזרוע העליונה (M3), בנקודת האמצע של הגבול העילי-רוחבי של הכתף, ה-Acromion (M4), ובאמצע עצם החזה (M5). כל הקלטות הניסוי נשמרו בקבצי אקסל באמצעות Matlab™.



איור 3 - מיקומי מרכזי המפרקים, מערכות צירים תיאורטיות ומיקומי החיישנים (Davidowitz, 2017)

¹ מתוך מסמכים פנימיים של פרויקט ENAHNCE

3.1.3 מהלך הניסוי

לפני תחילת הקלטת הניסוי, ישנו שלב כיול החיישנים (קליברציה) שבו מסמנים את מיקומי גוף הנבדק הכוללים שבעה סוגי תנועות: כיפוף-יישור של המרפק (elbow flexion-extension), סיבוב כלפי חוץ וסיבוב כלפי פנים של המרפק (elbow supination-pronation), יישור-כיפוף שורש כף היד (wrist flexion-extension), תנועה צידית של הרחבה וקירוב של שורש כף היד (shoulder abduction-adduction), יישור-כיפוף הכתף, הרמת הידיים מקדימה (shoulder flexion-extension), הרמת הידיים כלפי מעלה מצדי הגוף (Shoulder Abduction-Adduction) וכן סיבוב פנימי-חיצוני בכתף (shoulder internal-external rotation). מעבר לכך, בוצע כיול סטטי עבור ארבע המטרות ומיקום הכיסא. במהלך הניסוי, הנבדקים קיבלו הנחיה לבצע תנועה של הושטה-תפיסה (reach-to-grasp) אל עבר המטרות השונות על סמך איתות חזותי. הם התבקשו לנוח בין הסטים והורשו לנוח במידת הצורך בין הניסויים. שני סטים של 40 ניסויים (10 ניסויים לכל מטרות) נרשמו, כך שסך התנועות לנבדק הינו 80. סדר הקבוצות היה מאוזן-נגדי בין הנבדקים ואילו סדר הניסויים היה קבוע אקראי (מצורף בנספח A2).

3.2 ארגון ועיבוד מקדים של הנתונים

3.2.1 קריטריונים לפסילת נתונים

מדידות עוקבות של חיישנים בערך "0" מצביעות על מדידה לקויה וקבצים עם מעל 10% מדידות לקויות נחשבו פגומים והוסרו מניתוח נוסף. הסיבה לשגיאות מסוג זה יכולה לנבוע מבעיה בהערכת הנתונים בין החיישנים למחשב. כמו כן, תנועות מוקלטות נקבעו כשגויות במצבים הבאים: המטפל הבחין במהלך ביצוע המשימה כי הנבדק לא המתין לאחר שאחז את הקונס, המטרה הוצבה במקום שגוי, או במקרים בהם המטפל קבע כי הנבדק לא ביצע את המשימה כראוי (היד נתקעה בשולחן, המשימה לא הושלמה וכו').

3.2.2 סגמנטציה

מטרת שלב הסגמנטציה, הינה לזהות מתוך כלל התנועה המוקלטת את מקטע התנועה הרצוי, ההושטה-תפיסה על ידי קיטוע החלק הרצוי. ביצוע הסגמנטציה נעשה באמצעות כלי חצי-אוטומטי אשר פותח ע"י גברת רותם דואני² ושודרג על ידינו. ההליך האוטומטי פותח למציאת קיטוע ראשוני והצגתו למשתמש לאישור ויזואלי. מסלולי התנועה סוננו באמצעות פילטר של Butterworth עם תדר דגימה של 6 הרץ. המהירות המשיקית והמהירות הזוויתית חושבו באמצעות הפרש מיקומי הדגימות וממוצע רכיבי המהירות הליניארית. הגדרות תנועה אל מול עצירה הוגדרו בנקודות הזמן בהם המהירות המשיקית של מפרק כף היד (חיישן הזרוע הקדמית, M2) חרגה ונשארה מעל, או ירדה

² המחלקה להנדסת תעשייה וניהול, אוניברסיטת בן גוריון

ונשארה מתחת, סף של 10% מהמהירות המשיקית המקסימלית של מפרק זה. במידה ולא זוהתה סגירת היד, הועלה הסף באופן איטרטיבי ב-1% עד לזיהוי סגירת יד. כמו כן, הנבדקים ביצעו בדרך כלל שתי תנועות משנה, תחילה הם הרימו את הזרוע מעלה ואז הושיטו קדימה לעבר המטרה. נקודת המחלף בין תתי-תנועות אלו נקבעה בין התחלת התנועה לנקודה בה המהירות המשיקית של המפרק (חיישן הזרוע העליונה, M3) מגיעה למינימום מקומי.

בפרק 3.3 אשר מחולק לשני תתי פרקים נתאר את מסלולי התנועה. בתת פרק 3.3.1 יסקרו משתני הגו ומישור היד ואילו בפרק 3.3.2 יצינו דרגות החופש של המפרקים השונים של הגפה העליונה אשר בהם ייעשה שימוש עתידי. בפרק הניתוח (פרק 3.4) אשר מחולק גם הוא לשני חלקים, נסקור בחלקו הראשון את המתודולוגיה למציאת נקודות השינוי בתנועה ואילו בחלקו השני נסקור את מדדי התנועה, אשר מאפיינים הן את ביצוע המשימה והן את איכות הביצוע.

3.3 מסלולי התנועה

3.3.1 מישור היד והגו

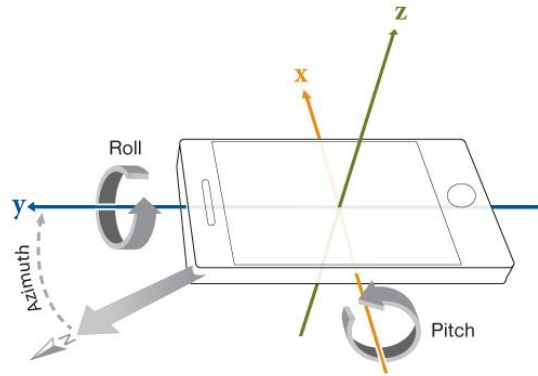
מסלולי התנועה הן של מישור היד והן של הגו אינם נגזרים מנתוני החיישנים באופן ישיר ונדרש להפיק מידע זה מן הנתונים המוקלטים. כפי שניתן לראות באיור 3 - מיקומי מרכזי המפרקים, מערכות צירים תיאורטיות ומיקומי החיישנים, לכל חיישן מערכת צירים משלו ולכן כשלב מקדים בחישובים אלו נצטרך לבצע טרנספורמציה של הנתונים בעזרת מטריצת טרנספורמציה הומוגנית למערכת צירים אחת. המטריצה T_0^{Mi} כפי שמוצגת במשוואה 1 נבנתה לכל חיישן M_i כדי לבצע מעבר מחמש מערכות הצירים של חמשת החיישנים למערכת קואורדינטות גלובלית אחת.

$$T_0^{Mi} = \begin{pmatrix} R_{zyx}(Ox_{Mi}, Oy_{Mi}, Oz_{Mi}) & X_{Mi} \\ 0 & Y_{Mi} \\ 0 & Z_{Mi} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

כאשר $R_{zyx}(Ox_{Mi}, Oy_{Mi}, Oz_{Mi})$ הינו רכיב הסיבוב של המטריצה והינו מבוסס על זוויות אוילר (Diebel 2006) ומוגדר כלהלן:

$$R_{zyx}(a, e, r) = \begin{pmatrix} \cos(a) \cos(e) & \cos(a) \sin(e) \sin(r) - \sin(a) \cos(r) & \cos(a) \sin(e) \cos(r) + \sin(a) \sin(r) \\ \sin(a) \cos(e) & \cos(a) \cos(r) + \sin(a) \sin(e) \sin(r) & \sin(a) \sin(e) \cos(r) - \cos(a) \sin(r) \\ -\sin(e) & \cos(e) \sin(r) & \cos(e) \cos(r) \end{pmatrix} \quad (2)$$

ניתן לראות כי $R_{zyx}(Ox_{Mi}, Oy_{Mi}, Oz_{Mi})$ הינה פונקציה של שלושה משתנים $a=azimuth$, האזימות המוגדרת כזווית הנמדדת בכיוון מהלך השעון בין קו הצפון לבין הקו אל עצם נתון, $e=elevation$, העלאה ו- $r=roll$. ניעזר באיור 4 לצורך ויזואליות הטרנספורמציה כאשר ה- $pitch$ מייצג את העלאה.



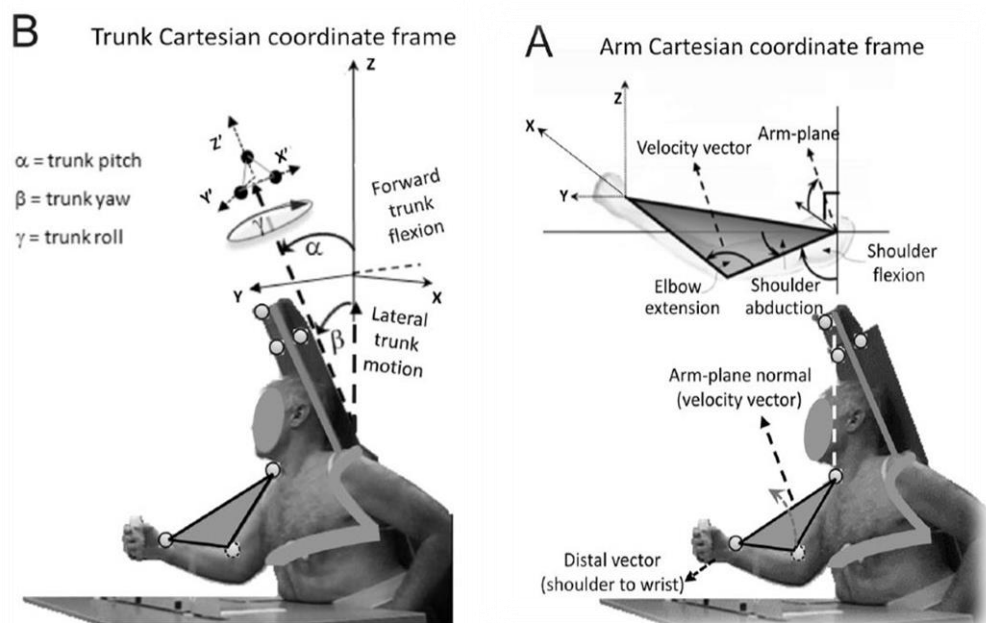
איור 4 - כיווני סיבובי הצירים³

לאחר חישוב מטריצות המעבר לכלל החיישנים ניתן לחשב את מסלולי התנועה הרצויים. הופעלה הטרנספורמציה על מרכזי הצירים של מפרק כף היד, המרפק והכתף בעזרת מטריצות R_{10} , R_{30} ו- R_{40} בהתאמה. באיור 5 ניתן לראות את מיקומי הרוטציות וכן את וקטור הנורמל של מישור היד לפיכך, וקטור הנוצר בין הכתף למרפק (SE) חושב וכן וקטור הנוצר בין המרפק לכף היד (EW), ולאחר מכן נורמלו על ידי חלוקה בגודלם. מכפלה וקטורית בין שני וקטורים אלו תחזיר את הוקטור הניצב למישור היד. לאחר נרמול וקטור זה נרצה לזקק את הזווית שבינו לבין הגו על מנת לקבל את מנח המרפק באופן יחסי לגו ולכן נבצע את החישוב כפי שמופיעה במשוואה 3. כאשר R_x מקבל את הכיוון החיובי של הגו (כלפי מעלה) בהתאם ליד המבצעת של המשימה ומכאן שזווית גבוהה יותר תאפיין שימוש קטן יותר במרפק.

$$apAngle[Deg] = arm_{plane}angle = \cos^{-1} \left(\frac{dot(AP_N, R_x')}{\|AP_N\| * \|R_x\|} \right) \quad (3)$$

את רוטציות הגו ניתן לחשב על ידי שימוש ישיר בזוויות אוילר כאשר $a=azimuth$ מייצג את הרוטציה הצידי, יסומן כ- $tRoll$, התנועה לצדדים של הגו, $e=elevation$ מייצג את רוטציית ה- $pitch$ שהזכרה מקודם, יסומן כ- $tPitch$, הרוטציה הקדמית הנוצרת מהשתופפות קדימה, וכן $r=roll$, הרוטציה הצירית, יסומן כ- $tYaw$, ומייצג את סיבוב ציר הגו לצדדים. שלוש הרוטציות יאותחלו בזמן "0" לערך 0 על מנת לקבל את הרוטציות המוחלטות של כל נבדק, מתוך הנחה שהמיקום הראשוני של הנבדקים זהה (כמתואר בפרוטוקול ניסוי) וכן נמדדים במעלות. תנועת הגו קדימה הינה מרכיב עיקרי פרט לרוטציות הגו ולכן לצורך השוואת המרחק של הגו חולצו מיקומי חיישן הגו, $M5$, למשתנה המייצג תנועה זו (tFD).

³ אתר אפל - https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_processed_device_motion_data/understanding_reference_frames_and_device_attitude



איור 5 - מישור היד ורוטרציות הגו (Levin et al 2016)

בוצעה בדיקת אימות התוצאות לבדיקת שגיאות ולוגיות. נבדקה התאימות בין הגדרת הסימן של כל משתנה לכיוונים המוגדרים. בשל טעויות רבות בהנחת החיישנים על הנבדקים, לצעד זה הייתה חשיבות משמעותית ביותר. במקרים רבים עלו טעויות במיקום הפוך של חיישן הגו, M5, ולפיכך בוצעו התאמות. לצורך שלב זה הופקו איורים 7-8 המוצגים בפרק 4.1 (פרק תוצאות מסלולי הגו ומישור היד) ומציגים את מסלולי התנועה הנ"ל של שני נבדקים, אחד מכל קבוצה, ביחס לארבע המטרות השונות. כלל החישובים בפרק זה נעשו בתוכנת ה-Matlab™, גרסה 2016a וככל הנתונים נשמרו בקבצי x/sx לכל משימת הושטה-תפיסה וכן נשמרו במרכז לכל נבדק בקובץ Matlab.

3.3.2 מסלולי התנועה של זוויות המפרקים

תנועת הנבדק אינה כוללת רק את תנועות הפיצוי ולכן נדרשים נתונים אודות יתר המפרקים הכלולים בתנועה. הגפה העליונה מאופיינת בשלושה מפרקים עיקריים: הכתף, המרפק וכף היד. לכל אחד ממפרקים אלה קיימות דרגות חופש משלו והשילובים בין דרגות חופש אלו מאפשרים ליד מגוון רחב של תנועות. לכתף שלוש דרגות חופש: יישור-כיפוף, הרמת הידיים מקדימה (sExt), הרמת הידיים כלפי מעלה מצדי הגוף (sAd), וסיבוב פנימי-חיצוני של המפרק (sInt). למרפק שתי דרגות חופש: כיפוף ויישור של המרפק (eExt) וסיבוב פנימה-החוצה של המפרק (eSup). למפרק כף היד גם שתי דרגות חופש בלבד: יישור-כיפוף של גב כף היד (wExt) והזזה צידית של כף היד (wAd). החישובים בוצעו כחלק מעבודות התזה של מר יושב דוידוביץ וגברת הדר לקריץ (Davidowitz 2017, Lackritz 2019). פרטים נוספים על משתני תנועה אלו מוצגים בנספח A3 – הגדרת דרגות החופש של המפרקים.

3.4 ניתוח

בפרק זה נסקור את השיטות לניתוח שנבצע על הנתונים לצורך בדיקת השערות המחקר. תחילה נסקור את נושא נקודת השינוי בתנועה. כחלק מההשערות נרצה לאמוד נקודת זמן אשר מחלקת את התנועה לשתי תתי-תנועות. בחלק השני של הפרק נדבר על מדדי התנועה אשר יחשבו הן לתנועה המלאה והן לשתי תתי-תנועות על מנת להסיק בהמשך על תנועת המטופלים בעת ביצוע משימת ההושטה-תפיסה אל עבר המטרות השונות.

3.4.1 נקודות השינוי בתנועה

החלוקה של התנועה לשתי תתי-תנועות שבראשונה הנבדק מרים את היד על ידי כיווץ המרפק ואילו בשנייה הנבדק מושיט את ידו אל עבר המטרה הרצויה כפי שתוארה בפרק 3.3.3 מעלה את השאלה האם ניתן לאמוד נקודת זמן זו. ניכר כי דבר שמאפיין נקודה זו הינו שימוש שונה בדרגות החופש של המפרקים אשר נכללים בתנועה. למשל בחלק הראשון נצפה שכיווץ המרפק 'בוא לידי ביטוי ואילו בחלק השני נצפה ליישור המרפק. אנו נאמוד את השינוי באמצעות חקר המשתנים הקיימים ועם שכבת הנתונים המוקלטים מחמשת החיישנים.

למציאת נקודת השינוי בתנועה נבצע סקירה של שיטות שונות שנוכל לבצע על שכבות הנתונים השונות שכן לצורך מטרה זו קיימים אלגוריתמים ושיטות רבות. אחת השיטות המקובלות הינה תרשים בקרה אשר בא לבחון שינוי של תהליך לאורך זמן. היתרון בשיטה זו הוא בזיהוי תצפית החורגת מהממוצע אך נמצאת בין גבולות הבקרה, הן הגבול העליון והן הגבול התחתון. תרשים בקרה משמש בדרך כלל בעת איסוף מקוון של נתונים. לעומת זאת, עבור נתונים רטרוספקטיביים, ניתוח נקודת-השינוי (Change point analysis(CPA)) הוא כלי חדש אשר נועד לקבוע האם התרחש שינוי. ווין (Taylor, 2000) מציג את השימוש הפשוט והיתרון הבולט של ניתוח נקודת-השינוי על פני תרשים הבקרה. ניתוח נקודת-השינוי הוא חזק יותר, מאפיין טוב יותר את השינויים, שליטה בשיעור השגיאות הכללי, הוא חזק ורגיש יותר לחריגים, גמיש יותר ופשוט יותר לשימוש.

שיטה נוספת הינה רגרסיה למקוטעין אשר מתאימה מודל לבעיה ובו המשתנה הבלתי תלוי מחולק לשני מקטעים כאשר בכל מקטע מותאם קו ישר אחד. מודל זה הוא למעשה הרחבה של הרגרסיה הליניארית כאשר קו ליניארי אחד אינו מספיק לצורך מידול הנתונים בעוד נקודת הגבול בין שני המקטעים (שני הישרים) נקראת נקודת שבר שעבורנו תייצג את נקודת השינוי. מעבר לכך, ניתן להתאים מודל מסוג רגרסיה למקוטעין גם במקרים של מספר משתנים בלתי תלויים המקובצים בקבוצות שונות ומציגים קשרים שונים בין המשתנים באזורים אלה, למעשה במקרים אלו המודל משמש כמפריד ליניארי למשל לצורך סיווג והפרדה של הנתונים. במשוואה 4 מוצגת משוואת התוחלת עבור המשתנה Y התלוי במשתנה X ומותאמים לו שני קווים, האחד עד נקודה c והשני החל ממנה.

$$E(y) = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x & ; x \leq c \\ \beta_0 + \beta_2 + (\beta_1 + \beta_3)x & ; x > c \end{cases} \quad (4)$$

האילוץ המרכזי הינו רציפות התוחלת $E(y)$ בנקודת השבר, $x = c$. בדרך כלל הקבוע c אינו ידוע והוא צריך להיאמד גם כן. בנוסף, את המודל ניתן להרחיב ליותר מנקודות שבר אחת וכאן עולה שאלה מעניינת והיא כיצד להעריך את מספר נקודות השבר במודל.

ניזכר כי התאמת מודל למציאת נקודת השינוי בתנועה צריכה להיעשות תוך התאמה לסביבת הנתונים. עקב חיפוש אחר נקודת זמן בתנועה ניכר כי תכונות רציפות התנועה בין חלקי התנועה נשמרת ולכן נשתמש במודל הרגרסיה למקוטעין לצורך אמידת נקודת השינוי בתנועה שתתקבל בנקודת השבר של המודל. כמו כן, מציאת נקודת השינוי בתנועה יכולה להיעשות על ידי חקר רמות שונות של הנתונים. השכבה הראשונה של הנתונים מכילה את הנתונים המוקלטים מניסוי ההושטה-תפיסה אשר כוללים את מיקומי חמשת החיישנים בשלוש דרגות חופש עבור כל חיישן. השכבה השנייה של הנתונים מכילה את דרגות החופש השונות של המפרקים השונים, שתי דרגות החופש של מפרק כף היד, שתי דרגות חופש של המרפק, שלוש דרגות חופש של הכתף ושלוש דרגות חופש של הגו. כפי שניתן להבחין, בכל שכבת נתונים קיימים מספר שונה של משתנים, 15 מול 10, ולכן נרצה תבנית אחידה בין השכבות להמשך חישובים אחידים של נקודות השינוי בתנועה.

"קללת המימד" הינו מושג העולה בניתוחים בהם מספר המשתנים הינו גבוה. בתנועה, מספר המימדים הינו מספר דרגות החופש הפעילות וניתן לקשר מושג זה גם למספר הדגימות שנעשות לאורך זמן שכן בתנועה ישנן דגימות בקצב גבוה ולכן גם תנועה קצרה יחסית מיוצגת באמצעות מספר רב של מיקומים. נפח הנתונים גדל מעריכי בעת הניתוח מה שמוביל לצורך מעריכי בזיכרון ובזמן החישוב. שיטות להורדת המימד מתמודדות עם "קללת המימד" על ידי הורדת מספר המימדים המקורי לצורך מטרות חישוביות.

(PCA) Principal Component Analysis הינה שיטה סטטיסטית לניתוח נתונים (Pearson) 1901 כאשר מטרתה היא לזהות את הרכיבים העיקריים בנתונים שעשויים לייצג כמה מבנים תיאורטיים. כדי להשיג מטרה זו, מחושבת קבוצה חדשה של משתנים סמויים הנקראים Principal Component, או בקיצור PC's. משתנים אלו הינם קומבינציות ליניאריות של המשתנים המקוריים מה שהופך שיטה זו לשיטה ליניארית להורדת מימד. כמו כן המשתנים הינם אורתוגונליים (בלתי תלויים) זה לזה, כך הם יכולים לפרוס מרחב סמוי מוקרן (Abdi and Williams 2010). שיטה זו הינה פשוטה ופופולרית מאוד לצורך ביצוע יעיל של הורדת מימד (Bishop 2006).

כעת עולה השאלה, כמה משתני PC יש לקחת מבלי לאבד מידע. אחד מבין המדדים המקובלים הינו אחוז השונות המוסברת אשר מוגדר להיות היחס בין השונות של משתנה PC ובין השונות הכוללת של משתני ה-PC, כאשר השונות הכוללת של משתני ה-PC שווה לעקבה (trace) של מטריצת השוניות של המשתנים המקוריים השווה לסכום השוניות של המשתנים המקוריים. אחוז השונות

המוסברת מספק לנו מדד אודות כמות המידע (שונות) אשר מסופקת על ידי כל אחד מהמשתנים החדשים או קבוצה מהם כאשר המוטיבציה הינה מזעור כמות המשתנים החדשים תוך מקסום אחוז השונות המוסברת. ולכן כעת עולה שאלה, כמה שונות מוסברת נרצה להגדיר כסף. שיטת ה-PCA הינה כלי נפוץ שניתן לראות את שימושו במחקרים רבים, במחקר של Calinon & Billard (2005), סף השונות המוסברת שנבחר עמד על 98% ואילו במחקר של Zhang, Zhang & Parker (2015) הסף הנבחר עמד על 95%. עד כה, שיטה זו הוכחה כיעילה להורדת המימד במחקרים העוסקים בתנועה.

במחקר זה פותח כלי חצי-אוטומטי למציאת נקודת השינוי התנועה. השלבים הבאים בוצעו על כל אחת משכבות הנתונים לכל חזרה של משימת הושטה-תפיסה, לכל הנבדקים משתי הקבוצות. כמו כן, לבחינת היפותזת המחקר בנושא הסירגיות נחקרו הקשרים בין המשתנים בכל שכבה באמצעות בחינת הקורלציות בין המשתנים. בשלב הראשוני בוצע מודל ה-PCA להורדת מימד אשר כלל שלושה משתנים שהבטיחו לפחות 90% שונות מוסברת ואילו בשלב השני, מודל רגרסיה למקוטעין הותאם לצורך אמידת מציאת נקודת השינוי התנועה. מודל עם נקודת שבר אחת המאפיינת את נקודת השינוי מתאים במקרה זה והותאם לכל משתנה בכל רמה כאשר הזמן הינו המשתנה הרציף כפי שניתן לראות במשוואה:

$$Variable_i^{Layer} = \begin{cases} \beta_{i,0}^{Layer} + \beta_{i,1}^{Layer} time & time < BP \\ \gamma_{i,0}^{Layer} + \gamma_{i,1}^{Layer} time & time \geq BP \end{cases} \quad (5)$$

כאשר Layer מתייחס לשתי שכבות הנתונים, 1,2, i הינו אינדקס עבור משתני ה-PC וכן עבור המשתנים בכל אחת מהשכבות. חשוב לציין שארבעת מקדמי הרגרסיה צריכים לקיים את האילוץ הבא, $\beta_{i,0}^{Layer} + \beta_{i,1}^{Layer} BP = \gamma_{i,0}^{Layer} + \gamma_{i,1}^{Layer} BP$, על מנת לשמור על רציפות בנקודת השבר.

משך התנועה הבין והתוך נבדקי אינו שווה ולכן על מנת שנוכל לבצע בחינה של נקודות השינוי שייאמדו כך שיהיו בעלי משמעות נדרש לבצע כיוול של משך התנועה. לכן, לפני יישום מודל הרגרסיה נבצע כיוול של זמן התנועה לפי המשוואה הבאה כאשר t_{min} מוגדר לערך 0 ביחידת הזמן הראשונה:

$$t_i^N = \frac{t_i - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} = \frac{t_i}{t_{max}} \quad (6)$$

כמו כן, נבצע ולידציה עבור קבוצת הבקרה ונבדוק אם למודל הרגרסיה למקוטעין יש יתרון על פני מודל רגרסיה ליניארי פשוט (לא מקוטע). לכן, שני המודלים הותאמו ונעשתה השוואה ביניהם באמצעות מדד AIC (תוצאות ההשוואה מפורטות בספח A6). החישובים בפרק זה נעשו בתוכנת ה-RStudio גרסה 3.4, ומודל הרגרסיה למקוטעין נעשה באמצעות החבילה "segmented" (Vito, 2017).

3.4.2 מדדי התנועה

נרצה להסיק על תנועות הפיצוי בקרב קבוצת המטופלים גם עבור התנועה המלאה וגם עבור שתי תתי-התנועות שמתקבלות מההפרדה על ידי נקודת השינוי. ההתנהגות המוטורית נמדדת הן בבחינת ביצועי נקודת הקצה והן בבחינת תנועות הפיצוי (Levin et al., 2009) כאשר לכל אחד סט מדדים מעט שונה אשר מחושב באמצעות משתנה תנועה אחר. מפרק שורש כף היד הינו מפרק הקצה ולכן, עבור מדדי ביצועי נקודות הקצה, יחושבו באמצעות חיישן 2 (M2) מדדי תנועה שמאפיינים את השלמת המשימה. לבחינת תנועות הפיצוי יחושבו מדדי תנועה הן למשתני רוטציות הגו והמרחק שעבר, tRoll, tPitch, tYaw & tFD, והן למשתנה הזווית בין מישור היד לגו, paAngle.

3.4.2.1 מדדי מפרק כף היד

מדדים אלו מספקים כימות אינפורמטיבי אודות הביצוע בנקודת הקצה ומייצגים את ביצועי המשימה. תנועת מפרק כף היד נגזרת באופן ישיר מחיישן 2 (חיישן מפרק היד, M2) ולכן לא נדרש עיבוד מקדים כלשהי עבור משתנה זה. בטבלה 1 מוצגים המדדים הקינטיים, שמם המקוצר, הסבר על אופן החישוב וכן היחידות המתאימות. בין המדדים ניתן לראות את משך התנועה, המהירות המשיקית הממוצעת והמקסימלית, אינדקס העקמומיות, אורך הנתיב, מרחק התנועה וכן משתנה נוסף NPTVW שהינו מספר שינויי הכיוון במהירות המשיקית. משתנה זה מספק מידע אודות רציפות התנועה שכן למשל בהושטה פשוטה של המרפק אצל אדם בריא נצפה לקבל 0 שינויים.

Measure calculated	Name Acronyms	Calculate explanation	Units
Movement Time	MTW	Time performance of the task.	Sec
Mean Tangential Velocity Wrist	MTVW	Mean tangential velocity of wrist, sensor M2.	Mm/Sec
Peak Tangential Velocity Wrist	PTVW	Max of tangential velocity of wrist, sensor M2.	Mm/Sec
Percentage time of Peak Tangential Velocity Wrist	PTVW_P	The number of PTVW divided by timesteps of the specific trial.	Percentage [0,1]
Number of Peaks Tangential Velocity Wrist	NPTVW	Number of changes in wrist tangential velocity direction, while the threshold for change in direction is having at least five timesteps in the same direction.	Number
Path distance	PD	Square of the sum square of wrist Subtraction end and start position in three coordinates, x, y and z.	Mm
Path length wrist	PL	Integral of tangential velocity over time.	Mm
index of curvature	IC	PD/PL	Number

3.4.2.2 מדדי התנועה עבור מישור היד

מישור היד מכמת את תנועה המרפק באמצעות החישוב של זווית מישור היד אשר סוקר בפרק 3.3.1. לצורך חקירת תנועת המשתנה חושבו מדדי תנועה אשר ייצגו ויכמתו את אופן וכמות השימוש במרפק, הזווית ההתחלתית והסופית, המהירות הממוצעת, טווח התנועה, אורך נתיב התנועה וחושבו מספר השינויים בכיוון התנועה של מישור היד. פירוט אודות דרכי חישוב, שמות המשתנים ויחידות מפורטים בטבלה 2.

3.4.2.3 מדדי התנועה של הגו

תנועת הגו מיוצגת באמצעות ארבעה משתנים הכוללים את שלושת רוטציות הגו: tPitch, tRoll, tYaw ואת תנועת הגו קדימה tFD. לכל אחד ממשתנים אלה נרצה לחשב את מדדי התנועה אשר באמצעותם נבחן את השערותינו. מדדים אלו מחושבים כפי שמתואר בטבלה 3, בה מוצגים גם שמות המשתנים ויחידותיהם. לארבעת המשתנים חושבו אורכי הנתיבים והמהירויות הממוצעת. עבור tFD חושב המרחק ואילו עבור רוטציות הגו חושב טווח זווית התנועה והזווית הסופית.

טבלה 2 - מדדי התנועה של מישור היד

Measure calculated	Short Name	Calculate explanation	Units
Initial angle	paIA	Angle at the start of the movement, on the first timestep, defined as 0 time.	Deg
Final angle	paFA	Angle at the end of the movement, on the last timestep.	Deg
Mean velocity	paMV	The tangential velocity is the derivative of location with respect to change in time, while locations defined as the absolute position differences. The mean tangential velocity included velocity bigger than a specific threshold defined as 10% of the maximal tangential velocity.	Mm/sec
Number of peaks Trajectory velocity	paNPTV	Number of changes in tangential velocity direction, while the threshold for change in direction is having at least five timesteps in the same direction.	Number
Range	paR	The absolute subtraction between the end and start positions.	Deg
Path length	paPL	The sum of absolute position differences.	mm

טבלה 3 - מדדי התנועה של משתני הגו

Measure calculated	Short Name				Calculate explanation	Units	
	tRoll	Pitch	Yaw	tFD		Rotations	Forward
Final angle	tRFA	tPFA	tYFA	--	Angle at the end of the movement, on the last timestep.	Deg	-
Mean velocity	tRMV	tPMV	tYMV	tFDMV	The tangential velocity is the derivative of location with respect to change in time, while locations defined as the absolute position differences. The mean tangential velocity included velocity bigger than a specific threshold defined as 10% of the maximal tangential velocity.	Mm/sec	Cm/sec
Range / Distance	tRR	tPR	tYR	tFDD	The absolute subtraction between the end and start positions.	Deg	Cm
Path length	tRPL	tPPL	tYPL	tFDPL	The sum of absolute position differences.	mm	Cm

3.5 ניתוח סטטיסטי

באמצעות סטטיסטיקה תיאורית הודגשו המאפיינים הדמוגרפיים והקליניים העיקריים של הנבדקים וכן נבחנו ההבדלים בין הקבוצות באופן ויזואלי. מתאמי פירסון חושבו כדי לבחון האם קיימים קשרים בין תוצאות מדדי התנועה לסוגי הנבדקים. למדדי תנועה נבחרים הותאם מודל ליניארי מעורב. המודל כלל את האפקטים הקבועים הבאים, משתנה הקבוצה שהינו, בין-נבדקי המאפיין את סוג הנבדק ובעל שתי רמות (קבוצת המטופלים עבור נבדק לאחר אירוע-מוחי, קבוצת הבקרה עבור הנבדקים הבריאים), משתנה המטרה שהינו משתנה תוך-נבדקי עם ארבע רמות (המטרה הקרובה NC, המטרה הרחוקה FC, המטרה המנוגדת CO והמטרה שבצד היד המבצעת IP) ואת האינטראקציה ביניהם, וכן, המודל כלל את המשתנה U_i , כגורם אקראי עבור נבדק ספציפי, ואת המשתנה W_i , כגורם אקראי עבור המדינה כפי שמוצג במשוואה 7. במידה ונמצא הבדל מובהק נעשה שימוש בתוצאות המודל כפלט לניתוחי המשך שנעשו (Post-Hoc Analysis) בעזרת בחבילה "eameans" (Russell, 2019).

$$M_i = \beta_1 Group + \beta_2 Target + \beta_3 Group: Target + U_i + W_i \quad (7)$$

אזכיר כי נקודת השינוי נאמדה באמצעות מודל הרגרסיה למקוטעין שהותאם לכל אחד משלושת רכיבי ה-PC אשר חושבו בכל אחת משכבות הנתונים. תחילה, ערכי נקודות השינוי נבחנו באמצעות סטטיסטיקה תיאורית והתאמת מודל ליניארי מעורב למציאת מובהקות ההבדלים בין הקבוצות בשכבות השונות. לכל רכיב PC הותאם מודל כפי שמוצג במשוואה 7. במקרים בהם נמצא אפקט בעל הבדל מובהק בין הקבוצות בוצעו מבחני Post-Hoc למציאת ההבדלים באופן מדויק.

לכל נבדק נקבעו לבסוף ארבע נקודות ייחודיות, אחת לכל מטרה, אשר חושבו כממוצע משוקלל בין רכיבי ה-PC כאשר משקל כל רכיב נשען על אחוז השונות המוסברת שלו. לאחר אמידת הנקודות לכלל הנבדקים, מדדי התנועה חושבו עבור שני חלקי התנועה שהתקבלו כתוצאה מחלוקתה. כתוצאה מכך, נוסף למודל משתנה תוך-נבדקי, החלק בתנועה בעל שתי רמות (החלק הראשון והחלק השני). כאשר נבדקה האינטראקציה בינו, בין שכבת הנתונים ובין קבוצת הנבדקים הוחלט, עקב חוסר מובהקות סטטיסטית של אינטראקציה זו במרבית מדדי התנועה, לבחון כל שכבת נתונים בנפרד.

עבור כל שכבת נתונים למדדים הנבחרים יושמה סטטיסטיקה תיאורית ונעשתה בדיקת מובהקות סטטיסטית של הגורמים המשפיעים, לצורך בחינת הבדלי הביצוע בין חלקי התנועה בין הקבוצות השונות ובמילים אחרות, בחינת השאלה האם בחלק מסוים של התנועה אסטרטגיית התנועה של קבוצת המטופלים דומה לאסטרטגיית התנועה של קבוצת הבקרה. נבחנה השפעת האינטראקציות הן המשולשת והן הזוגיות שמתקבלות בין שלושת הגורמים הקבוצה, החלק בתנועה והמטרה. לבסוף, מבחני Post-Hoc הותאמו לחישוב ההבדלים עצמם ברמת מובהקות של 5%. המודל שהותאם:

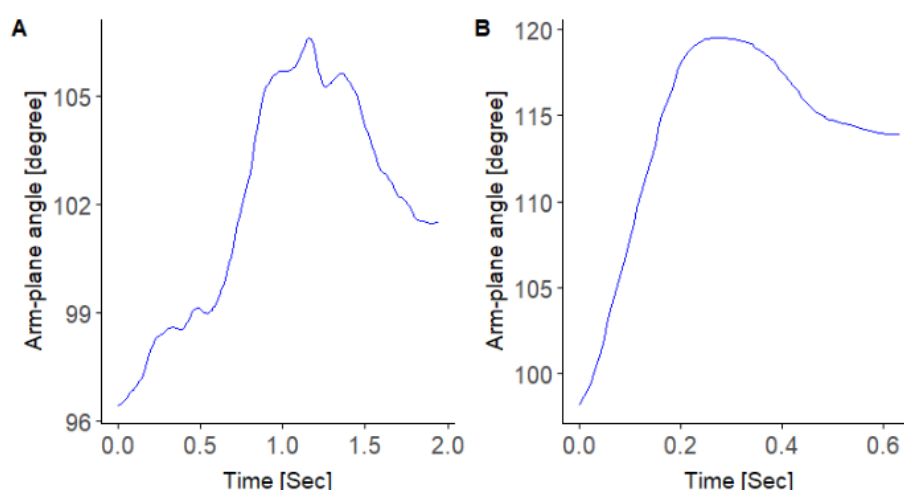
$$\begin{aligned}
 M_i = & \beta_1 Group + \beta_2 Target + \beta_3 Part_{inmotion} + \beta_4 Group:Target \\
 & + \beta_5 Group:Part_{inmotion} + \beta_6 Target:Part_{inmotion} \\
 & + \beta_7 Group:Target:Part_{inmotion} + U_i + W_i
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

4 תוצאות

בפרק זה נציג את תוצאות כלל שלבי הפרויקט וכן את תוצאות הניתוח הסטטיסטי שבוצע לצורך מענה על השערות המחקר ובחינת השאלות המנחות. בפרק 4.1 יוצגו ויתוארו מסלולי התנועה של משתני הגו ומישור היד הכוללים הן את רוטציות הגו ותנועתנו קדימה ואת זווית מישור היד. בפרק 4.2 נסקור את שלבי השיטה למציאת נקודת השינוי בכל אחת משכבות הנתונים. בפרק 4.2.1 יסקרו תוצאות השכבה הראשונה ובפרק 4.2.2 יסקרו תוצאות השכבה השנייה. פרק 4.3 יעסוק במדדים הקינטיים של התנועה כאשר בתת פרקו הראשון 4.3.1 יחקרו המדדים ביחס לתנועה המלאה, בפרק 4.3.2 יסקר ניתוח גורמים שבוצע על המדדים לבחינת המדדים המשפיעים ביותר וכן בפרק 4.3.3 יסקרו תוצאות מדדי התנועה בשני חלקי התנועה אשר התקבלו מהחלוקה שנוצרה על ידי נקודות השינוי שחושבו.

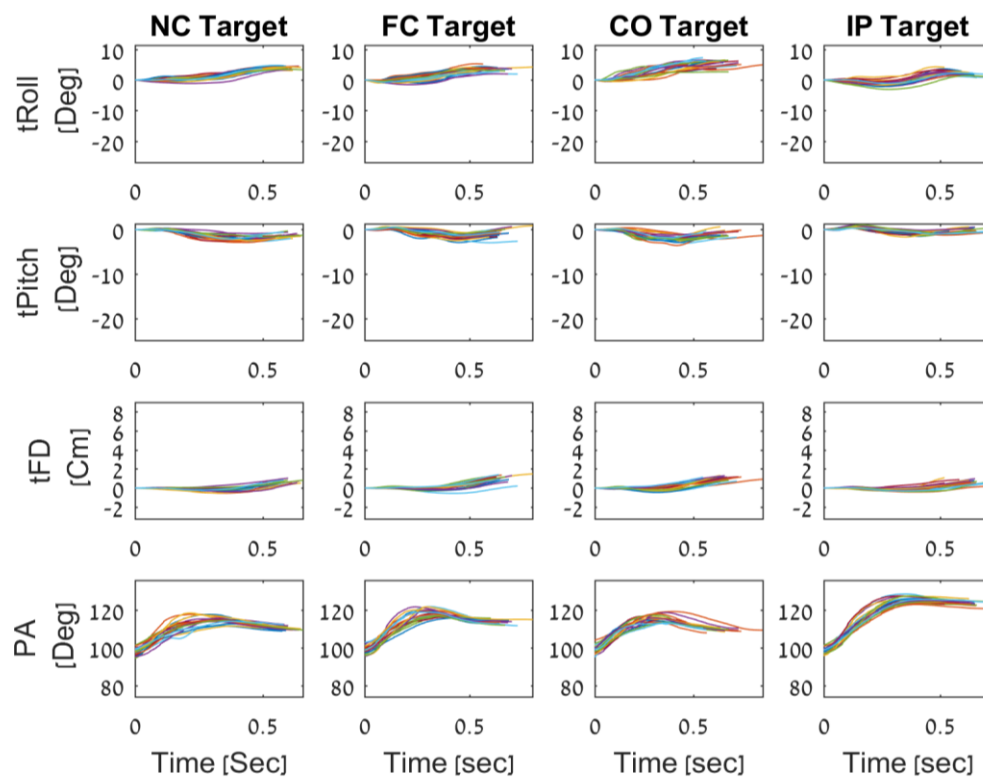
4.1 מסלולי הגו ומישור היד

חישוב מסלולי הגו ומישור היד הינם שלב בדרך לכימות תנועות הפיצוי אשר מבוצעות בזמן התנועה. דוגמת פלט לחישובים אלו עבור נבדק מקבוצת הבקרה ניתן לראות בטבלה B.1 - מסלולי משתני הגו ומישור היד, בנספח B.1. איור 6 מציג את מסלולי זווית מישור היד של שתי נבדקות, האחד מכל קבוצה, בחזרה בודדת של משימת ההושטה-תפיסה. כפי שניתן לראות החישובים בוצעו פר יחידת זמן. ניתן ללמוד מכך שתנועת הנבדקת מקבוצת הבקרה חלקה יותר, מהירה יותר והזווית הסופית גבוהה יותר. משך התנועה של הנבדקת מקבוצת המטופלים ארוכה יותר בכ-1.4 שניות ותנועתה פחות חלקה ורציפה מה שמתבטא בשינויי כיוון רבים במהלך התנועה שקוטעים את התנועה ומחלקים אותה למעין סדרת תנועות קטנות יותר.



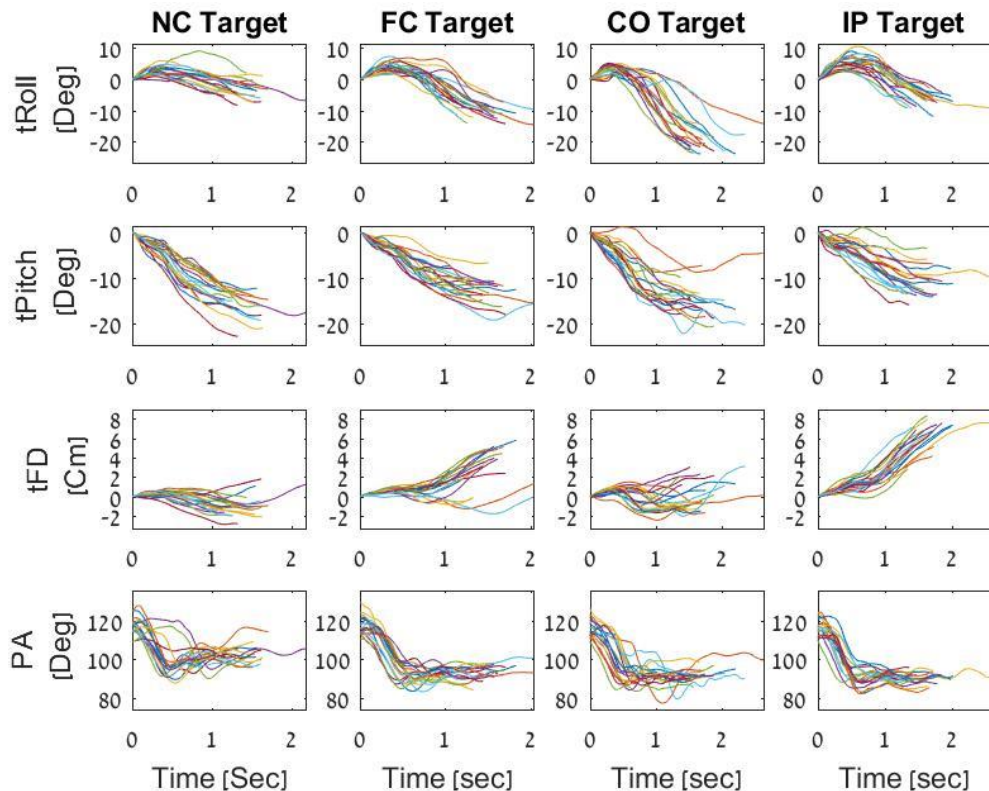
איור 6 - מסלולי זווית מישור היד של נבדק מקבוצת המטופלים (A) לעומת נבדק מקבוצת הבקרה (B). איור A הינו מסלול של נבדקת 1 מקבוצת המטופלים, ציון $MAS=+1$, $FMA=39$; איור B הינו מסלול של נבדקת 1 מקבוצת הבקרה. שתי הנבדקות ביצעו את המשימה ביד ימין וכן חזרה זו בוצעה אל עבר המטרה האמצעית הרחוקה.

על מנת לקבל אינדיקציה על כל התנועה ובאופן ספציפי על כל אחת מארבע המטרות נתבונן בשני הגרפים המוצגים מתחת, אחד מציג תנועת נבדקת מקבוצת הבקרה (איור 7) והשני את תנועת נבדקת מקבוצת המטופלים (איור 8). כל גרף מציג את כלל החזרות של נבדק לפי חלוקה למטרות



איור 7 - מסלולי הגו ומישור היד לעבר המטרות השונות של נבדקת 1 מקבוצת הבקרה.

כאשר כל קו מייצג חזרה בודדת של משימת ההושטה-תפיסה מה שמאפשר ללמוד מהם על ההבדלים בין תנועת הנבדקים בצורה מגמתית. ניתן לראות בנבדקת מקבוצת הבקרה כי ישנה תבנית קבועה בין החזרות מה שמצביע על יכולת הנבדקת לחזור על תבנית התנועה בניגוד לנבדקת מקבוצת המטופלים שפיזור החזרות הינו גדול מה שמצביע על שונות גבוהה בתבנית התנועה שננקטה אל עבר כל אחת מארבעת המטרות השונות כאשר הבדלים אלו ניכרים לא רק בזווית מישור היד אלא גם במשתני התנועה של הגו.



איור 8 - מסלולי הגו ומישור היד לעבר המטרות השונות של נבדקת 2 מקבוצת המטופלים, ציון FMA=33, MAS=+1;

4.2 נקודות השינוי

נקודות השינוי חושבו עבור שתי שכבות הנתונים כאשר משתני השכבה הראשונה, שכבת הנתונים הגולמיים, הינם קואורדינטות המיקום של חמשת החיישנים ואילו משתני השכבה השנייה, שכבת דרגות החופש, הינם דרגות החופש של מפרקי הגפה העליונה והגו. נזכיר כי לצורך מציאת נקודות השינוי, בתחילה נותחו הקורלציות בין המשתנים, לאחר מכן הורד המימד באמצעות מודל PCA ונוצרו משתנים חדשים כשלבסוף נאמדה נקודת השינוי באמצעות התאמת מודל הרגרסיה למקוטעין לרכיבים אלו.

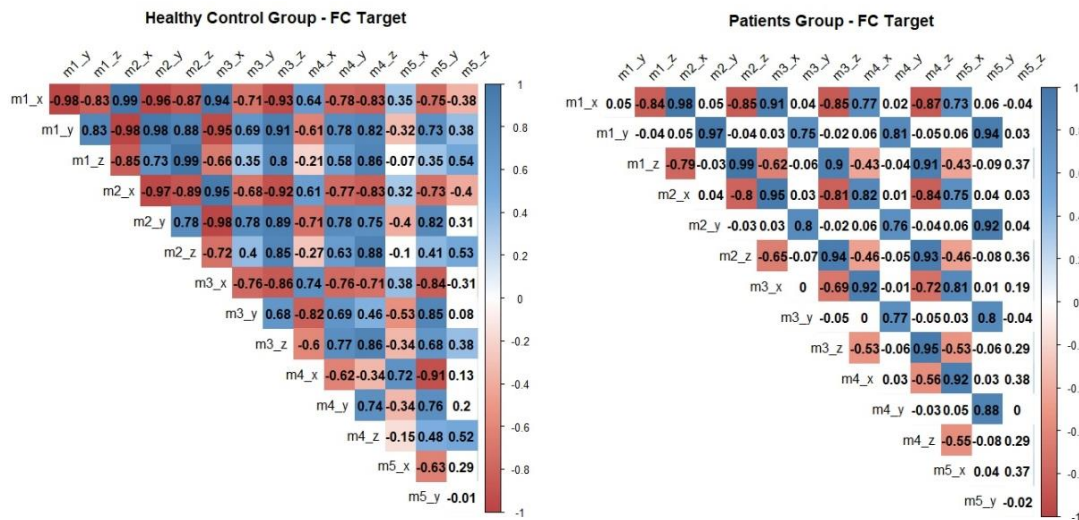
4.2.1 שכבה 1 – שכבת הנתונים הגולמיים

משתני שכבת הנתונים הגולמיים הינם קואורדינטות X, Y ו- Z של נתוני ההקלטה של חמשת החיישנים שמוקמו על הנבדק בעת משימת ההושטה-תפיסה ומסומנים כ $M_{i-x}, M_{i-y}, M_{i-z}$ עבור חיישן i .

4.2.1.1 קורלציות

לכל נבדק חושבו הקורלציות עבור כל חזרה של משימת ההושטה-תפיסה. כלל המתאמים מכל קבוצת נבדקים מוצעו לפי המטרה ובכך התקבלו שמונה מטריצות קורלציות, אחת לכל מטרה עבור כל קבוצת נבדקים. באיור 9 מוצגת הקורלציה הממוצעת לעבר המטרה הרחוקה לכל קבוצה, קבוצת המטופלים מימין וקבוצת הבקרה משמאל. כפי שניתן לראות באיור, לקבוצת הבקרה קורלציות חזקות

יותר אשר מאפיינות את הקונטרסט בין ערכי ה X לסכום ערכי ה Y וה- Z שנצפה בשתי הקבוצות וכן ניכר הדמיון בכיווני הקורלציות בחמשת החיישנים השונים.

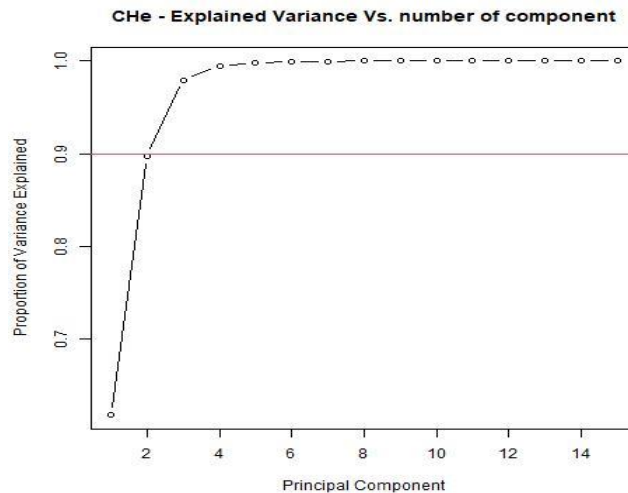


איור 9 - שכבת הנתונים הגולמיים, קורלציות ממוצעות לעבר המטרה הרחוקה

הקורלציות בקבוצת הבקרה מאופיינות באופן הבא: לקואורדינטות X ישנן קורלציות שליליות הן עם קואורדינטות ה- Y ועם קואורדינטות ה- Z בתוך כל חיישן ובין החיישנים השונים וקורלציות חיוביות עם קואורדינטות X של חיישנים אחרים. קואורדינטות Y בעלת קורלציות חיוביות עם קואורדינטות Z בתוך כל חיישן ובין החיישנים השונים ובעלות קורלציות חיוביות עם קואורדינטות Y של חיישנים אחרים וכן, קואורדינטות Z בעלות קורלציות חיוביות בין לבין עצמן. נראה גם שהקורלציות הולכות וקטנות ככל שהמרחק בין החיישנים עולה. הרציונל מאחורי התוצאה האחרונה הוא מיקומי החיישנים. בעוד שחיישנים $M1$ ו- $M2$ ממוקמים על שורש כף היד, חיישנים $M3$ ו- $M4$ ממוקמים על הגפה העליונה ואילו חיישן $M5$ על עצם החזה, ככל ששני חיישנים קרובים יותר האחד לשני, הקורלציה ביניהם גבוהה יותר. בקבוצת המטופלים קורלציות בתבניות דומות לאלה של קבוצת הבקרה אך הקורלציות חלשות יותר. מניתוח הקורלציות הממוצעות של שלוש המטרות האחרות ניכרת מגמה דומה (תוצאות אלה מפורטות בנספח B2).

4.2.1.2 הורדת מימד

הורדת המימד בוצעה על חמישה עשר המשתנים בשכבת נתונים זו. מספר הרכיבים נקבע על פי מספר הרכיבים המינימלי שיסביר לפחות 90% מהשונות הכללית. באיור 10 מוצג גרף של אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים כאשר תהליך זה התבצע ברזולוציה של נבדק בניסוי אחד של ההושטה-תפיסה. בדוגמא זו ניתן לראות ששני רכיבים אינם מספקים וכי נדרש רכיב שלישי על מנת להבטיח הסבר של לפחות 90% מהשונות הכללית. כמו כן, במרבית המקרים נדרשו שני רכיבים אך על מנת לעמוד בתנאי זה תמיד, הוחלט באופן גורף לעבוד עם 3 רכיבים.



איור 10 - שכבת 1, אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים החדש

בשלב הבא לאחר קביעת מספר הגורמים, חולצה מטריצת מקדמי ההעמסה אשר מייצגת את משקלי המשתנים המקוריים בחישוב הרכיבים החדשים. בכדי ללמוד על המשמעות של הרכיבים חושבו הממוצע וסטיית התקן של המקדמים של כל רכיב על פני כל הניסיונות של נבדק ושוב ממוצע על פני האנשים בכל קבוצה. את התוצאות של הממוצע וסטיית התקן ניתן לראות בטבלה 4 כאשר מקדמים עם ערך מוחלט גדול מ-0.4 הודגשו. כמו כן, ניתן לראות שונות מאוד קטנה (למשל כמעט 0 עבור קואורדינטות X ו-Z של חישן M1 בגורם הראשון) אשר מלמדת אותנו על הדמיון הרב שיש בין הגורמים החדשים שנוצרו בין הנבדקים השונים, במיוחד ברכיב הראשון.

טבלה 4 - שכבה 1, מיצוע מקדמי ההעמסה של קבוצת הבקרה

Var Name		PC1		PC2		PC3	
		mean	std	mean	std	mean	std
M1	X	0.291	0	-0.017	0.003	-0.017	0.002
	Y	-0.19	0.002	0.005	0.005	-0.022	0.004
	Z	-0.25	0	0.171	0.011	0.017	0.005
M2	X	0.292	0	-0.026	0.003	-0.017	0.001
	Y	-0.178	0.001	-0.032	0.004	-0.016	0.002
	Z	-0.261	0	0.151	0.008	0.003	0.003
M3	X	0.265	0	0.069	0.004	0	0.009
	Y	-0.118	0.007	-0.132	0.015	0.031	0.005
	Z	-0.265	0.002	0.02	0.003	0.013	0.003
M4	X	0.135	0.011	0.197	0.013	-0.03	0.002
	Y	-0.22	0.002	-0.071	0.01	-0.025	0.004
	Z	-0.247	0.006	0.088	0.006	-0.01	0.002
M5	X	0.074	0.03	0.147	0.008	-0.057	0.018
	Y	-0.171	0.006	-0.164	0.01	0.014	0.006
	Z	-0.137	0.018	0.122	0.014	0.04	0.005

ניתן ללמוד גם שהרכיב הראשון משקף את הקונטרסט בין ממוצע קואורדינטות ה- X לסכום ממוצע קואורדינטות ה- Y וממוצע קואורדינטות ה- Z ומסביר בממוצע 74.4% מהשונות המוסברת בקבוצת הבקרה לעומת 78.88% בקבוצת המטופלים. הסיבה לתוצאה זו עשויה להיות מוסברת מהקורלציות השליליות של X עם שני הצירים האחרים, ולכן הכפלה בערך שלילי תהפוך סימן זה ויתקבל הממוצע בין שלושת הצירים. הרכיב השני מסביר בממוצע 20.16% מהשונות המוסברת בקבוצת הבקרה לעומת 18.25% בקבוצת המטופלים ואילו הרכיב השלישי מסביר בממוצע 3.92% בקבוצת הבקרה אל מול 2.11% בקבוצת המטופלים (מקדמי העמסה של קבוצת המטופלים מוצגים בנספח B3 בעמוד 73).

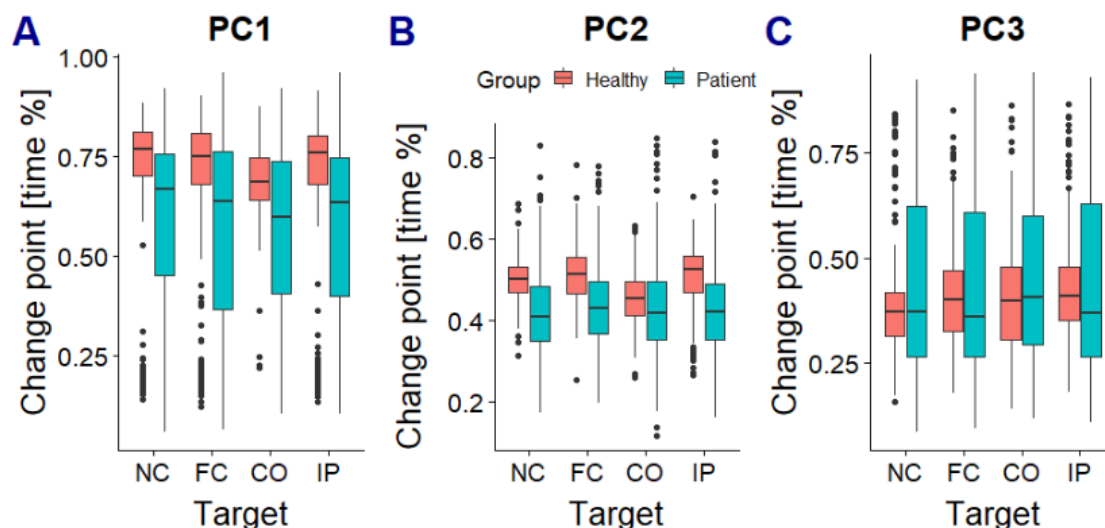
4.2.1.3 אמידת נקודת השינוי

מודל הרגרסיה למקוטעין הותאם לכל אחד משלושת הגורמים החדשים שנוצרו בשלב הורדת המימד. בטבלה 5 מוצגים הממוצע וסטיות התקן של נקודות השינוי שנאמדו כתוצאה מהתאמת המודל שחושבו לכל קבוצה על פני כל מטרה.

טבלה 5 - תוצאות נקודות השינוי שנאמדו במיצוע לפי מטרה לכל קבוצה

Stage	Target	N	PC1		PC2		PC3	
Control	NC	240	0.685	(0.040)	0.509	(0.006)	0.426	(0.017)
	FC	237	0.659	(0.054)	0.513	(0.004)	0.413	(0.016)
	CO	231	0.699	(0.039)	0.498	(0.003)	0.388	(0.017)
	IP	234	0.686	(0.009)	0.454	(0.004)	0.411	(0.021)
Patient	NC	512	0.577	(0.047)	0.430	(0.011)	0.437	(0.043)
	FC	504	0.571	(0.052)	0.434	(0.010)	0.436	(0.044)
	CO	503	0.597	(0.045)	0.421	(0.011)	0.440	(0.042)
	IP	499	0.564	(0.045)	0.426	(0.013)	0.450	(0.038)

ניתן לראות תוצאות שונות בערכי נקודות השינוי בין הקבוצות כאשר לקבוצת הבקרה ערכים גבוהים יותר, וככל שאינדקס הגורם עולה, ערכי נקודות השינוי קטנות, קרי השינוי מתרחש מוקדם יותר. לעומת זאת, ניתן לראות כי השינוי של רכיבי ה- PC השני והשלישי בקבוצת המטופלים מתרחש בנקודת זמן זהה המוקדמת מזו של הגורם הראשון. בטבלה 5 ואיור 11 מלמדים שממוצע, השינוי התרחש ברכיב הראשון מוקדם יותר בקבוצת המטופלים לעומת קבוצת הבקרה, בערך 0.58 לעומת 0.68. הרכיב השני הראה תוצאה זהה אך חלשה יותר, 0.43 לעומת 0.49 וכן ברכיב השלישי לא נמצאו הבדלים בין השתי הקבוצות. בנוסף, ניתן ללמוד כי השפעת המטרה הינה מינורית.



איור 11 – שכבה 1, תרשים אינטראקציה בין קבוצה למטרה לכל רכיב

בנוסף לסטטיסטיקה התיאורית, תוצאות המודל הליניארי המעורב הראו הבדלים מובהקים בין קבוצות הנבדקים. לרכיב ה-PC הראשון, נמצא כי הבדל מובהק בין קבוצות הנבדקים ($F=19.15$, $P<.001$) ובין המטרות השונות ($F=3.30$, $P<.01$) אך האינטראקציה בין שני הגורמים לא נמצאה מובהקת סטטיסטית ($P=0.45$). בקבוצת המטופלים השינוי חל מוקדם יותר מאשר בקבוצת הבקרה, 0.58 מול 0.68 בתאמה. כמו כן נמצא הבדל בזמני השינוי בין המטרות השונות, ניתוח ההמשך מצא הבדלים מובהקים רק בזוג אחד, בין מטרת ה-FC למטרה ה-CO ($P=0.018$), השינוי במטרת CO נעשה מאוחר יותר 0.69 מול 0.59 בהתאמה.

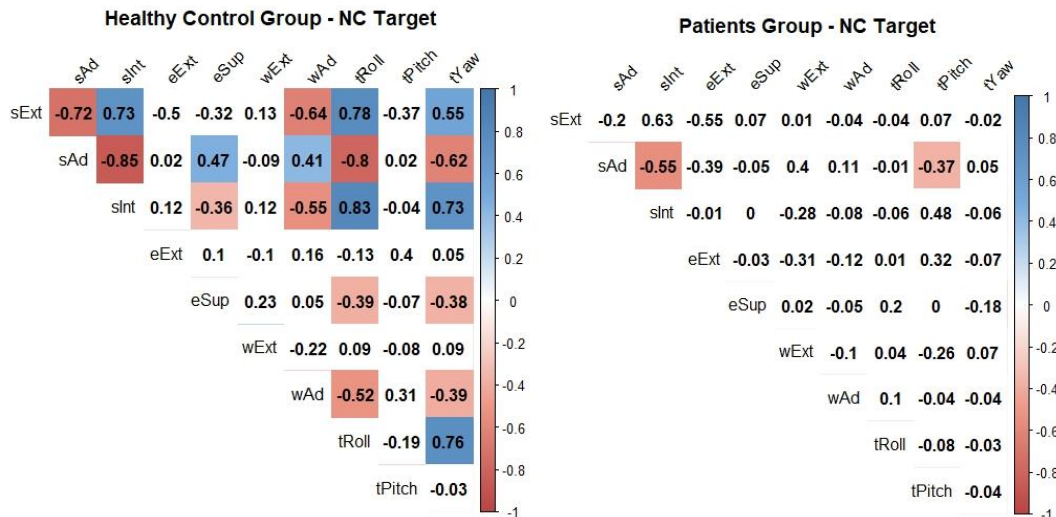
למרות חוסר מובהקות האינטראקציה שנמצאה בין קבוצת הנבדק למטרה, ההבדל בכל קבוצה בין מטרת ה-NC וה-IP נמצא מובהק סטטיסטית ($P<.004$). ברכיב ה-PC השני נמצאה מובהקות בשלושת האפקטים הקבועים, בקבוצת הנבדקים ($F=15.07$, $P<.001$), במטרות השונות ($F=13.84$, $P<.001$) ובאינטראקציה ביניהם ($F=16.07$, $P<.001$). נמצא כי ההבדל בין שתי קבוצות הנבדקים לעבר מטרת ה-FC מובהק סטטיסטית ועומד על 0.083, 0.45 מול 0.42. ברכיב ה-PC השלישי כל שלושת הגורמים, שני הגורמים העיקריים והאינטראקציה, לא נמצאו מובהקים סטטיסטית (פירוט כלל מבחני Post-Hoc מפורטים בנספח B4).

4.2.2 שכבה 2 – שכבת דרגות החופש

משתני שכבת דרגות החופש הינם עשר דרגות חופש הכלולות בתנועה: שלוש רוטציות הגו $tRoll$, $tYaw$ ו- $tPitch$, שבע דרגות החופש של הגפה העליונה שתוארו בפרק 3.3.2 הכוללות את שלוש דרגות החופש של הכתף: יישור-כיפוף, הרמת הידיים מקדימה ($sExt$), הרמת הידיים כלפי מעלה מצדי הגוף (sAd), וסיבוב פנימי-חיצוני של המפרק ($sInt$). שתי דרגות החופש של המרפק: כיפוף ויישור של המרפק ($eExt$) וסיבוב פנימה-החוצה של המרפק ($eSup$) ושתי דרגות החופש של מפרק כף היד: יישור-כיפוף של גו כף היד ($wExt$) והזזה צידית של כף היד (wAd).

4.2.2.1 קורלציות

באיור 12 ניתן לראות את הקורלציות הממוצעות של כלל הנבדקים בכל קבוצה בחזרות שבוצעו לעבר המטרה הקרובה (NC). הקשרים אצל קבוצת הבקרה הינם חזקים משל קבוצת המטופלים אך חלשים מאלו שנמצאו בשכבה הראשונה, שכבת הנתונים הגולמיים.

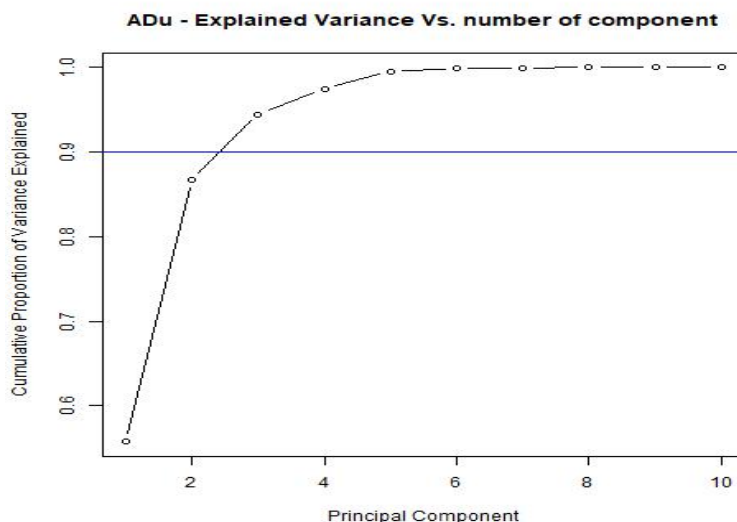


איור 12 - שכבה 2, קורלציה ממוצעת לעבר המטרה הקרובה עבור קבוצת המטופלים (מימין) וקבוצת הבקרה (משמאל)

קבוצת הבקרה מאופיינת בקורלציות חזקות בין דרגות החופש של הכתף, בין היישור-כיפוף להרמת הידיים מעלה (-0.72) ובין הרמת הידיים מעלה לסיבובו (0.73). קורלציה שלילית שנמצאה בין רוטציית ה-Roll של הגו לדרגת החופש של הכתף - הרמת הידיים למעלה (sAd) (-0.8) ובקורלציות חיוביות עם שתי דרגות החופש האחרות של הכתף, 0.83 עם הסיבוב פנימי-חיצוני, slnt, ו-0.78 עם יישור-כיפוף הכתף. נמצאו קורלציות דומות בין המטרות השונות, ניתן למצוא את תוצאות הקורלציות לעבר המטרות IP, FC, ו-CO בנספח B5.

4.2.2.2 הורדת מימד

באופן דומה להורדת המימד שצוינה עבור שכבת הנתונים הגולמיים, בוצעה הורדת מימד לנתונים בשכבה זו. באיור 13 מוצג גרף של אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים החדש כאשר גם כאן תהליך זה בוצע בניסיון בודד של נבדק בודד. בדוגמא זו ניתן לראות שגם בשכבת נתונים זו שני רכיבים אף הם אינם מספקים על מנת להבטיח להסביר לפחות 90% מהשונות המוסברת, וכי נדרש רכיב שלישי. על אף שבמרבית המקרים נדרשו שני רכיבים כדי לעמוד בתנאי של 90% שונות מוסברת הוחלט באופן גורף לצורך אחידות מבנה התוצאות בין שכבות הנתונים, לעבוד עם שלושה רכיבים.



איור 13 - שכבה 2, אחוז השונות המוסברת המצטברת כפונקציה של מספר הרכיבים החדשים

בטבלה 6 מוצגים ממוצעי וסטיות התקן של מטריצת מקדמי ההעמסה שחושבו באופן דומה לשכבת הנתונים הגולמיים. ברכיב ה-PC הראשון ניתן לראות את הניגוד בין סכום הרמת הידיים למעלה (*sAd*) לתנועה הצידיית של שורש כף היד (*wAd*) לבין סכום שתי דרגות חופש של הכתף, הרמת הידיים הצידה (*sExt*), וסיבובה (*slnt*) ושתי רוטציות הגו הרול (*tRoll*) והסיבובי (*tYaw*). הגורם הראשון מסביר בממוצע 1% יותר בקבוצת הבקרה, 62.77% לעומת 61.74%.

טבלה 6 - שכבה 2, ממוצעי וסטיות תקן של מקדמי העמסה של קבוצת הבקרה

Var Name		PC1		PC2		PC3	
		mean	std	mean	std	mean	std
Shoulder	sExt	0.33	0.003	-0.108	0.014	0.036	0.003
	sAd	-0.247	0.013	-0.06	0.011	0.041	0.007
	sInt	0.206	0.004	0.177	0.015	0.006	0.003
Elbow	eExt	-0.067	0.009	0.4	0.027	-0.034	0.017
	eSup	-0.126	0.023	-0.012	0.077	-0.004	0.013
Wrist	wExt	0.038	0.084	-0.002	0.013	-0.026	0.017
	wAd	-0.235	0.013	-0.027	0.012	-0.051	0.031
Trunk	tRoll	0.275	0.007	0.074	0.007	-0.035	0.007
	tPitch	-0.085	0.067	0.096	0.022	-0.081	0.019
	tYaw	0.204	0.021	0.145	0.015	-0.05	0.011

ברכיב השני ניתן לראות את הניגוד בין סכום דרגות החופש: *sExt*, *slnt* ו-*tRoll* לדרגת החופש של הכתף, *sExt*, ומסביר בממוצע 2% יותר בקבוצת המטופלים, 26.27% לעומת 28.48%. ברכיב השלישי אנו רואים באופן כללי מקדמים נמוכים הנמצאים בטווח בין -0.081 ל-0.041 ובממוצע רכיב זה מסביר בממוצע 8.02% בקבוצת הבקרה לעומת 6.56% בקבוצת המטופלים (מקדמי העמסה של קבוצת המטופלים מוצגים בנספח B6 בעמוד 78).

4.2.2.3 אמידת נקודת השינוי

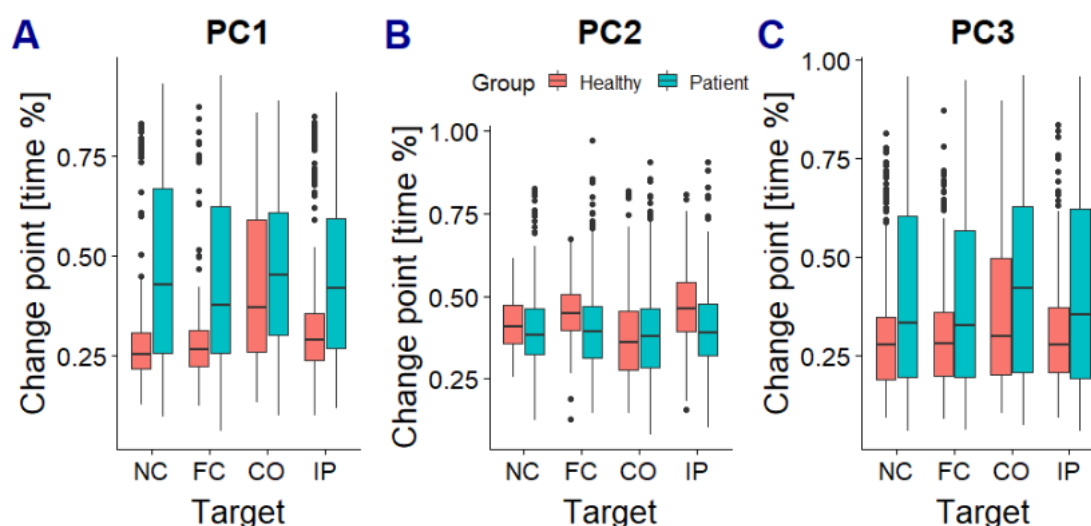
בטבלה 7 מוצגים ממוצעי וסטיות התקן של נקודות השינוי אשר מוצעו לפי מטרה לכל קבוצה. כפי שניתן לראות קיימים הבדלים בערכי הנקודות בין הקבוצות השונות. ניתן לראות כי ממוצע השינוי בקבוצת הבקרה מתרחש מאוחר יותר בגורם השני בכמעט 0.1 כאשר לקבוצת המטופלים ממוצעי נקודות השינוי שנאמדו בשלושת הגורמים הם סביב 0.4 ונראה כי ההבדל בין שלושת הרכיבים קטן יותר בקבוצה זו.

טבלה 7 - שכבה 2, ממוצעי וסטיות התקן של נקודות השינוי לפי מטרה לכל קבוצה

Stage	Target	N	PC1		PC2		PC3	
Control	NC	240	0.351	(0.035)	0.468	(0.011)	0.311	(0.021)
	FC	237	0.291	(0.015)	0.450	(0.007)	0.306	(0.022)
	CO	231	0.306	(0.030)	0.415	(0.006)	0.321	(0.029)
	IP	234	0.415	(0.035)	0.384	(0.018)	0.353	(0.034)
Patient	NC	512	0.443	(0.039)	0.403	(0.014)	0.415	(0.060)
	FC	504	0.436	(0.048)	0.405	(0.016)	0.390	(0.049)
	CO	503	0.457	(0.050)	0.398	(0.013)	0.402	(0.056)
	IP	499	0.457	(0.037)	0.386	(0.020)	0.434	(0.057)

נוסף לנתונים בטבלה 7, עולים מאיור 14 ההבדלים בין המטרות השונות כאשר בממוצע, השינוי ברכיב הראשון מתרחש מוקדם יותר בקבוצה הבקרה בכל אחת מארבע המטרות ולכל המאוחר לעבר מטרת ה-IP שבה השינוי מתקיים ב-0.415, לעומת קבוצת המטופלים שבה השינוי אינו תלוי במטרה כלל. ברכיב השני ניתן לראות תופעה הפוכה מהרכיב הראשון שכן בקבוצת המטופלים ממוצע נקודת השינוי מתרחש מוקדם יותר, 0.43 לעומת 0.39 בקבוצת הבקרה. הרכיב השלישי מראה התנהגות דומה לרכיב הראשון אך חזקה יותר, 0.33 בקבוצת הבקרה לעומת 0.42 בקבוצת המטופלים.

כמו כן, כפי שנעשה בשכבת הנתונים הגולמיים, בנוסף לסטטיסטיקה התיאורית, מתוצאות המודל הליניארי המעורב נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית של האפקטים הקבועים, קבוצות הנבדקים ($P<.001$, $F=13.08$), המטרות השונות ($P<.001$, $F=12.62$) והאינטראקציה ביניהם ($F=13.35$), כאשר במיצוע על פני המטרות לקבוצת המטופלים השינוי התרחש מאוחר יותר ב-0.109 ($P<.001$). בקבוצת המטופלים לא נמצא הבדל מובהק בין המטרות השונות. הבדלים מובהקים סטטיסטית בין קבוצות הנבדקים נמצאו בשתי המטרות רחוקות, מטרת ה-FC ומטרת ה-CO ($P<.0008$), כאשר בשתייהן השינוי בקבוצת הבקרה התרחש בממוצע מוקדם יותר. לעבר מטרת ה-FC השינוי התרחש מוקדם יותר, 0.29 מול 0.43 וכן לעבר מטרת ה-CO השינוי התרחש מוקדם יותר, 0.3 מול 0.43.



איור 14 - שכבה 2, תרשים אינטרקציה בין הקבוצה למטרה לכל רכיב

ברכיב השני נצפית מגמה הפוכה מהרכיב הראשון וכן, נמצא אפקט מובהק לקבוצה ($P < .1$, $F = 3.08$) כאשר לקבוצת המטופלים השינוי מתרחש מוקדם יותר בממוצע ב-0.036 ($P = 0.087$). בנוסף, נמצא אפקט מובהק למטרות השונות ($P < .001$, $F = 21.34$) וגם האינטראקציה עם הקבוצה נמצאה מובהקת ($P < .001$, $F = 13.32$) כאשר ההבדל הגדול ביותר שנמצא בין הקבוצות הינו במטרה הקרובה, מטרת ה-NC ($P = 0.048$) ובו למטופלים שינוי מוקדם יותר, 0.46 מול 0.4. ברכיב השלישי נמצאו אפקטים מובהקים של קבוצות הנבדקים ($P < .001$, $F = 12.12$) והמטרות השונות ($F = 6.47$, $P < .001$) וניתן להבחין במגמה דומה לרכיב הראשון, כאשר לקבוצת המטופלים נקודת שינוי מוקדמת יותר ב 0.092 ($P = 0.0012$) וההבדל המובהק היחיד שנמצא הינו בכל תוך-קבוצתי המבדיל את המטרה הקרובה מיתר המטרות (פירוט כלל מבחני Post-Hoc מפורטים בנספח B7).

4.3 מדדי התנועה

מטרת מדדי התנועה הינה לבחון הן את ביצוע המשימה והן את טיב התנועה תוך התמקדות בתנועות הפיזיו המעורבות בתנועה אם בכלל קיימות תנועות אלו. ביצועי משימת ההושטה-תפיסה של הנבדקים מקבוצת המטופלים ארוכים יותר, פחות תבניתיים, פחות חלקים וכן ניכר השימוש בתנועות הפיזיו בהשוואה לתנועת הבקרה. כמו כן, נפסלו לקבוצת הבקרה 6.5% ולקבוצת המטופלים 28% מהחזרות שבוצעו ולפיכך ניתן להסיק כי שיעורי ההצלחה בקרב המטופלים נמוך יותר. נרצה לבחון את המשתנים אשר יסייעו לנו במענה על השערות המחקר. לפיכך, נשווה את משך התנועה של הנבדקים, אינדקס העקמומיות המבטא כמה התנועה חלקה, את מהירות תנועת הקצה, אורכי הנתיב של איברי הפיזיו הכוללים הן את המרפק ואת את הגו, המבטאים את כמות השימוש בהם והמנחים הסופיים של הנבדקים.

4.3.1 התנועה המלאה

בטבלה 9 מוצגים ממוצעי וסטיות התקן של ממדי התנועה במיצוע לפי מטרה לכל קבוצת נבדקים. מודל LMM (משוואה 7) הותאם לכל מדד וכלל כאפקטים עיקריים את קבוצת הנבדק, המטרה ואת האינטראקציה ביניהם. בנוסף, כאפקטים אקראיים את המדינה והנבדק עצמו לבחינת ההבדלים בין תנועת הנבדקים בקבוצות השונות וכן באסטרטגיה השונה שבוצעה לעבר המטרות השונות כפי שהוסבר בפרק 3.5.

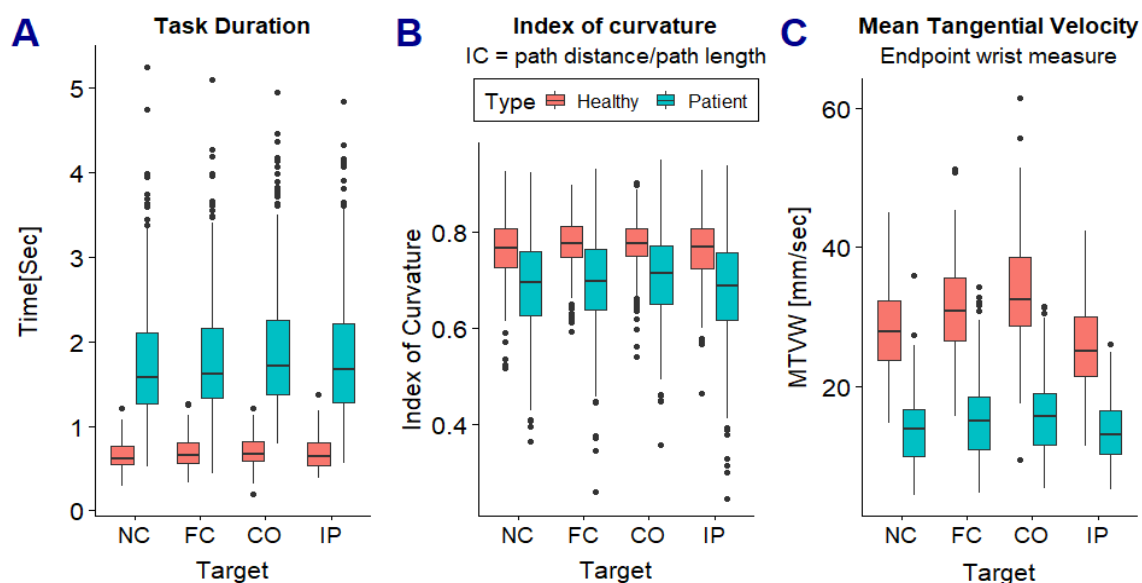
טבלה 8 - סיכום ממדי התנועה בחלוקה של הקבוצות למטרות בשונות

Subject Group	Healthy				Patients			
	NC target	FC target	CO target	IP target	NC target	FC target	CO target	IP target
Mean (SD)								
Time	0.65 (0.14)	0.68 (0.15)	0.70 (0.15)	0.67 (0.16)	1.71 (0.51)	1.77 (0.56)	1.897 (0.60)	1.757 (0.57)
Peak velocity	53.55 (15.40)	55.93 (12.74)	60.2 (15.94)	49.7 (11.75)	29.65 (8.35)	33.64 (10.81)	35.31 (10.96)	29.86 (8.96)
Mean velocity	28.02 (5.83)	30.91 (5.79)	33.2 (6.53)	25.34 (5.50)	13.8 (4.32)	15.71 (4.89)	16.33 (5.02)	13.62 (3.95)
wIC	0.76 (0.06)	0.77 (0.048)	0.77 (0.05)	0.76 (0.06)	0.69 (0.08)	0.69 (0.08)	0.70 (0.07)	0.67 (0.09)
tRPL	5.07 (2.56)	6.45 (3.12)	9.11 (4.25)	4.47 (2.11)	18.08 (8.70)	22.23 (9.03)	26.18 (11.34)	17.78 (10.97)
tRFA	2.44 (1.43)	3.84 (1.79)	7.34 (3.49)	-0.07 (0.98)	-0.72 (13.05)	-0.71 (15.52)	-1.2 (21.98)	-1.91 (11.09)
tPPL	2.87 (1.33)	3.41 (1.63)	4.05 (1.85)	2.65 (1.02)	13.24 (8.42)	16.15 (9.56)	17.42 (11.6)	15.25 (9.83)
tPFA	-0.10 (1.13)	0.42 (1.43)	0.01 (2.02)	0.52 (0.83)	-0.98 (7.91)	3.06 (8.78)	2.34 (10.20)	2.97 (8.26)
tYPL	3.43 (1.45)	3.73 (1.34)	4.38 (1.34)	2.76 (1.37)	12.27 (7.72)	14.0 (7.91)	15.78 (9.42)	13.28 (8.99)
tYFA	1.07 (0.89)	0.88 (1.11)	0.93 (1.36)	0.54 (1.03)	0.08 (6.30)	-0.03 (6.19)	0.53 (6.57)	-0.42 (6.37)
tFDPL	0.83 (0.42)	1.00 (0.50)	1.04 (0.49)	0.81 (0.38)	5.90 (5.39)	8.45 (6.50)	8.13 (6.49)	8.05 (7.10)
paPL	19.83 (6.76)	21.69 (6.50)	20.63 (6.28)	26.5 (7.74)	31.33 (13.67)	34.57 (13.02)	35.15 (14.13)	37.27 (16.39)
paFA	105.44 (8.68)	106.89 (8.61)	104.73 (7.50)	115.4 (10.51)	91.15 (23.31)	90.45 (28.24)	90.25 (27.17)	90.38 (32.24)
paNPTV	1.45 (0.35)	1.92 (0.68)	1.78 (0.55)	1.25 (0.57)	4.33 (2.65)	4.56 (2.88)	4.74 (2.89)	4.21 (2.67)

4.3.1.1 ממדי-קצה התנועה

במשתנה משך התנועה של הנבדקים (איור 15.A) נמצאו אפקטים מובהקים סטטיסטית לגורם הקבוצה ($P<.001$, $F=76.54$), גורם המטרה ($P<.001$, $F=18.48$) ולאינטראקציה ביניהם ($P<.01$, $F=3.45$). לנבדקים מקבוצת המטופלים נמצא משך תנועה ארוך יותר מהנבדקים מקבוצת

הבקרה, 1.75 שניות לעומת 0.685 שניות בממוצע. בקבוצת המטופלים משך התנועה הארוך ביותר נצפה לעבר מטרת ה-CO (1.897 שניות) בעוד ההבדל בינה לבין מטרת ה-NC הינו 0.092 שניות ($P<.0001$), כאשר הבדל זה בקבוצת הבקרה עומד על 0.072 שניות ($P<.0001$) בעוד לעבר מטרת ה-CO ביצעו הנבדקים את המשימה ב-0.70 שניות. מהירות תנועת הקצה (איור 15.C) של הנבדקים המכומתת בתנועת שורש כף היד, קשורה באופן ישיר למשך התנועה ונמצאה נמוכה יותר בארבע המטרות בקרב הנבדקים מקבוצת המטופלים. נמצאו הבדלים מובהקים בקבוצה ($F=103.38$, $P<.001$), במטרה ($F=312.88$, $P<.001$) ובאינטראקציה ביניהם ($F=120.82$, $P<.001$). המהירות הממוצעת בקרב קבוצה הבקרה עומדת על 30 מ"מ לשנייה לעומת 14 מ"מ לשנייה, בקבוצת המטופלים בעוד בקבוצת הבקרה ניתן לראות כי המהירות הגבוהה ביותר מבוצעת בהושטה לעבר המטרה ה-CO (33.2 מ"מ לשנייה) בעוד בקבוצת המטופלים אין הבדל במהירויות הביצוע בין המטרות השונות.



איור 15 – תרשימי קופסא (boxplot) עבור משך התנועה, אינדקס העקמומיות והמהירות הממוצעת. (A) משך התנועה; (B) אינדקס העקמומיות; (C) המהירות הממוצעת של תנועת הקצה, מפרק שורש כף היד.

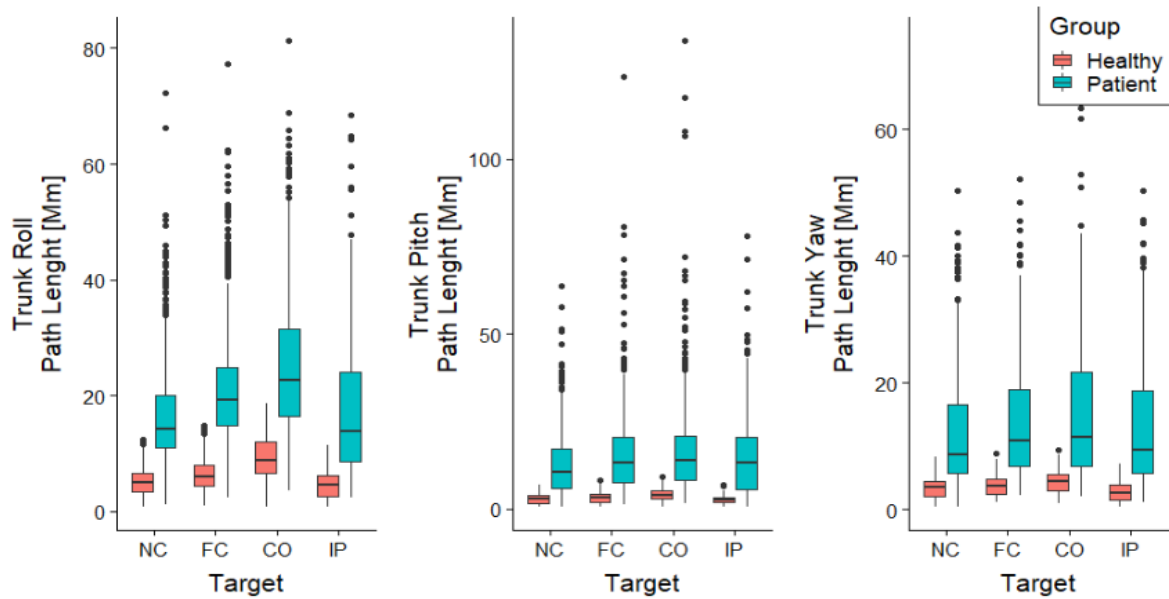
את חלקות התנועה (smooth of movement) אפיינו במספר משתנים, אינדקס העקמומיות (IC), (איור 15.B) המבטא את מידת אופטימליות המסלול כאשר ערכו שואף ל-1 מתבצעת התנועה במסלול האופטימלי, ומשתני מספר שינויי הכיוון של מפרק שורש כף היד ושל מישור היד. מתוצאות אינדקס העקמומיות והתאמת המודל, עולה מובהקות הקבוצה ($F=14.6$, $P<.01$), המטרה ($F=15.9$, $P<.001$) והאינטראקציה ביניהם ($F=3.19$, $P<.05$). לנבדקים מקבוצת המטופלים נמצאה תוצאת IC נמוכה יותר בכל המטרות.

במשתנה NPTV המציג את מספר שינויי הכיוון של מסלול מישור היד נמצאה מובהקות בוגרם הקבוצה ($F=12.79$, $P<.001$) ובוגרם המטרה ($F=12.12$, $P<.001$). כפי שניתן לראות באיור 15.C בקרב קבוצת המטופלים מספר זה גבוה יותר לעבר ארבע המטרות מה שמאפיין תנועה פחות חלקה, או במילים אחרות תנועה מקוטעת. במיצוע על פני ארבעת המטרות הפער בין הקבוצות במספר זה

עמד על 1.73 ($P=0.0014$), 4.6 בממוצע בקבוצת המטופלים מול 1.4 בממוצע בקבוצת הבקרה, בעוד בהשוואת כל אחת מהמטרות נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית גם כן. כמו כן, לעבר מטרות ה-*CO* בקבוצת המטופלים נצפה הערך הגבוה ביותר 4.74 ($SD=2.56$) מול 1.78 ($SD=0.55$) בקבוצת הבקרה וכן לעבר מטרות ה-*IP* נצפה הערך הנמוך ביותר 4.21 ($SD=2.67$) מול 1.25 ($SD=0.57$).

4.3.1.2 תנועות הפיזיו

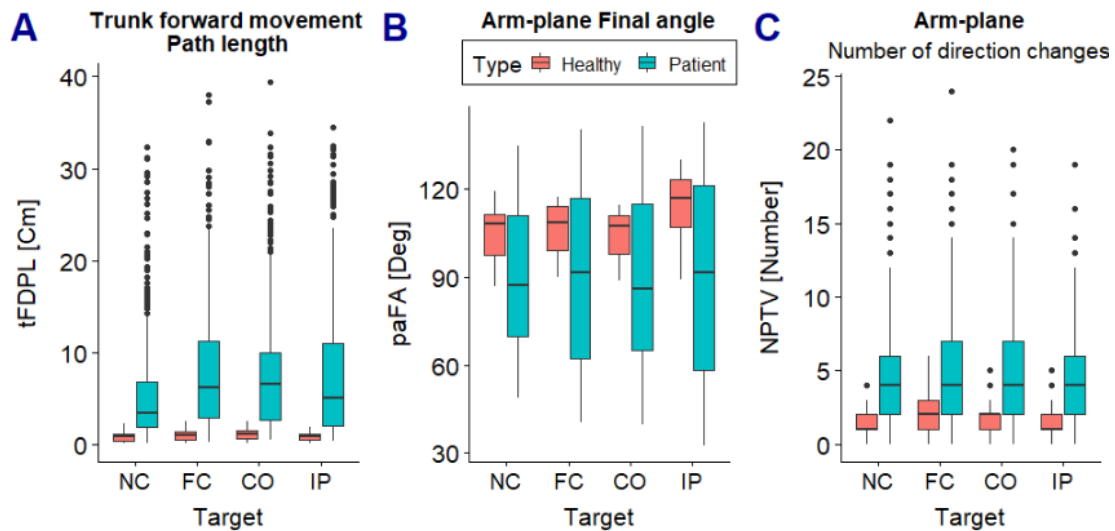
אזכיר כי כחלק מתנועות הפיזיו נעשה שימוש הן בתנועות המרפק והן בתנועות הגב והינן מאופיינות בחמשת מסלולי התנועה הכוללים את שלוש רוטציות הגו, תנועתנו קדימה ואת הזווית בין מישור היד לגו. מדדי התנועה של תנועות הפיזיו חושבו עבור חמשת מסלולים אלה. לאורך הנתיב של רוטציית הרחל של הגו (איור A.16, *tRPL*) נמצאה מובהקת סטטיסטית של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.001$, $F=49.77$), המטרה ($P<.001$, $F=252.51$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=16.02$). ללא תלות במטרה נמצא כי קבוצת המטופלים ביצעה שימוש גדול יותר בסיבוב זה ובממוצע ב-9.55 מ"מ ($P=0.001$) יותר. מבחני פוסט-הוק לבחינת ההבדלים בביצועי הקבוצות ביחס למטרות השונות נמצא כי הפער הגדול ביותר לעבר מטרות ה-*CO* שנאמד ב-16.6 מ"מ ($P=0.001$) כאשר ההבדל לעבר מטרות ה-*NC* נאמד ב-12.94 מ"מ ($P=0.004$). אולם, למרות שבקרב קבוצת המטופלים ניכר שימוש רב יותר, עולה כי מגמת השימוש בין המטרות השונות דומה בין הקבוצות. לאורך הנתיב של הסיבוב הקדמי (איור B.16, *tPPL*) נמצאה גם כן מובהקות של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.01$, $F=35.33$), המטרה ($P<.001$, $F=33.39$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=6.94$) וללא תלות במטרה נמצא גם כן כי קבוצת המטופלים ביצעה שימוש גדול יותר בסיבוב זה ובממוצע ב-6.71 מ"מ ($P=0.017$) יותר. הפער הגדול ביותר בין הקבוצות נצפה לעבר מטרות ה-*CO* ועומד על 7.81 מ"מ ($P=0.006$) בעוד לעבר מטרות ה-*NC* הפער נאמד ב-4.74 מ"מ ($P=0.09$). אולם, גם במשתנה זה נמצאה מגמה דומה בין המטרות. גם לרוטציית הגו האחרונה, הסיבוב הצירי (איור C.16, *tYPL*) נמצאה מובהקות של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.01$, $F=37.94$), המטרה ($F=59.76$), והאינטראקציה ($P<.001$, $F=11.43$). הממצאים עבור מדד זה דומים במאפייניהם לשני המדדים הקודמים כאשר ללא תלות במטרה ביצעו הנבדקים מקבוצת המטופלים שימוש גדול יותר בסיבוב זה 6 מ"מ בממוצע ($P=0.008$) וכן, הפער הגדול ביותר התבצע לעבר מטרות ה-*CO* ונאמד ב-7.15 מ"מ ($P=0.002$) והפער הנמוך יותר התבצע לעבר מטרות ה-*NC* ונאמד ב-4.53 מ"מ ($P=0.04$).



איור 16 - תרשימי קופסא (boxplot) של אורכי הנתיב של רוטציות הגו

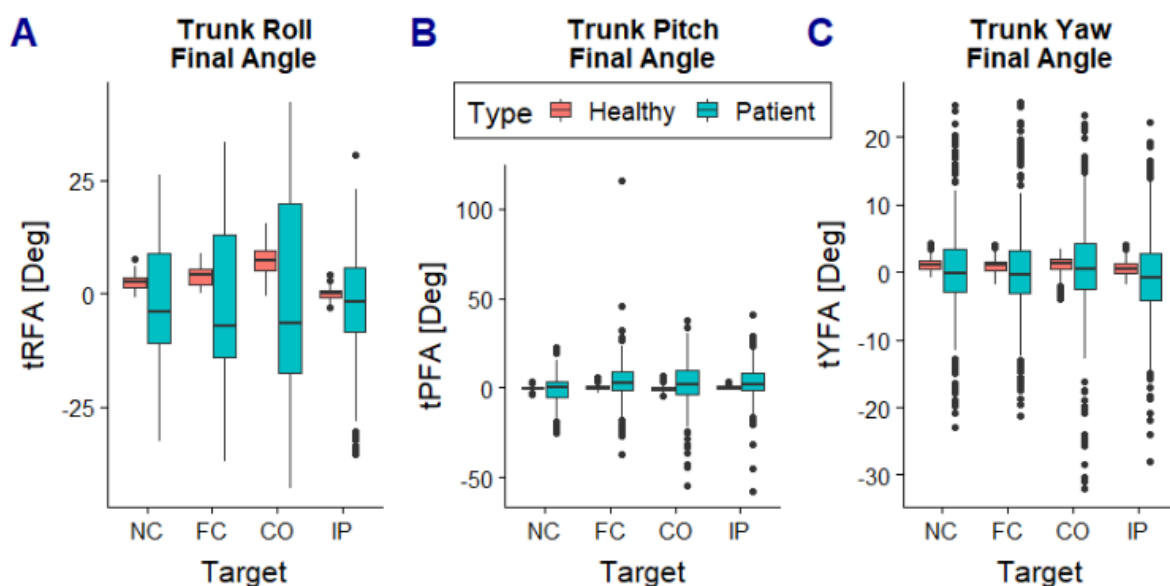
בהתאמת המודל לאורך הנתיב של תנועת הגו קדימה (איור A.17, $tFDPL$), נמצאה מובהקות סטטיסטית של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.01$, $F=20.28$), המטרה ($P<.001$, $F=78.46$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=31.05$). גם במשתנה זה נמצא כי קבוצת המטופלים ביצעו שימוש רב יותר ללא תלות במטרה שנאמד ב- 5.3 ס"מ ($P=0.009$) אך הפער הגדול ביותר בין הקבוצות נמצא לעבר מטרת ה-FC ונאמד ב- 6.01 ס"מ ($P=0.003$) כאשר לעבר מטרת ה-NC ההבדל עומד על- 3.69 ס"מ ($P=0.06$). במדד אורך הנתיב של זווית מישור היד המבטא את תנועת המרפק, נמצאה גם מובהקות של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.05$, $F=12.86$), המטרה ($P<.001$, $F=70.33$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=8.95$). למרות שלעבר כלל המטרות ביצעו הנבדקים מקבוצת המטופלים שימוש ניכר יותר במרפק אשר בממוצע נאמד ב- 8.72 מ"מ, הפערים בין המטרות הם כך שהפער הגדול ביותר הוא למטרה ה-CO ונאמד ב- 11.04 מ"מ ($P=0.02$) אך הפער הקטן ביותר אך אינו מובהק הינו לעבר מטרת ה-IP ונאמד ב- 6.94 מ"מ.

המנח הסופי של הנבדק מורכב מהמנח הסופי של מכלול דרגות החופש המעורבות בתנועה ולכן בבחינת הזווית הסופית בין מישור היד לגו (איור B.17, $paFA$) נקבל אינדיקציה למיקום המרפק בסוף התנועה. מהתאמת המודל למדד זה נמצאה מובהקות של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.1$, $F=22.46$), המטרה ($P<.001$, $F=43.72$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=118.40$). ניכר כי בקרב קבוצת המטופלים טווח הזוויות הסופיות שנרשם היה רחב יותר דבר המתבטא בשינוי גדול יותר, אך עולה כי הזוויות הסופיות קטנות יותר במיצוע על פני ארבעת המטרות בהשוואה לקבוצת הבקרה ב- 7.7 מעלות. כמו כן, פער הזוויות הגדול ביותר נצפה לעבר מטרת ה-NC ועומד על הפרש של 11.17 מעלות ($P=0.02$) וכן, הפער הקטן ביותר נצפה לעבר מטרת ה-IP ונאמד ב- 0.3 מעלות.



איור 17 - תרשימי קופסא (boxplot) עבור אורך נתיב תנועת הגו, הזווית הסופית של מישור היד ומספר שינויי כיוון

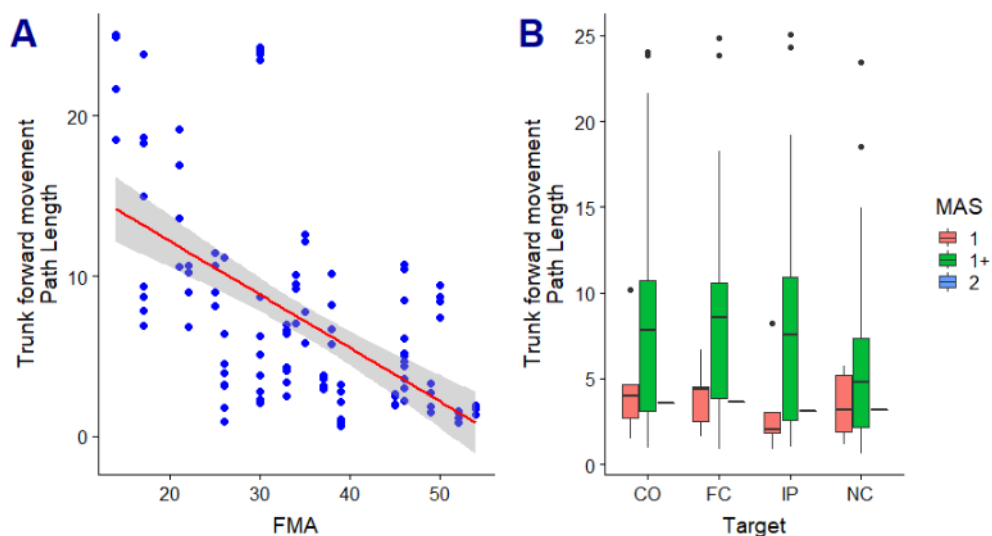
בהתאמת המודל לזווית הסופית של רוטציית הרול של הגו (איור A.18, $tRFA$), נמצאה מובהקות של שלושת האפקטים: הקבוצה ($P<.001$, $F=9.70$), המטרה ($P<.001$, $F=23.72$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=34.56$). עולה כי למרות שלקבוצת המטופלים טווח הזוויות היה רחב יותר, במיצוע על פני ארבעת המטרות נמצאה זווית קטנה יותר בהשוואה לקבוצת הבקרה ב- 8.71 מעלות. כמו כן, פער הזוויות הגדול ביותר נצפה לעבר מטרת ה-IP ועומד על הפרש של 11.55 מעלות ($P<.0001$) וכן, הבדלים מובהקים נמצאו במטרת ה-FC (8.54 מעלות הפרש, $P=0.001$) ובמטרת ה-NC (10.15 מעלות הפרש, $P<.0001$) וכן הפער הקטן ביותר נצפה לעבר מטרת ה-CO ונאמד ב-4.6 מעלות. לזווית הסופית של רוטציית הסיבוב הקידמי של הגו (איור B.18, $tPFA$), נמצאה מובהקות של המטרה ($P<.001$, $F=48.32$) והאינטראקציה ($P<.001$, $F=15.51$) בלבד. עולה כי בקרב קבוצת הבקרה הזווית הסופית כמעט 0 ללא תלות במטרה. כמו כן, פער הזוויות הגדול ביותר נצפה לעבר מטרת ה-FC ועומד על הפרש של 3.54 מעלות. כמו כן, לזווית הסופית של רוטציית הסיבוב הצירי של הגו (איור C.18, $tYFA$), נמצאה מובהקות של הקבוצה ($P<.05$, $F=0.35$) והמטרה ($P<.001$, $F=8.36$) בלבד וגם ברטציה זו עולה כי בקרב קבוצת הבקרה ללא תלות במטרה הזווית הסופית שואפת ל-0. כמו כן, פער הזוויות הגדול ביותר נצפה לעבר מטרת ה-IP ועומד על הפרש של 4.18 מעלות ($P=0.03$) כאשר הפער הקטן ביותר נצפה לעבר מטרת ה-CO ועומד על 3.5 מעלות ($P=0.06$). ההשוואות עבור כל מדדי התנועה הן בין המטרה האמצעית הקרובה לאמצעית הרחוקה והן בין המטרות הרחוקות מפורטות בנספחים C1-C2 בעמודים 85-86).



איור 18 - תרשימי קופסא (boxplot) עבור הזוויות הסופיות של רוטציות הג

4.3.2 תאימות מול מדדי הערכת תנועה וספסטיות

בדיקת תאימות בוצעה על חלק מהממדים לצורך וידוא ההשערה שביצוע תנועות הפיצוי מתבצע יותר כאשר קיימת ספסטיות גבוהה. כפי שהוזכר בסקר ספרות במחקר זה ייעשה שימוש בשני מדדים, במדד ה-FMA שהינו מדד להערכת התפקוד המוטורי ובעל סקאלה הפוכה כאשר תוצאה נמוכה מצביעה על ליקוי גבוה וכן במדד ה-MAS להערכת מידת הספסטיות של המרפק. כפי שניתן לראות באיור A.19, ישנה קורלציה שלילית בין תנועת הגו ומדד ה-FMA, מה שתומך בהשערת המחקר שכל הליקוי המוטורי גבוה יותר נצפה לראות שימוש גדול יותר בתנועות הפיצוי. בנוסף, מאיור B.19 נראה כי לנבדקים בעלי תוצאת ה-MAS הגבוהה, המצביעה על ספסטיות גבוהה יותר, יש שימוש גדול יותר בגו וכי שונות השימוש גדלה ככל שליקוי גדול יותר, כל זאת ללא תלות במטרה אליה מבוצעת פעולת ההושטה-תפיסה.



איור 19 - תאימות השימוש בגו מול מדדי הספסטיות

4.3.3 התנועה המחולקת

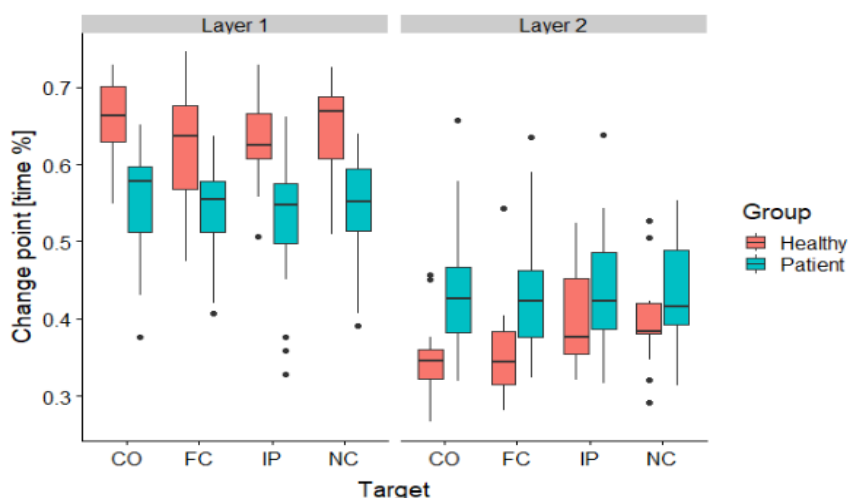
4.3.3.1 ערכי נקודות השינוי בשכבות הנתונים

נקודות השינוי שנאמדו באמצעות התאמת מודל הרגרסיה למקוטעין יצרו למעשה מצב שבו לכל חזרה חושבו שלוש נקודות שינוי, אחת מכל רכיב PC ולכן נקודות אלה מוצעו על פני ארבע המטרות עבור כל נבדק בהתאם לאחוז השונות המוסברת לצורך קבלת נקודת שינוי יחידה לכל מטרה. בטבלה 10 ובאיור 20 מוצגים ממוצעי וסטיות התקן של נקודות השינוי אשר מוצעו על פני ארבע המטרות עבור כל קבוצת נבדקים לכל שכבת נתונים בנפרד, שכבת הנתונים הגולמיים ושכבת דרגות החופש. בערכי נקודות השינוי נמצאו הבדלים ניכרים הן ביחס לשכבת הנתונים והן ביחס לקבוצת הנבדקים. אולם, ההבדלים שנמצאו בין המטרות בתוך כל קבוצה קטנים יותר.

טבלה 9 - סיכום ערכי נקודות השינוי בשתי שכבות הנקודות

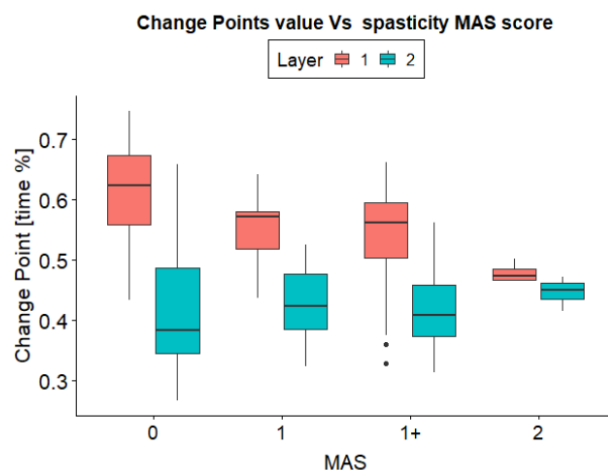
Group	Target	Layer 1	Layer 2
Healthy	NC	0.646 (0.0667)	0.398 (0.0647)
	FC	0.624 (0.0831)	0.356 (0.0692)
	CO	0.648 (0.062)	0.35 (0.0565)
	IP	0.63 (0.0569)	0.408 (0.0689)
Patients	NC	0.543 (0.0671)	0.432 (0.0641)
	FC	0.542 (0.0618)	0.431 (0.0777)
	CO	0.553 (0.0701)	0.437 (0.0784)
	IP	0.529 (0.0752)	0.437 (0.0757)

מודל ליניארי מעורב (LMM) הכולל כאפקטים עיקריים את קבוצת הנבדק, המטרה ואת האינטראקציה ביניהם וכאפקט אקראי את הנבדק, הותאם לכל שכבת נתונים לצורך בחינת ערכי הנקודות הסופיות. קבוצת הנבדק נמצאה מובהקת (שכבת הנתונים הגולמיים: $P < 0.001$, $F = 34.29$; שכבת דרגות החופש $P < 0.05$, $F = 12.79$) בשתי שכבות הנתונים כאשר המטרה והאינטראקציה עם הקבוצה נמצאה מובהקת רק בשכבת דרגות החופש ($P < 0.1$, $F = 2.2$; $P < 0.01$, $F = 0.002$ בהתאמה).



איור 20 - תרשים אינטראקציה בין קבוצת הנבדק ושכבת הנתונים עבור נקודות השינוי

בנוסף, הותאם מודל לינארי מעורב הבוחן את השפעת מידת הספסטיות על ערך נקודת השינוי המכיל כאפקט עיקרי משתנה עבור שכבת הנתונים (פקטור עם שתי רמות 1,2), את מדד ה-MAS כמשתנה המבטא את הספסטיות (פקטור בעל 4 רמות 0, 1, +1, 2) ואת האינטראקציה ביניהם. איור 21 מדגיש את הקשר שכלל שתוצאת ה-MAS גבוהה יותר כך הפער בין נקודות השינוי בשכבות הנתונים מצטמצם מה שנתמך באינטראקציה מובהקת ($P < .001$, $F = 31.96$). נקודות השינוי בכל שכבה שונות כאשר הן מבטאות את נקודת הזמן בה התרחש שינוי בתנועה או במפרקים המעורבים בתנועה כאשר נקודת השינוי אמורה לבטא את החלוקה לשתי תתי תנועות כאשר בראשונה הנבדק מרים את המרפק ואילו בשנייה מיישר אותו לעבר המטרה. נבדק עם תוצאות MAS גבוהה, קרי ספסטיות ברמה גבוהה יותר ולכן מוגבלות גבוהה יותר בתנועה, מאופיינים בטווח תנועה מוגבל מה שמאמת תוצאות אלו. בעוד ההיפותזה במחקר עוסקת בדמיון ובהבדלים בביצועי הנבדקים בכל אחת מתתי התנועות, מדדי התנועה כפי שחושבו לתנועה המלאה חושבו לכל תת תנועה וייסקרו בפרק הבא.



איור 21 - תרשים אינטראקציה בין שכבת הנתונים למדד ה-MAS לנקודות השינוי

4.3.3.2 מדדי התנועה בשני תתי-התנועות

בטבלה 11 מוצגים ממוצעי וסטיות התקן של מדדי התנועה הנבחרים עבור שתי תתי התנועות לצורך בחינת התנועה של קבוצת המטופלים ביחס לקבוצת הבקרה תוך בחינת השערות המחקר בנושא זה. מודל LMM (משוואה 8) הותאם לכל מדד וכלל כאפקטים עיקריים את קבוצת הנבדק, החלק בתנועה, המטרה והאינטראקציות הזוגיות והמשולשת ביניהם. בנוסף, כאפקטים אקראיים את המדינה והנבדק עצמו.

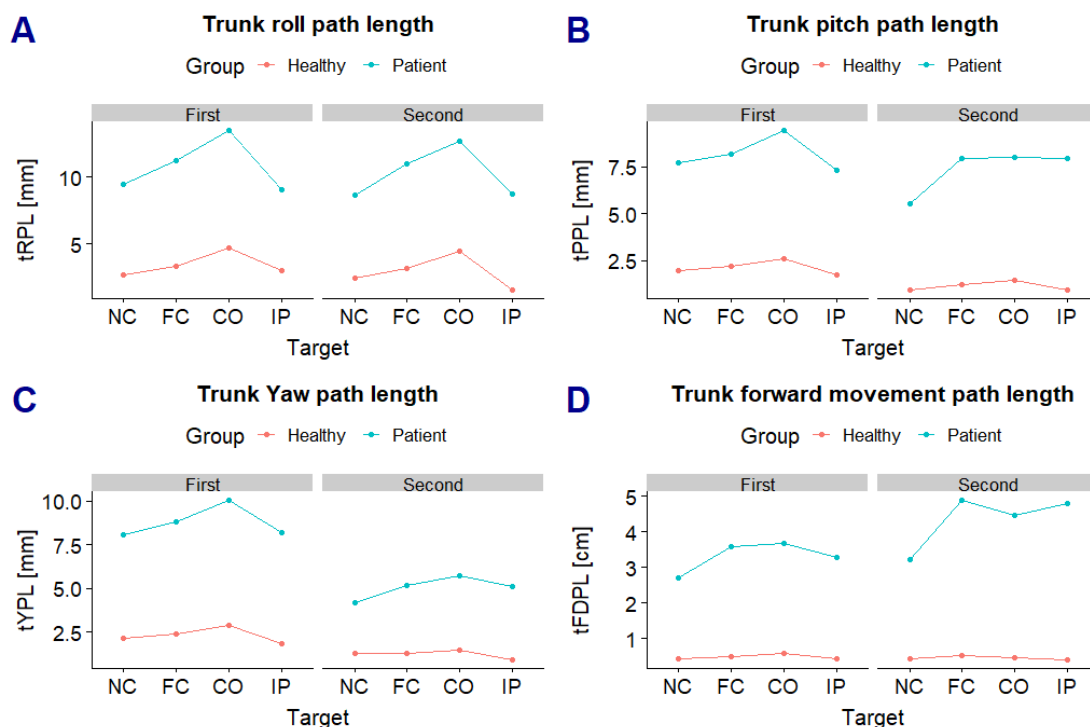
Group	Healthy				Patients			
Separation Method	Layer 1		Layer 2		Layer 1		Layer 2	
Part in motion	1 st Part	2 nd part	1 st Part	2 nd part	1 st Part	2 nd part	1 st Part	2 nd part
tRPL	3.403 (2.568)	2.874 (2.117)	1.476 (0.806)	4.801 (3.33)	10.797 (5.935)	10.273 (6.14)	8.081 (5.941)	12.989 (6.004)
tRFA	3.39 (3.416)	0.629 (2.429)	3.390 (3.416)	-0.941 (1.115)	-1.1381 (15.77)	-0.898 (8.446)	-1.138 (15.77)	-0.883 (6.352)
tPPL	2.122 (1.16)	1.125 (0.586)	1.121 (0.546)	2.127 (1.205)	8.164 (5.466)	7.353 (5.857)	6.697 (5.165)	8.819 (6.414)
tPFA	0.216 (1.407)	-0.359 (0.991)	0.216 (1.407)	-0.095 (0.665)	1.848 (8.888)	-3.231 (6.331)	1.848 (8.888)	-3.418 (5.55)
tYPL	2.335 (1.216)	1.245 (0.788)	1.203 (0.566)	2.377 (1.158)	8.784 (5.515)	5.051 (3.732)	7.521 (5.348)	6.314 (4.514)
tYFA	0.861 (1.098)	-0.029 (1.035)	0.861 (1.098)	-0.534 (0.551)	0.041 (6.296)	0.167 (7.399)	0.0411 (6.296)	0.408 (7.703)
tFDPL	0.478 (0.281)	0.448 (0.253)	0.226 (0.126)	0.7 (0.385)	3.304 (3.284)	4.333 (4.212)	2.692 (3.227)	4.945 (4.144)
paxPL	18.9 (6.608)	3.274 (2.149)	15.259 (6.205)	6.915 (2.805)	25.346 (11.843)	9.233 (6.545)	21.989 (9.632)	12.59 (7.436)
paxFA	108.116 (9.65)	110.616 (8.725)	108.116 (9.65)	109.910 (8.195)	90.558 (27.6)	90.232 (27.13)	90.558 (27.6)	89.285 (25.423)
paxNPTV	0.886 (0.479)	0.553 (0.3127)	0.312 (0.285)	1.142 (0.444)	2.177 (1.429)	2.118 (1.413)	1.84 (1.468)	2.486 (1.464)

4.3.3.2.1 שכבת הנתונים הגולמיים

ברוטציית הרול של הגו ($tRPL$) נמצאה השפעה מובהקת של גורם הקבוצה ($P<.001$, $F=72.78$) ושל גורם המטרה ($P<.001$, $F=24.21$). בשתי קבוצות הנבדקים ניכר שימוש דומה ברוטציה זו בין חלקי התנועה אשר מתבטא באורך נתיב גדול יותר בקבוצת המטופלים, 10.5 מ"מ מול 3 מ"מ. מבחני פוסט-הוק מעריכים כי אורך הנתיב של קבוצת המטופלים גדול יותר ב- 5.1 מ"מ ($P<.0001$) בתת התנועה הראשונה וב- 5.1 מ"מ בתת התנועה השנייה ($P<.0001$). כפי שניתן לראות באיור A.22, המציג את תרשימים האינטראקציה ניכרת מגמת שימוש דומה לעבר המטרות השונות בקרב כל קבוצה בין חלקי התנועה.

ברוטציה הקדמית של הגו ($tPPL$) נמצאה השפעה מובהקת של גורם הקבוצה ($P<.001$, $F=26.59$), גורם המטרה ($P<.001$, $F=5.97$) ושל גורם החלק בתנועה ($P<.01$, $F=9.14$). כמו כן, השפעה מובהקת סטטיסטית נמצאה גם באינטראקציה בין גורם המטרה לגורם החלק של התנועה ($F=2.51$, $P<.1$). גם ברוטציה זו לא נמצאה בקרב קבוצת המטופלים תנועה דומה לתנועת קבוצת הבקרה ומבחני פוסט-הוק מצאו כי אורך הנתיב של הסיבוב הקדמי גדול ב-3.62 מ"מ ($P=0.0004$) בתת התנועה הראשונה וב-3.81 מ"מ בתת התנועה השנייה ($P=0.0002$). בנוסף, הנבדקים מקבוצת

המטופלים ביצעו שימוש קטן יותר בסיבוב בתת התנועה השנייה ($P=0.09$) לעומת החלק הראשון. גם כאן ניכרת מגמה דומה לזו של רוטציית הרול, השימוש של סיבוב זה דומה לעבר המטרות השונות בקרב כל קבוצה בין חלקי התנועה. דמיון זה מודגש יותר בקרב קבוצת הבקרה בעוד ההבדלים בשימוש בין המטרות השונות בחלקי התנועה עומדים על כ-1 מ"מ, בעוד לעבר מטרת ה- CO נצפה השימוש הגדול ביותר, 2.62 מ"מ בחלק הראשון של התנועה לעומת 1.43 בחלקה השני ואילו למטרת ה- IP נצפה השימוש הנמוך ביותר, 1.75 מ"מ לעומת 0.91 מ"מ. לעומת זאת, בקבוצת המטופלים נראה כי בחלקה הראשון של התנועה השימוש הגדול ביותר בסיבוב זה נעשה לעבר מטרת ה- CO , 9.45 מ"מ לעומת 7.98 מ"מ, בחלקה הראשון של התנועה נראה שימוש נמוך לעבר מטרת ה- IP , 7.32 מ"מ, בעוד בחלקה השני של התנועה נראה שימוש נמוך לעבר מטרת ה- NC , 5.55 מ"מ, ואילו בשאר המטרות שימוש זהה העומד על כ-7.96 מ"מ.



איור 22 - התנועה המחולקת משכבה 1, אורכי נתיב מסלולי הגו

גם לאורך הנתיב של הסיבוב הצירי של הגו ($tYPL$) נמצאה השפעה מובהקת של גורם הקבוצה ($P<0.001$, $F=20.74$), גורם המטרה ($P<0.001$, $F=7.79$) ושל גורם החלק בתנועה ($F=188.05$), כמו כן, השפעה מובהקת סטטיסטית נמצאה גם באינטראקציה בין גורם הקבוצה לגורם חלק בתנועה ($P<0.001$, $F=30.61$). כפי שמשקף באיור C.22, קבוצת המטופלים ביצעה שימוש גדול יותר ברוטציה זו מקבוצת הבקרה בחלקה הראשון אך בחלקה השני של התנועה נראה פערי השימוש מצטמצמים. בתת התנועה הראשונה הפרש זה נאמד ב-4.39 מ"מ ($P<0.0001$) ואילו בתת התנועה השנייה ב-1.75 מ"מ בלבד אך למרות הבדלי הביצועים הבדל זה אינו מובהק. בחלקה הראשון של התנועה נראה שימוש גבוה ברוטציה זו בקרב קבוצת המטופלים בהשוואה לקבוצת הבקרה, בחלקו הראשון של התנועה 10.07 מ"מ מול 2.91 מ"מ ואילו בחלקה השני של התנועה

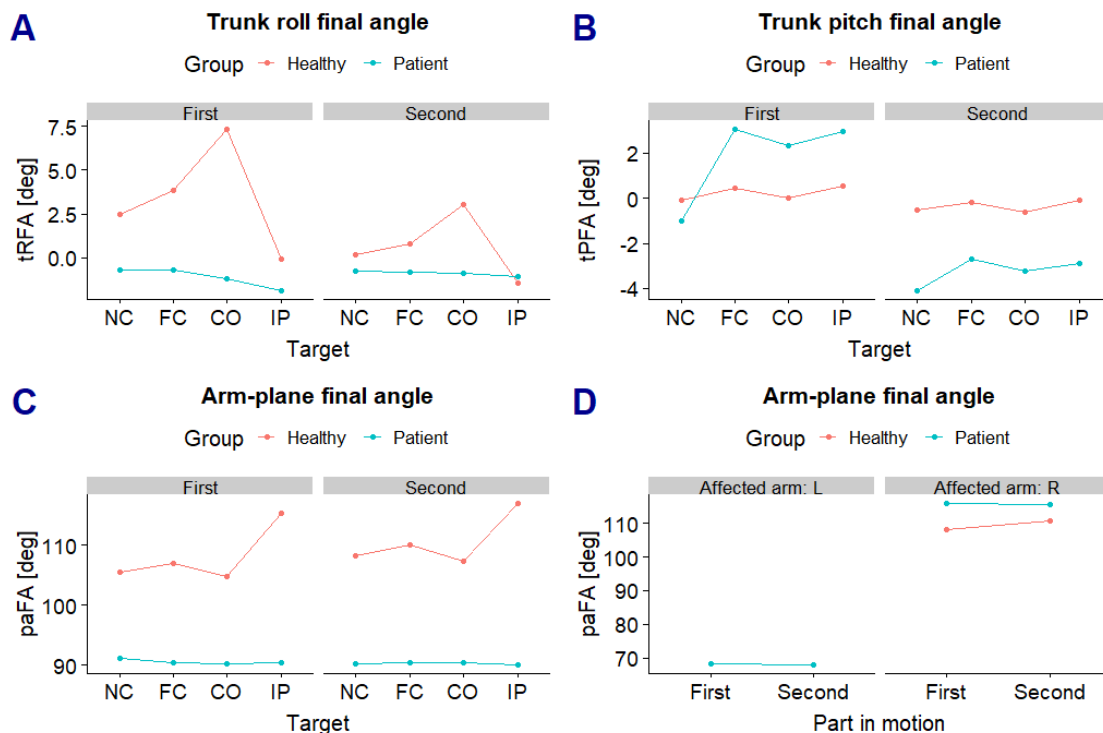
5.72 מ"מ מול 1.48 מ"מ. גם כאן ניכרת מגמה דומה לזו של רוטציית הרול, השימוש של סיבוב זה דומה לעבר המטרות השונות בקרב כל קבוצה בין חלקי התנועה. דמיון זה מודגש יותר בקרב קבוצת הבקרה בעוד ההבדלים בשימוש בין המטרות השונות בחלקי התנועה עומדים על כ-1.2 מ"מ, במטרת ה-NC 2.17 מ"מ בחלקה הראשון של התנועה מול 1.27 מ"מ בחלקה השני ולמטרת ה-IP נצפה השימוש הנמוך ביותר, 1.86 מ"מ לעומת 0.91 מ"מ לפיכך מובהקות האינטראקציה מאששת את המגמה דמיון זה בין חלקי התנועה.

תנועת הגו קדימה בתנועה המלאה נמצאה גבוהה בקרב המטופלים וגם בתנועה המחולקת נמצא שימוש גדול יותר בקרב המטופלים ונראתה מגמה דומה לרוטציות הגו המתבטאת בכמות השימוש בין חלקי התנועה. אולם, בקבוצת הבקרה לא ניכר שימוש בתנועת הגו כלל ללא תלות בתת התנועה המבוצעת ובמטרה. בהתאמת המודל נמצאה מובהקות של גורם הקבוצה ($P<.001$, $F=15.69$), גורם המטרה ($P<.01$, $F=4.54$), גורם החלק בתנועה ($P<.001$, $F=13.11$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($P<.05$, $F=5.79$). הנבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש גדול יותר בשני חלקי התנועה כאשר בחלקה הראשון ההבדל מובהקות ההבדל קטנה יותר ($P=0.07$) מול 1.88 ס"מ מול 2.94 ס"מ. בחלקה השני של התנועה המטופלים השתמשו ב-1.03 ס"מ יותר ($P<.0001$) מהחלק הראשון ואילו בקבוצת הבקרה לא נראה פער בעוד הבדל זה נאמד ב-0.03 ס"מ.

ממצאי תנועת המרפק בשני חלקי התנועה העלו כי קיימת השפעה מובהקת של גורם הקבוצה ($P<.01$, $F=10.73$), גורם המטרה ($P<.05$, $F=3.75$) וגורם החלק בתנועה ($P<.001$, $F=602.71$). עולה כי בשני חלקי התנועה הנבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש גדול יותר באיבר זה והתאפיינו באורך נתיב גדול יותר העומד על 5.03 מ"מ בחלקו הראשון של התנועה ($P=0.026$) ונאמד ב-4.55 מ"מ בחלקו השני של התנועה ($P=0.053$).

כעת נבחן את המנחים הסופיים של הנבדקים ביחס לחלקי התנועה. לזווית הסופית של רוטציית הרול של הגו ($tRFA$) נמצא אפקט מובהק של שתי אינטראקציות בלבד, האינטראקציה בין גורם הקבוצה לגורם המטרה ($P<.1$, $F=2.12$) והאינטראקציה בין גורם הקבוצה לגורם החלק בתנועה ($F=3.49$, $P<.1$). כפי שניתן ללמוד מאיור A.23, בקבוצת המטופלים לזווית הסופית של רוטציה זו אין תלות לא במטרה ולא בחלק בתנועה וכן עומדת על 1- מעלות. לעומת זאת, בקרב הנבדקים מקבוצת הבקרה בחלקה הראשון של התנועה לעבר מטרת ה-CO מסיים הנבדק עם הזווית הסופית הגבוהה ביותר, 4- מעלות בעוד לעבר מטרת ה-IP מסיים עם הזווית הנמוכה ביותר, 2- מעלות. בחלקה השני של התנועה ניכרת מגמה דומה הנמוכה בכ-2 מעלות מחלק התנועה הראשון. בניגוד לכך, עבור רוטציית הגו הקדמית ($tPFA$) נמצאה מובהקות של גורם המטרה ($P<.001$, $F=8.01$), גורם החלק בתנועה ($P<.001$, $F=123.96$) ושל האינטראקציה בין קבוצת הנבדק לחלק בתנועה ($F=36.17$, $P<.001$). כפי שניתן לראות באיור B.23, עבור נבדקי קבוצת הבקרה ניכר כי אין תלות בחלק של התנועה שכן בשניהם הזווית הסופית 0 מעלות בעוד בקבוצת המטופלים ניכרת מגמה שונה. בחלקה הראשון של התנועה לעבר שלושת המטרות הרחוקות הזווית הסופית הממוצעת היא 3 מעלות ואילו

לעבר מטרת ה-NC 0.98- מעלות. כאשר בחלקה השני של התנועה הזווית הסופית ללא תלות במטרה נאמד ב 2.5- מעלות. ברוטציית הגו הצידית ($tYFA$) לא נמצא אף גורם מובהק סטטיסטית מה שמרמז על דמיון בזוויות הסופיות של רוטציה זו בין הקבוצות, לא תלות במטרות ובחלק של התנועה.



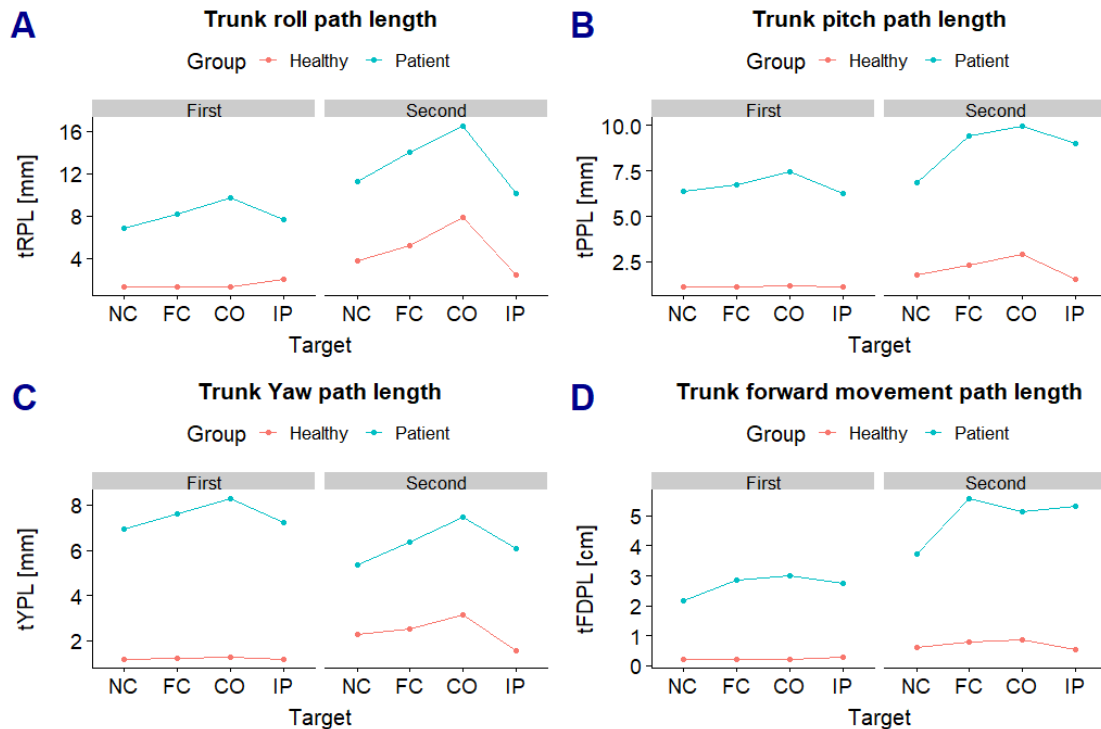
איור 23 - התנועה מחולקת מהשכבת הנתונים הראשונה, הזוויות הסופיות של רוטציות הגו הצדדית והקדמית

לזוויות הסופית בין מישור היד לגו נמצאה מובהקות סטטיסטית של גורם הקבוצה ($P<0.05$, $F=5.97$), גורם המטרה ($P<0.001$, $F=5.79$), האינטראקציה בין הקבוצה למטרה ($P<0.001$, $F=17.37$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($P<0.05$, $F=5.99$). ניתן ללמוד מאיור 23.C כי ישנה מגמה דומה בין חלקי התנועה בכל אחת מקבוצות הנבדקים אך מגמות אלה שונות. בקרב נבדקים מקבוצת המטופלים נמצאה זווית סופית נמוכה יותר בהשוואה לקבוצת הבקרה, המצביעה על שימוש גדול יותר במרפק, ואינה תלויה בחלק של התנועה או במטרה שלעברה מבוצעת התנועה ונאמדת ב-90.4 מעלות. לעומת זאת, בקבוצת הבקרה ניכר הבדל בזווית הסופית כתלות במטרה ($P<0.001$) כאשר בביצוע המשימה לעבר מטרת ה-IP הזווית הסופית של מישור היד הינה הגבוהה ביותר ועומדת על 116 מעלות, קרי השימוש הקטן ביותר, ואילו לעבר יתר המטרות ההבדלים קטנים יותר ונצפות זוויות סופיות העומדות על כ-106 מעלות בממוצע. פער הזווית בין הקבוצות גדול אך אינו מובהק, בחלקו הראשון של התנועה נאמד ב 13.64 מעלות בעוד בחלקה השני של התנועה נאמד הפער ב-17.4 מעלות. שאלה מעניינת שעלתה הייתה האם ליד המבצעת היה קשר לזווית הסופית ולכן זה נבדק. כפי שניתן לראות באיור D.23 הזווית הסופית של מישור היד תלויה ביד המבצעת את התנועה דבר המאשש את חוסר המובהקות של גורם החלק בתנועה ומדגיש את הקשר בין הזווית הסופית של מישור היד ליד המבצעת.

4.3.3.2.2 שכבת דרגות החופש

לרוטציית הרול של הגו ($tRPL$) נמצאה השפעה מובהקת של גורם הקבוצה ($P<.001$, $F=72.79$), גורם המטרה ($P<.001$, $F=27.99$), גורם החלק בתנועה ($P<.001$, $F=190.59$), האינטראקציה בין הקבוצה למטרה ($P<.05$, $F=4.95$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($F=10.38$, $P<.001$). לא נמצאה בקרב קבוצת המטופלים תנועה דומה ברוטציית הגו בין אף אחד מחלקי התנועה לקבוצת הבקרה. מבחני פוסט-הוק מעריכים כי אורך הנתיב של קבוצת המטופלים גדול יותר ב-4.31 מ"מ בתת התנועה הראשונה וב-5.89 מ"מ בתת התנועה השנייה (בשני המקרים, $P<.0001$). כמו כן, בשתי קבוצות הנבדקים השימוש ברוטציית הרול היה גדול יותר בחלק השני של התנועה ($P<.0001$). כפי שניתן לראות באיור A.24, המציג את תרשים האינטראקציה, בשתי הקבוצות נראה שהחלק הראשון בתנועה מאופיין בשימוש נמוך של הסיבוב בעוד בקבוצת הבקרה אין תלות בין המטרות והשימוש נאמד ב-1.5 מ"מ. לעומת זאת, בקבוצת המטופלים השימוש בסיבוב זה תלוי במטרה כאשר לעבר המטרה המנוגדת ניכר הסיבוב הגדול 7.36 מ"מ, בעוד לעבר שאר המטרות אורך הנתיב של רוטציה זו הינו 5 מ"מ בממוצע. בחלקה השני של התנועה, נצפה שימוש גדול בסיבוב זה לעבר מטרת ה- CO בשתי קבוצות הנבדקים, 14.19 מ"מ מול 7.84 מ"מ ולעבר מטרת ה- IP נראה השימוש הקטן ביותר, 7.81 מ"מ מול 2.44 מ"מ. ממצאים אלו מאששים את מובהקות האינטראקציות שכן ישנה מגמה דומה בין קבוצת המטופלים בין חלקי התנועה ובין קבוצת הבקרה בחלקה התנועה השני.

לרוטציה הקדמית של הגו ($tPPL$) נמצאה מובהקת סטטיסטית של גורם הקבוצה ($F=26.6$, $P<.001$), גורם המטרה ($F=4.96$, $P<.01$), וגורם החלק בתנועה ($F=32.89$, $P<.001$). גם ברוטציה זו לא נמצאה בקרב קבוצת המטופלים תנועה דומה ומבחני פוסט-הוק מצאו כי אורך הנתיב של הסיבוב הקדמי גדול ב-3.2 מ"מ בתת התנועה הראשונה וב-4.42 מ"מ בתת התנועה השנייה ($P=0.016$, $P=0.0015$ בהתאמה). ניתן ללמוד מאיור B.24, כי הנבדקים משתי הקבוצות ביצעו שימוש גדול יותר בסיבוב בתת התנועה השנייה ($P<.07$) וגם כאן ניכרת מגמה דומה לרוטציית הרול ובה חלקה הראשון של התנועה מאופיין בשימוש נמוך של הסיבוב ואילו בחלקה השני השימוש משתנה בין המטרות השונות, כאשר לעבר מטרת ה- CO השימוש הניכר ביותר, 5.06 מ"מ מול 1.18 מ"מ, ואילו בתת התנועה השנייה, בקרב המטופלים למטרת ה- NC , 1.18 מ"מ מול 4.48 מ"מ, ובקבוצת הבקרה למטרת ה- IP , 6.61 מ"מ מול 1.56 מ"מ.



איור 24 - התנועה המחולקת מהשכבת הנתונים השנייה, אורכי נתיב מסלולי הגו

גם לאורך הנתיב של הסיבוב הצירי של הגו ($tYPL$) נמצאה מובהקת סטטיסטית של גורם הקבוצה ($P<.001$, $F=20.74$), גורם המטרה ($P<.001$, $F=5.46$), גורם החלק בתנועה ($P<.05$, $F=4.02$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($P<.001$, $F=17.41$). כפי שניתן לראות באיור C.24, קבוצת המטופלים ביצעה שימוש גדול יותר גם ברוטציה זו בשתי תתי התנועות לעומת קבוצת הבקרה כאשר בתת התנועה הראשונה הפרש זה נאמד ב- 4.26 מ"מ ($P<.0001$) ואילו בתת התנועה השנייה ב- 1.88 מ"מ בלבד אך למרות הבדלי הביצועים לעבר מטרה זו, הבדל זה לא נמצא מובהק. בנוסף, המגמה הדומה באופן השימוש לשתי הרוטציות שהוזכרו, שימוש נמוך בחלק הראשון ושימוש גדול יותר בחלק השני, ניכרת רק בקבוצת הבקרה כאשר בקבוצת המטופלים ניכרת מגמה הפוכה המצביעה על פחות שימוש בחלקה השני של התנועה.

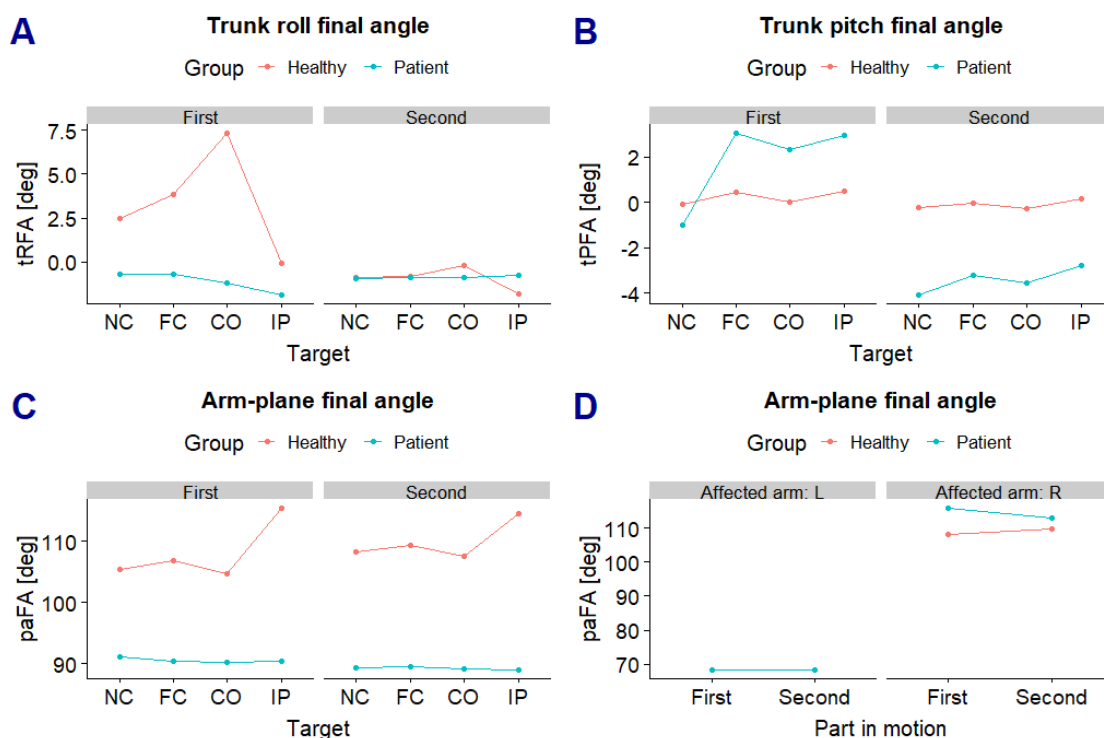
תנועת הגו קדימה בתנועה המלאה נמצאה גבוהה בקרב המטופלים וגם בתנועה המחולקת נמצא שימוש גדול יותר בקרב המטופלים ונצפית מגמה דומה לרוטציות הגו כמות השימוש בין חלקי התנועה. אולם, בקבוצת הבקרה לא ניכר שימוש בתנועת הגו כלל ללא תלות בתת התנועה המבוצעת ובמטרה. מובהקות סטטיסטית נמצאה בגורם הקבוצה ($P<.001$, $F=15.99$), גורם המטרה ($P<.01$, $F=4.09$), גורם החלק בתנועה ($P<.001$, $F=84.09$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($P<.001$, $F=21.94$). מאיור D.24 עולה כי הנבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש גדול יותר בשני חלקי התנועה כאשר בחלקה הראשון ההבדל אינו מובהק ונאמד ב- 1.53 ס"מ בעוד בחלקה השני ההבדל עומד על 3.3 ס"מ ($P<.0001$). כמו כן, בחלקה השני של התנועה המטופלים השתמשו ב- 2.25 ס"מ יותר ($P<.0001$) יותר מהחלק הראשון ואילו בקבוצת הבקרה פער זה נאמד ב- 0.47 ס"מ. השימוש הגדול ביותר בקרב המטופלים נצפה בחלק הראשון של התנועה לעבר מטרה

ה- CO_2 , 2 ס"מ מול 4.15 ס"מ בחלק השני בעוד לעבר מטרת ה- NC אורך הנתיב הינו 1.17 ס"מ מול 2.75 ס"מ.

ממצאי תנועת המרפק בשני חלקי התנועה העלו כי קיימת השפעה מובהקת סטטיסטית של גורם הקבוצה ($P<0.01$, $F=10.73$), גורם המטרה ($P<0.001$, $F=5.99$), גורם החלק בתנועה ($F=311.72$), ($P<0.05$) והאינטראקציה בין המטרה לחלק בתנועה ($P<0.05$, $F=2.77$). עולה כי בשני חלקי התנועה הנבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש גדול יותר באיבר זה והתאפיינו באורך נתיב גדול יותר בעוד הבדל זה עומד על 5.32 מ"מ בחלקה הראשון של התנועה ($P=0.013$) ועל ב- 4.26 מ"מ בחלקה השני של התנועה ($P=0.065$). כמו כן, שתי הקבוצות ביצעו שימוש גבוה יותר בחלקו הראשון של התנועה בעוד הפרש זה עומד בקבוצת הבקרה על 8.34 מ"מ ($P<0.0001$) ובקבוצת המטופלים על 9.4 מ"מ ($P<0.0001$), מובהקות של אינטראקציה משלושת עם משתנה המטרה נמצאה ומאששת את המגמה הדומה בין חלקי התנועה. בהשוואה בין הקבוצות, בחלק הראשון של התנועה נצפה שימוש גבוה לעבר מטרת ה- IP , 20.65 מ"מ מול 20.03 מ"מ, בעוד לעבר מטרת ה- NC נצפה השימוש הנמוך ביותר בקבוצת המטופלים, 18.05 מ"מ מול 13.80 מ"מ, ולעבר מטרת ה- CO_2 , 20.95 מול 13.12 מ"מ. בחלק השני של התנועה, בקרב קבוצת המטופלים ניכר דמיון בשימוש בין המטרות השונות ובממוצע עומד על 11.3 מ"מ מול 7.3 מ"מ בקבוצת הבקרה.

כעת נבחן את המנחים הסופיים של הנבדקים ביחס לחלקי התנועה. לזווית הסופית של רוטציית הרול של הגו ($tRFA$) נמצא אפקט מובהק של האינטראקציה בין גורם הקבוצה לחלק בתנועה בלבד ($P<0.01$, $F=7.06$). תוצאות אלו מאששות את המשתקף באיור A.25, עבור נבדקי קבוצת המטופלים ניכר כי אין תלות בחלק של התנועה או במטרה והזווית הסופית של הרול הינה בממוצע 1 מעלות בעוד בקבוצת הבקרה ניכרים הבדלים בין חלקי התנועה ובין המטרות השונות. כפי שניתן לראות באיור A.25, בקרב נבדקי קבוצת הבקרה בשני חלקי התנועה נצפית לעבר מטרת ה- CO_2 הזווית הסופית הגבוהה ביותר, 7.27 מעלות מול 0.716 מעלות, בעוד לעבר מטרת ה- IP מסיים עם הזווית הנמוכה ביותר, -0.14 מעלות מול -1.91 מעלות. בניגוד לכך, עבור רוטציית הגו הקדמית ($tPFA$) נמצאה מובהקות של גורם המטרה ($P<0.001$, $F=6.31$), גורם החלק בתנועה ($F=110.92$), ($P<0.001$) של האינטראקציה בין קבוצת הנבדק לחלק בתנועה ($P<0.001$, $F=38.02$) ושל האינטראקציה בין המטרה לחלק בתנועה ($P<0.1$, $F=2.15$). כפי שניתן לראות באיור B.25, עבור נבדקי קבוצת הבקרה נראה כי אין תלות בחלק של התנועה שכן בשניהם הזווית הסופית היא כ-0 מעלות בעוד בקבוצת המטופלים ניכרת מגמה שונה. זווית סופית גבוהה בחלק התנועה הראשון המתבטא במרפק נמוך לעומת זווית נמוכה בסוף התנועה המבטאת הרמה של המרפק. בחלקה הראשון של התנועה לעבר שלושת המטרות הרחוקות הזווית הסופית נאמדת ב 2.5 מעלות כאשר בחלקה השני של התנועה הזווית הסופית ללא תלות במטרה נאמד ב 4- מעלות בממוצע בין המטרות. כמו כן, ברוטציית הגו הצידי ($tYFA$) למרות שנמצא אפקט מובהק של האינטראקציה בין גורם הקבוצה לחלק בתנועה ($P<0.05$, $F=6.33$) אך ההבדלים בין ביצועי הנבדקים בין שני חלקי התנועה אינם מובהקים.

לזווית הסופית בין מישור היד לגו נמצאה מובהקת סטטיסטית של גורם הקבוצה ($P<.05$, $F=6.36$), גורם המטרה ($P<.01$, $F=4.15$), האינטראקציה בין הקבוצה למטרה ($P<.001$, $F=12.91$) והאינטראקציה בין הקבוצה לחלק בתנועה ($P<.01$, $F=6.84$). כפי שעולה מאיור C.25, לנבדקים מקבוצת המטופלים נמצאה זווית סופית נמוכה יותר אשר אינה תלויה לא בחלק של התנועה ולא במטרה שלעברה מבוצעת התנועה ונאמדת ב-91 מעלות. לעומת זאת, בקבוצת הבקרה ניכר הבדל בזווית הסופית כתלות במטרה ($P<.001$) אך לא בין חלקי התנועה בעוד בביצוע המשימה לעבר מטרת ה-IP הזווית הסופית של מישור היד הינה הגבוהה ביותר והינה בממוצע 115 מעלות ואילו לעבר יתר המטרות ההבדלים קטנים יותר והזווית הממוצעת 106 מעלות. ניתן לזהות מגמה דומה בין חלקי הקבוצות בכל אחת מקבוצות הנבדקים וכן, פער הזווית בין הקבוצות בחלקו הראשון של התנועה נאמד ב-14.17 מעלות בעוד בחלקו נאמד הפער ב-17.24 מעלות. שאלה מעניינת שעלתה הייתה האם ליד המבצעת היה קשר לזווית הסופית ולכן זה נבדק. כפי שמוצג באיור D.25 ניתן לראות כי הקשר הלא מובהק של החלק בתנועה וניתן לראות כי הזווית הסופית של מישור היד תלויה ביד המבצעת את התנועה.



איור 25 - התנועה המחולקת מהשכבת הנתונים השנייה, הזווית הסופית עבור הרוטציה הקידמית והצדדית של הגו ומישור היד

5 דיון ומסקנות

ממצאי המחקר מראים כי הבדלי תנועה נמצאו בין הנבדקים מקבוצת המטופלים בהשוואה לקבוצת הבקרה ובין המטופלים עצמם. נמצא כי הנבדקים מקבוצת הבקרה מבצעים תבניות תנועה דומות בעוד תנועות נבדקי קבוצת המטופלים שונות ביחס לקבוצת הבקרה וביניהם. ממצאי המחקר הראו כי המטופלים יכלו לבצע את המשימה באמצעות פיצוי התפקוד המוטורי הלקוי של מפרקים ספציפיים (הגפה העליונה במחקר זה) על ידי שימוש במפרקים אחרים או אפילו בחלקי גוף שונים. הראנו כי נבדקים מקבוצת המטופלים ביצעו שימוש בתנועות פיצוי במהלך משימת ההושטה-תפיסה אשר התבטאו בהרמת המרפק ושימוש בגוף גם בתנועה המלאה וגם בשתי-תתי התנועות שהתקבלו כתוצאה מחלוקת התנועה על ידי נקודות השינוי. תנועות הפיצוי התבטאו בשילוב דרגות חופש של המרפק והגו ליצירת אסטרטגיות תנועה אשר לא היו זהות בין הנבדקים.

השוואת חמשת מסלולי התנועה, הכוללים את שלוש רוטציות הגו, תנועתו קדימה וזווית מישור היד, הראו כי משך התנועה של נבדקי קבוצת המטופלים היה ארוך יותר, תנועתם הייתה פחות חלקה, לא הייתה תבנית קבועה לתנועה מה שהתבטא בפיזור לא אחיד של מסלולי התנועה ומצביע על קושי בחזרה על תבנית תנועה קבועה. הסבר אפשרי חלקי עבור הבדלי הביצוע הן מבחינת משך התנועה והן מבחינת מהירות התנועה הוא שאדם בריא המבצע פעולה יומיומית אינו נדרש לחשוב לפני ביצוע התנועה ופועל באופן אוטומטי לעומת אדם עם מוגבלות אשר מתכוון לפני הפעולה ומבצע תהליך חשיבה. כמו כן, בחינת מדדי תנועה עבור מסלולי תנועה אלו סייעו בכימות תנועות הפיצוי בתנועה לצורך בחינתם והסקה סטטיסטית. ממצאי מדדי התנועה העלו כי בוצע שימוש גדול יותר בקרב נבדקי קבוצת המטופלים בכל אחד מחמשת מסלולי התנועה וכי ברוטציות הגו קיימת מגמה דומה בשימוש בין המטרות השונות. לעומת זאת, הזוויות הסופיות הצביעו על מנחים סופיים דומים בקרב קבוצת הבקרה בעוד נבדקי קבוצת המטופלים אופיינו בשונות גבוהה. בוצעה בדיקת תאימות עבור תוצאות תנועות הפיצוי אל מול מדדי הערכת תנועה וספסיות, מדד ה-FMA ומדד ה-MAS, אשר הראתה את הקשר בין ליקוי גבוהה לשימוש בתנועות הפיצוי. ממצאים אלו מאששים את השערות המחקר הנשענות על מחקרים קודמים. הסינרגיות אשר נמדדות באמצעות מטריצת הקורלציה בין דרגות החופש נבחנו בשתי שכבות הנתונים, שכבת הנתונים הגולמיים ושכבת דרגות החופש, כאשר בשתייהן נמצאו פחות קשרים בקרב נבדקי קבוצת המטופלים והקשרים הקיימים אף חלשים יותר. ממצאים אלו מאששים את השערת המחקר בנושא זה.

נקודות השינוי בתנועה נבחנו בשתי שכבות של הנתונים, שכבת הנתונים הגולמיים ושכבת דרגות החופש, כאשר הן מוגדרות כנקודות הזמן בהן מתרחש השינוי במגמה בתנועה ולמעשה מחלקות את התנועה לשתי תתי-תנועות. בעוד השערת המחקר הראשונה בנושא אומתה עוד בשלב הניתוח כאשר הוכחנו את עדיפות מודל הרגרסיה למקוטעין על פני מודל הרגרסיה הליניארי הפשוט, התעמקנו בבחינת אסטרטגיות התנועה שבוצעו בשני חלקי התנועה בין קבוצת הנבדקים. ממצאי המחקר הראו כי נקודות השינוי שנאמדו בקרב קבוצת המטופלים היו שונות כאשר ערכי הנקודות

בשכבה הראשונה, שכבת הנתונים הגולמיים, מושפעות מקבוצת הנבדק בלבד בעוד השינוי בקרב המטופלים התרחש מוקדם יותר ואילו בשכבת הנתונים השנייה, שכבת דרגות החופש, נקודות השינוי מושפעות הן מהקבוצה, הן מהמטרה והן מהאינטראקציה כאשר בקבוצת הבקרה השינוי מתרחש מוקדם יותר ואילו בקבוצת המטופלים לא נראה תלות בין המטרות השונות והשינוי מתרחש בנקודות זמן זהות. ממצאים אלו אינם מדויקים כיוון שבחישוב נקודות השינוי נעשה כיוול של רכיב הזמן ולכן, בשל הפער הגדול בין משך התנועה של הקבוצות העומד על כמעט פי שניים, ניתן ללמוד שהשינוי בשתי שכבות הנתונים התרחש בנקודת זמן מאוחרת יותר למרות שאחוז הזמן בתנועה היה מוקדם יותר, מה שמאשש את השערת המחקר בהקשר זה.

מדדי התנועה אשר חושבו בשני חלקי התנועה, ביחס לנקודות השינוי של השכבה הראשונה וביחס לנקודות השינוי של השכבה השנייה, הראו כי בוצע שימוש בתנועות הפיצוי על ידי הנבדקים מקבוצת המטופלים כאשר תנועות פיצוי אלו לא נצפו בקבוצת הבקרה. כמו כן, למרות שהבדלי הזוויות הסופיות של רוטציות הגו של הנבדקים בשני חלקי התנועה אינם מובהקים סטטיסטית בין הקבוצות ניכר מבנה קבוע בקבוצת הבקרה בעוד שונות התוצאות בקבוצת המטופלים גדולה יותר. השימוש במרפק בקרב קבוצת המטופלים ניכר יותר ביחס לקבוצת הבקרה והתבטא גם באורך נתיב גדול יותר וגם בזווית סופית נמוכה יותר, אך למרות הבדלים אלו, ישנה מגמה זהה במדדי התנועה בין המטרות השונות בין חלקי התנועה בין קבוצות הנבדקים, כאשר קיימת סטייה של קבוע בין קבוצות הנבדקים המתבטאת במובהקות האינטראקציה במדדים רבים.

התנועה המחולקת על ידי השכבה הראשונה, שכבת הנתונים הגולמיים, מאופיינת בדמיון בתנועה בתוך כל קבוצה בין חלקי התנועה. ואילו התנועה המחולקת על ידי השכבה השנייה, שכבת נתוני דרגות החופש, מאופיינת בשימוש שונה בין חלקי התנועה. בחלקה הראשון של התנועה נצפה שימוש נמוך ברוטציות הגו ונראה שימוש רב יותר במרפק בקרב קבוצת המטופלים אשר אינו תלוי במטרה אליה מבוצעת התנועה כאשר בשני חלקי התנועה נראה דמיון בשימוש בכתף המתבטא בהרמת המרפק. לפיכך, לא נמצאה תאימות במדדי הביצוע בחלקה הראשון של התנועה בין הקבוצות אל מול הבדלי הביצועים שנצפו בחלקה השני של התנועה ולכן השערת המחקר בנושא זה אינה מאוששת אך גם אינה מופרכת באופן מלא.

לסיכום, שתי השערות המחקר אשר נשענות על מחקרים קודמים אוששו באופן מלא. השיטה למציאת נקודות השינוי בתנועה המכילה את שלושת השלבים: בחינת הקורלציות, הורדת מימד והתאמת מודל הרגרסיה למקוטעין לרכיבים החדשים, הצליחה לאמוד את נקודת שינוי המגמה בתנועה. נקודה זו מאפיינת את נקודת הזמן המחלקת את התנועה לשתי תנועות משנה: הרמת הזרוע מעלה ואז הושטה קדימה לעבר המטרה. מפאת תאימות במדדי הביצוע בין חלקי התנועה בשכבת הנתונים הראשונה נקודת השינוי שנמצאה אינה מאפיינת שינוי בעוד החלוקה הנשענת על שכבת הנתונים

השנייה המכילה את עשר דרגות החופש של הגפה העליונה והגו, הצליחה לחלק את התנועה לשתי תתי תנועות כך שנראה שינוי מגמה ובו הפיצוי הגדול יותר מתבצע בחלקה השני של התנועה.

טבלה 11 - סיכום השערות המחקר

ממצאי המחקר מאששים את ההשערה באופן מלא	ממצאי המחקר מאששים את ההשערה באופן חלקי	ממצאי המחקר מפריחים את ההשערה	
✓			H1
✓			H2
	✓ *		H3
	✓ **		H4

* בשתי שכבו הנתונים עדיפה החלוקה לשתי תתי תנועות כאשר בשכבת הנתונים הראשונה השינוי מתרחש מוקדם יותר בקרב נבדקי קבוצת המטופלים (הפוך מהשערת המחקר) בעוד בשכבת הנתונים השנייה השינוי מתרחק מאוחר יותר.

** בשכבת הנתונים הראשונה נמצאו תאימות במדדי הביצוע בין חלקי התנועה בין קבוצות הנבדקים מה שסותר את השערת המחקר בעוד בשכבת הנתונים השנייה נמצא שימוש גדול יותר בתנועות הפיצוי בחלקה השני של התנועה מה שמאמת את השערת המחקר.

מגבלות המחקר קשורות לקבוצת הנבדקים לאחר שבץ-מוחי שכן התנאים שהוגדרו לנבדקים מצמצמים בהכרח את גודל האוכלוסייה הרלוונטית. מספר הנבדקים שנכללו במחקר בקבוצת המטופלים עמד על 32 נבדקים בלבד. כמו כן, מספר הנבדקים מכל מדינה אינו שווה, מקנדה נדגמו רק 4 נבדקים מול 14 מהמדינות האחרות, ישראל והודו. כמו כן, למרות היחס השווה בין המינים בקבוצות, ישנו רוב נשי בכל אחת מקבוצות הנבדקים וייתכן שמדגם אשר יכיל גברים ונשים באופן שווה יניב תוצאות שונות.

מחקר עתידי יכול לדגום באופן שווה נבדקים מכל מדינה ואף להרחיב את מספר המדינות המשתתפות במחקר דבר אשר יעזור להגדיל את האוכלוסייה הרלוונטית מפאת הקושי במציאת נבדקים העונים לכלל הקריטריונים ומעוניינים להשתתף בניסוי. בנוסף, עולה השאלה האם כדאי לכלול במחקר נבדקים בעלי ספסטיות גבוהה יותר שכן במחקר זה מרבית הנבדקים היו בעלי תוצאה 1 ו-1+ על מנת לבחון את תנועות הפיצוי בקרב רמות הספסטיות השונות. כמו כן, מחקר עתידי יכול לבחון את חלוקת תנועות הנבדקים למספר תתי תנועות גדול מ-2 ואף אולי לבדוק את המספר האופטימלי שמבטא את תנועת הנבדק. הבחינה יכולה להיעשות על ידי שימוש באלגוריתם שבוצע במחקר זה המשלב הורדת מימד באמצעות PCA והתאמת נקודות שינוי למשתנים החדשים באמצעות מודל רגרסיה למקוטעין. כמו כן, ניתן לבחון התאמת מודל שאינו ליניארי, למשל פולינומיאלי

ולחפש נקודות מינימום ופיתול אשר מחלקות את התנועה למספר מקטעים המקטעים הנבחן בעוד ניתן לבחון שני מקטעים כמו במחקר זה ואף יותר, מה שעלול להוביל לתוצאות שונות.

ביבליוגרפיה

- (1) מה זה ספסטיות? מרכז מידע רעות אשל, Accessed 05 June 2018, <https://www.reutheshel.org.il/מה-זה-ספסטיות/>
- (2) שבץ מוחי, אתר משרד הבריאות. Accessed 05 September 2019. <https://www.health.gov.il/Subjects/disease/Pages/stroke.aspx>
- 3) Bohannon, Richard, and Melissa Smith. 2014. "Interrater Reliability of a Modified Ashworth Scale.pdf." : 415–17.
- 4) Calota, A., & Levin, M. F. (2009). Tonic stretch reflex threshold as a measure of spasticity: implications for clinical practice. *Topics in stroke rehabilitation*, 16(3), 177-188.
- 5) Cirstea, M. C., & Levin, M. F. (2000). Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain*, 123(5), 940-953.
- 6) Davidowitz Isgav, 2017, Statistical movement modeling for skill encoding and analysis, Thesis (Ms.c.) – Ben Gurion university.
- 7) Dipietro, L., Krebs, H. I., Fasoli, S. E., Volpe, B. T., Stein, J., Bever, C., & Hogan, N. (2007). Changing motor synergies in chronic stroke. *Journal of neurophysiology*, 98(2), 757-768.
- 8) Kwakkel G, Kollen B, Lindeman E (2004) Understanding the pattern of functional recovery after stroke: facts and theories. *Restor Neurol Neurosci* 22:281–299
- 9) Lackritz Hadar, 2019, Using Hellinger distance for quantifying the effects of spasticity following stroke on voluntary movement, Thesis (Ms.c.) – Ben Gurion university.
- 10) Lang, C. E., Wagner, J. M., Dromerick, A. W., & Edwards, D. F. (2006). Measurement of upper-extremity function early after stroke: properties of the action research arm test. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 87(12), 1605-1610.
- 11) Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *The Lancet*, 377(9778), 1693-1702.
- 12) Levin, M. F., Baniña, M. C., Frenkel-Toledo, S., Berman, S., Soroker, N., Solomon, J. M., & Liebermann, D. G. (2018). Personalized upper limb training combined with anodal-tDCS for sensorimotor recovery in spastic hemiparesis: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 19(1), 7.
- 13) Levin, M. F., Liebermann, D. G., Parmet, Y., & Berman, S. (2016). Compensatory versus noncompensatory shoulder movements used for reaching in stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, 30(7), 635-646.
- 14) Levin, M. F., Michaelsen, S. M., Cirstea, C. M., & Roby-Brami, A. (2002). Use of the trunk for reaching targets placed within and beyond the reach in adult hemiparesis. *Experimental brain research*, 143(2), 171-180.
- 15) Pandyan, A., Gregoric, M., Barnes, M. P., Wood, D., Wijck, F. V., Burridge, J., ... & Johnson, G. R. (2005). Spasticity: clinical perceptions, neurological realities and meaningful measurement. *Disability and rehabilitation*, 27(1-2), 2-6.

- 16) Prabhakaran, S., Zarahn, E., Riley, C., Speizer, A., Chong, J. Y., Lazar, R. M., ... & Krakauer, J. W. (2008). Inter-individual variability in the capacity for motor recovery after ischemic stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, 22(1), 64-71.
- 17) Reisman, D. S., & Scholz, J. P. (2003). Aspects of joint coordination are preserved during pointing in persons with post-stroke hemiparesis. *Brain*, 126(11), 2510-2527.
- 18) Russell Lenth (2019). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.3.4. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- 19) Sommerfeld, Disa et al. 2004. "Spasticity After Stroke.pdf": 134–40.
- 20) Taylor, W. A. (2000). Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes.
- 21) van Kordelaar, J., van Wegen, E. E., & Kwakkel, G. (2012). Unraveling the interaction between pathological upper limb synergies and compensatory trunk movements during reach-to-grasp after stroke: a cross-sectional study. *Experimental brain research*, 221(3), 251-262.
- 22) Vito M. R. Muggeo (2017). Interval estimation for the breakpoint in segmented regression: a smoothed score-based approach. *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 59, 311-322. <https://cran.r-project.org/package=emmeans>
- 23) Zarahn E, Alon L, Ryan SL, Lazar RM, Vry MS, Weiller C, Marshall RS, Krakauer JW (2011) Prediction of motor recovery using initial impairment and fMRI 48 h post stroke. *Cereb Cortex* 21:2712–2721

נספחים

נספח A1 – מערכת המעקב G4 Polhemus

מערכת G4 Polhemus הינה מערכת מעקב אלקטרומגנטית אלחוטית. שורש ממוצע ריבועי הסטיות של מערכת זו עומד על 0.08 אינץ' עבור מיקום ו- 0.5 מעלות עבור סיבוב בשימוש של מטר אחד מהמקום. הציוד מכיל RF/USB, משדר (the hub), חיישנים אלחוטיים (עם 6 דרגות חופש) וקובייה לייצור השדה המגנטי כמקור. החיישנים נדגמים בקצב דגימה של 120 הרץ'.



איור A. 1 משדר ה-G4 polhemus ושלושה חיישנים אלחוטיים (Davidowitz, 2017)

נספח A2 – סדר החזרות למטרות המתוקן

טבלה A.1 - סדר החזרות למטרות

Set ID	Trial Num	Target
1	1	3
1	2	2
1	3	4
1	4	1
1	5	2
1	6	3
1	7	4
1	8	1
1	9	3
1	10	2
1	11	1
1	12	4
1	13	1
1	14	4
1	15	3
1	16	2
1	17	1
1	18	2
1	19	4
1	20	3
1	21	2
1	22	3
1	23	1
1	24	4
1	25	2
1	26	3
1	27	4
1	28	1
1	29	3
1	30	4
1	31	2
1	32	1
1	33	1
1	34	3
1	35	2
1	36	4
1	37	4
1	38	3
1	39	1
1	40	2

Set ID	Trial Num	Target
2	1	4
2	2	2
2	3	3
2	4	1
2	5	2
2	6	3
2	7	4
2	8	1
2	9	3
2	10	4
2	11	1
2	12	2
2	13	2
2	14	4
2	15	3
2	16	1
2	17	2
2	18	4
2	19	1
2	20	3
2	21	3
2	22	2
2	23	1
2	24	4
2	25	1
2	26	3
2	27	4
2	28	2
2	29	4
2	30	3
2	31	1
2	32	2
2	33	1
2	34	4
2	35	3
2	36	2
2	37	4
2	38	3
2	39	2
2	40	1

נספח A3 – הגדרת דרגות החופש של המפרקים

טבלה A.2 - הגדרות דרגות החופש של המפרקים

Name	Explanation	Units
Shoulder Flexion-Extension	Angle between upper arm marker X_{M3} and sternum marker X_{M5} in M5 XZ plane. Fix to 0 when arm pointing down alongside body X_{M3} and X_{M5} orthogonal.	Deg
Shoulder Abduction-Adduction	Angle between upper arm marker X_{M3} and sternum marker $-Z_{M5}$ in M5 ZY plane. Fix to 0 when arm pointing down alongside body X_{M3} and $-Z_{M5}$ orthogonal	Deg
Shoulder External-Internal Rotation	Angle around the shoulder elbow vector X_S . 0 in according to rest position, positive direction external.	Deg
Elbow Flexion – Extension	Angle between upper arm marker X_{M3} and lower arm marker X_{M2} . 180 deg- Full arm extension	Deg
Elbow Supination-Pronation	Angle around wrist elbow vector X_E . 0 is according to rest position. Positive direction external.	Deg
Wrist abduction adduction	Rotation around Z_{M2} (right hand rule), Angle between X_{M1} and X_{M2} . 0 when X_{M1} and X_{M2} are parallel.	Deg
Wrist Flexion-Extension	Angle between Z_{M2} and Z_{M1}	Deg

נספח A4 – מודל רגרסיה למקוטעין לעומת רגרסיה ליניארית

עבור קבוצת הבקרה נעשתה וולידציה לצורך בחינת התרומה של המודל המקוטע לסירוגין לעומת מודל ליניארי פשוט. ההשוואה נעשתה באמצעות מדד AIC וניתן לראות בטבלה מטה עבור כל משתנה את אחוז ואת מספר החזרות בהן למודל הרגרסיה למקוטעין היה ייתרון על פני המודל הליניארי הפשוט.

טבלה A.3 - מודל רגרסיה למקוטעין לעומת מודל ליניארי פשוט

Joint Angle name	sExt	sAd	sInt	eExt	eSup	wExt	wAd
Segmented advantage rate	1	1	1	1	0.995	0.997	0.992
Number of trials Segmented was better	941	941	941	941	937	939	934
Joint Angle name	tRoll	tPitch	tYaw	PC1	PC2	PC3	
Segmented advantage rate	1	1	0.996	1	1	0.997	
Number of trials Segmented was better	941	941	938	941	941	939	

נספח B1 – תוצאות מסלולי הגו ומישור היד

בטבלה הבאה מוצגת דוגמה לתוצאת חישוב מסלולי הגו ומישוב היד עבור נבדק מקבוצת הבקרה. כפי שניתן לראות החישובים בוצעו פר יחידת זמן שנקבעה לפי קצב הדגימה. כמו כן, ארבעת המשתנים המייצגים את מסלולי הגו אותחלו ביחידת הזמן הראשונה לערך 0 לצורך קבלת התנועה האבסולוטית של הנבדק מתוך הנחה שמיקום הנבדקים הינו קבוע וכפי שצוין בפרק פרוטוקול הניסוי (פרק 3.1.2).

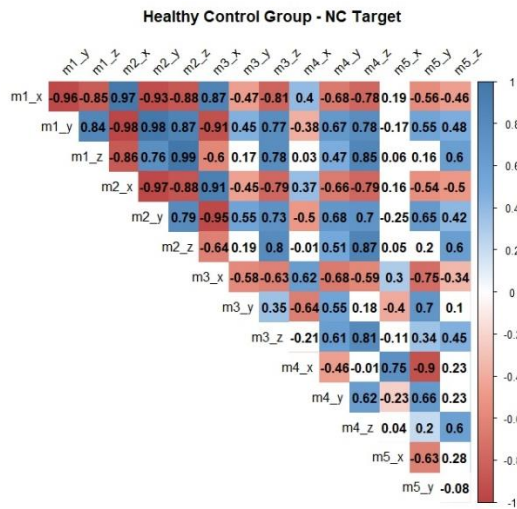
טבלה B.1 - מסלולי משתני הגו ומישור היד

time	pxAngle	tRoll	tPitch	tYaw	tFD
0.00	98.19	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	98.49	-0.09	0.00	0.01	0.00
0.01	98.94	-0.19	0.01	0.02	-0.01
0.02	99.53	-0.29	0.02	0.03	-0.01
0.03	100.25	-0.39	0.04	0.04	-0.02
0.04	101.09	-0.48	0.07	0.05	-0.02
0.05	102.00	-0.55	0.11	0.06	-0.02
0.05	102.96	-0.60	0.16	0.07	-0.02
0.06	103.94	-0.63	0.22	0.06	-0.03
0.07	104.92	-0.62	0.29	0.05	-0.02
0.08	105.89	-0.59	0.35	0.02	-0.02
0.09	106.84	-0.53	0.41	-0.02	-0.02
0.10	107.78	-0.43	0.45	-0.08	-0.02
0.11	108.70	-0.32	0.47	-0.16	-0.02
0.11	109.63	-0.19	0.47	-0.25	-0.02
0.12	110.55	-0.06	0.44	-0.37	-0.01
0.13	111.46	0.07	0.39	-0.50	-0.02
0.14	112.38	0.18	0.32	-0.64	-0.02
0.15	113.28	0.28	0.24	-0.80	-0.02
0.15	114.16	0.35	0.15	-0.96	-0.03
0.16	115.01	0.41	0.06	-1.13	-0.04
0.17	115.82	0.46	-0.04	-1.30	-0.06
0.18	116.56	0.50	-0.14	-1.45	-0.07
0.19	117.23	0.53	-0.24	-1.59	-0.09
0.20	117.81	0.57	-0.35	-1.71	-0.11
0.21	118.29	0.62	-0.47	-1.81	-0.13
0.21	118.68	0.67	-0.59	-1.88	-0.15
0.22	118.97	0.74	-0.72	-1.92	-0.17
0.23	119.18	0.82	-0.85	-1.94	-0.19
0.24	119.32	0.91	-0.99	-1.92	-0.20
0.25	119.41	1.00	-1.12	-1.88	-0.22
0.26	119.45	1.10	-1.25	-1.82	-0.23
0.26	119.48	1.20	-1.37	-1.73	-0.24
0.27	119.49	1.30	-1.47	-1.63	-0.25
0.28	119.49	1.39	-1.56	-1.51	-0.25
0.29	119.48	1.48	-1.64	-1.37	-0.25
0.30	119.47	1.54	-1.70	-1.22	-0.25
0.31	119.44	1.60	-1.75	-1.06	-0.25

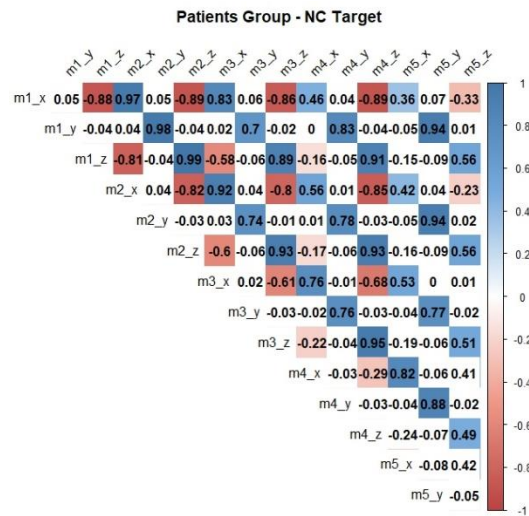
0.31	119.40	1.64	-1.80	-0.89	-0.25
0.32	119.33	1.67	-1.84	-0.71	-0.25
0.33	119.24	1.70	-1.88	-0.52	-0.25
0.34	119.13	1.74	-1.92	-0.32	-0.25
0.35	118.99	1.79	-1.98	-0.11	-0.24
0.36	118.82	1.85	-2.06	0.11	-0.24
0.36	118.63	1.95	-2.14	0.34	-0.24
0.37	118.42	2.06	-2.25	0.58	-0.23
0.38	118.19	2.21	-2.35	0.82	-0.22
0.39	117.93	2.37	-2.47	1.05	-0.21
0.40	117.65	2.55	-2.57	1.27	-0.19
0.41	117.35	2.73	-2.67	1.48	-0.17
0.41	117.03	2.91	-2.75	1.67	-0.15
0.42	116.70	3.09	-2.82	1.84	-0.12
0.43	116.37	3.25	-2.86	1.99	-0.09
0.44	116.05	3.39	-2.88	2.11	-0.06
0.45	115.75	3.53	-2.89	2.22	-0.03
0.46	115.49	3.64	-2.88	2.31	0.01
0.46	115.26	3.75	-2.86	2.40	0.04
0.47	115.07	3.85	-2.83	2.47	0.08
0.48	114.92	3.94	-2.79	2.54	0.12
0.49	114.80	4.03	-2.75	2.60	0.16
0.50	114.71	4.11	-2.70	2.67	0.20
0.51	114.64	4.19	-2.65	2.73	0.24
0.51	114.58	4.26	-2.59	2.79	0.28
0.52	114.52	4.31	-2.54	2.85	0.32
0.53	114.47	4.36	-2.47	2.90	0.36
0.54	114.40	4.39	-2.41	2.94	0.40
0.55	114.33	4.40	-2.34	2.98	0.44
0.56	114.26	4.41	-2.27	3.01	0.48
0.56	114.18	4.40	-2.21	3.02	0.52
0.57	114.11	4.38	-2.14	3.03	0.55
0.58	114.05	4.34	-2.08	3.03	0.59
0.59	114.00	4.30	-2.01	3.02	0.63
0.60	113.97	4.25	-1.96	3.00	0.66
0.61	113.94	4.20	-1.90	2.97	0.69
0.61	113.92	4.15	-1.86	2.94	0.72
0.62	113.91	4.09	-1.81	2.90	0.75
0.63	113.90	4.03	-1.78	2.87	0.77

נספח B2 – שכבה 1, קורלציות

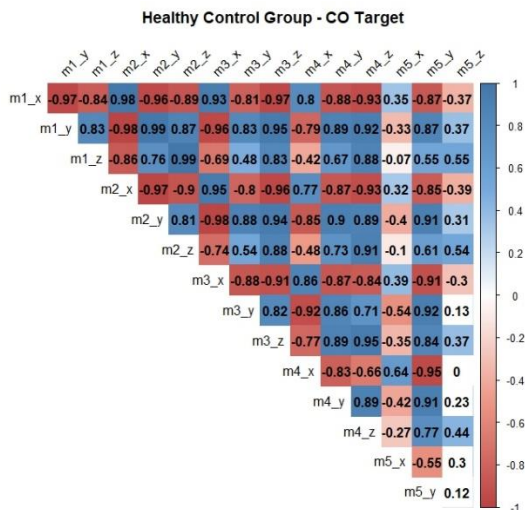
(1)



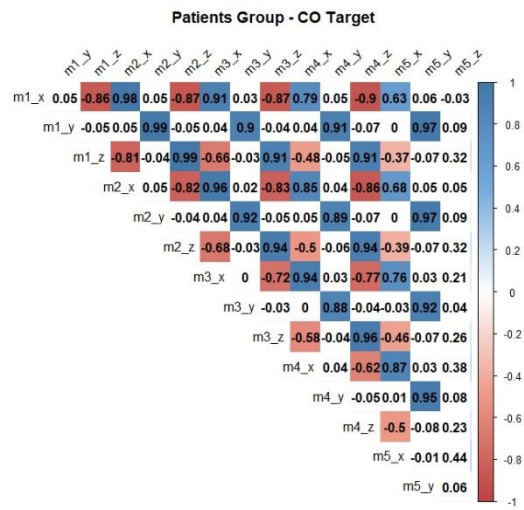
(4)



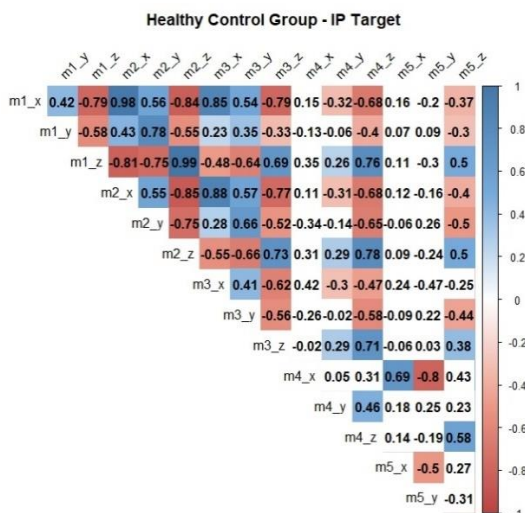
(2)



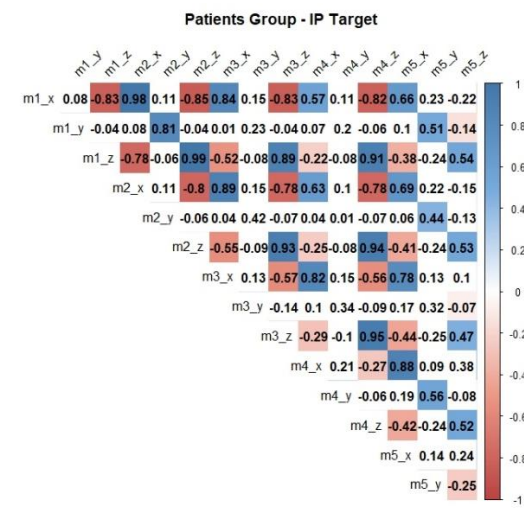
(5)



(3)



(6)



איור B.1 - שכבה 1, קורלציות ממוצעות

1-2: Mean correlation of the control and patients respectively in reaching toward to the NC target;
3-4: Mean correlation in reaching toward to the CO target; 5-6: Mean correlation in reaching toward to the IP target.

נספח B3 – שכבה 1, ממוצע מקדמי ההעמסה של קבוצת המטופלים

טבלה B.2 - ממוצעי מקדמי העמסה של קבוצת המטופלים

Var Name		PC1		PC2		PC3	
		mean	std	mean	std	mean	std
M1	X	0.280	0.000	-0.021	0.006	0.003	0.005
	Y	0.014	0.057	-0.005	0.012	-0.003	0.004
	Z	-0.247	0.001	0.163	0.018	0.011	0.005
M2	X	0.276	0.001	0.017	0.003	0.020	0.002
	Y	0.018	0.046	0.001	0.026	0.008	0.004
	Z	-0.252	0.000	0.154	0.016	0.010	0.002
M3	X	0.248	0.003	0.093	0.007	0.037	0.003
	Y	0.021	0.039	0.030	0.024	0.018	0.013
	Z	-0.249	0.005	0.105	0.011	0.037	0.002
M4	X	0.188	0.008	0.169	0.020	0.010	0.001
	Y	0.015	0.064	0.013	0.010	0.007	0.004
	Z	-0.255	0.001	0.114	0.011	0.031	0.003
M5	X	0.177	0.016	0.138	0.018	-0.017	0.002
	Y	0.031	0.062	-0.011	0.008	0.014	0.002
	Z	-0.047	0.024	0.215	0.032	-0.012	0.005

נספח B4 – שכבה 1, פלטים של מודל הרגרסיה

```

> lm1 <- lmer(PC1 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lm1)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: PC1
             Chisq Df Pr(>Chisq)
Target       9.9089  3   0.01936 *
Type        19.1529  1  1.207e-05 ***
Target:Type   2.6061  3   0.45643
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

איור B.2 - שכבה 1, PC1, תוצאות ANOVA

טבלה B.3 - שכבה 1, PC1, תוצאות מבחני פוסט-הוק

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,CO - Patient,CO	0.095	0.026	78.018	3.613	0.012
Control,CO - Control,FC	0.039	0.018	2909.403	2.158	0.378
Control,CO - Patient,FC	0.121	0.026	77.562	4.577	0.000
Control,CO - Control,IP	0.012	0.018	2910.181	0.660	0.998
Control,CO - Patient,IP	0.128	0.026	77.904	4.858	0.000
Control,CO - Control,NC	0.013	0.018	2909.568	0.697	0.997
Control,CO - Patient,NC	0.116	0.026	77.824	4.412	0.001
Patient,CO - Control,FC	-0.056	0.026	77.046	-2.129	0.406
Patient,CO - Patient,FC	0.025	0.012	2910.242	2.023	0.466
Patient,CO - Control,IP	-0.083	0.026	78.626	-3.145	0.046
Patient,CO - Patient,IP	0.033	0.013	2911.081	2.615	0.151
Patient,CO - Control,NC	-0.083	0.026	77.570	-3.135	0.047
Patient,CO - Patient,NC	0.021	0.013	2910.025	1.676	0.703
Control,FC - Patient,FC	0.081	0.026	76.593	3.094	0.053
Control,FC - Control,IP	-0.027	0.018	2909.943	-1.486	0.815
Control,FC - Patient,IP	0.089	0.026	76.933	3.377	0.024
Control,FC - Control,NC	-0.027	0.018	2909.341	-1.464	0.827
Control,FC - Patient,NC	0.077	0.026	76.854	2.930	0.081
Patient,FC - Control,IP	-0.108	0.026	78.169	-4.107	0.002
Patient,FC - Patient,IP	0.008	0.012	2909.745	0.606	0.999
Patient,FC - Control,NC	-0.108	0.026	77.115	-4.099	0.002
Patient,FC - Patient,NC	-0.004	0.012	2910.009	-0.341	1.000
Control,IP - Patient,IP	0.116	0.026	78.512	4.388	0.001
Control,IP - Control,NC	0.001	0.018	2909.498	0.032	1.000
Control,IP - Patient,NC	0.104	0.026	78.432	3.943	0.004
Patient,IP - Control,NC	-0.115	0.026	77.456	-4.381	0.001
Patient,IP - Patient,NC	-0.012	0.013	2910.018	-0.943	0.982
Control,NC - Patient,NC	0.104	0.026	77.377	3.935	0.004

```

> lml <- lmer(PC2 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lml)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

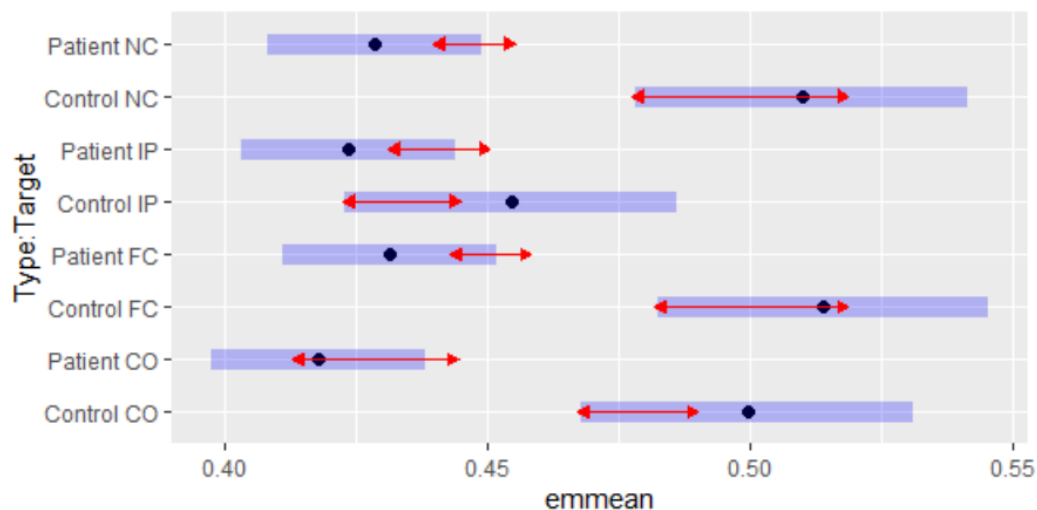
Response: PC2
              Chisq Df Pr(>Chisq)
Target       41.488  3  5.152e-09 ***
Type         15.017  1  0.0001065 ***
Target:Type  48.228  3  1.904e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

איור B.3 - שכבה 1, PC2, תוצאות ANOVA

טבלה B.4 - שכבה 1, PC2, תוצאות מבחני פוסט-הוק

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,NC - Patient,NC	0.082	0.019	51.20	4.365	0.0015
Control,NC - Control,FC	-0.014	0.007	2909.10	-1.953	0.5144
Control,NC - Patient,FC	0.068	0.019	51.10	3.639	0.0137
Control,NC - Control,CO	0.045	0.007	2909.30	6.063	<.0001
Control,NC - Patient,CO	0.076	0.019	51.10	4.057	0.004
Control,NC - Control,IP	-0.010	0.007	2909.10	-1.392	0.861
Control,NC - Patient,IP	0.071	0.019	51.10	3.793	0.0088
Patient,NC - Control,FC	-0.096	0.019	51.00	-5.137	0.0001
Patient,NC - Patient,FC	-0.014	0.005	2909.30	-2.703	0.122
Patient,NC - Control,CO	-0.037	0.019	51.30	-1.959	0.5188
Patient,NC - Patient,CO	-0.006	0.005	2909.60	-1.141	0.9477
Patient,NC - Control,IP	-0.092	0.019	51.10	-4.916	0.0002
Patient,NC - Patient,IP	-0.011	0.005	2909.30	-2.121	0.4016
Control,FC - Patient,FC	0.083	0.019	50.90	4.411	0.0013
Control,FC - Control,CO	0.059	0.007	2909.20	8.048	<.0001
Control,FC - Patient,CO	0.090	0.019	50.90	4.829	0.0003
Control,FC - Control,IP	0.004	0.007	2909.10	0.558	0.9993
Control,FC - Patient,IP	0.085	0.019	50.90	4.565	0.0008
Patient,FC - Control,CO	-0.023	0.019	51.20	-1.232	0.9182
Patient,FC - Patient,CO	0.008	0.005	2909.20	1.56	0.7744
Patient,FC - Control,IP	-0.078	0.019	51.00	-4.19	0.0026
Patient,FC - Patient,IP	0.003	0.005	2909.30	0.576	0.9992
Control,CO - Patient,CO	0.031	0.019	51.30	1.65	0.7179
Control,CO - Control,IP	-0.055	0.007	2909.10	-7.472	<.0001
Control,CO - Patient,IP	0.026	0.019	51.30	1.387	0.8591
Patient,CO - Control,IP	-0.086	0.019	51.00	-4.608	0.0007
Patient,CO - Patient,IP	-0.005	0.005	2909.30	-0.98	0.9773
Control,IP - Patient,IP	0.081	0.019	51.00	4.344	1.60E-03



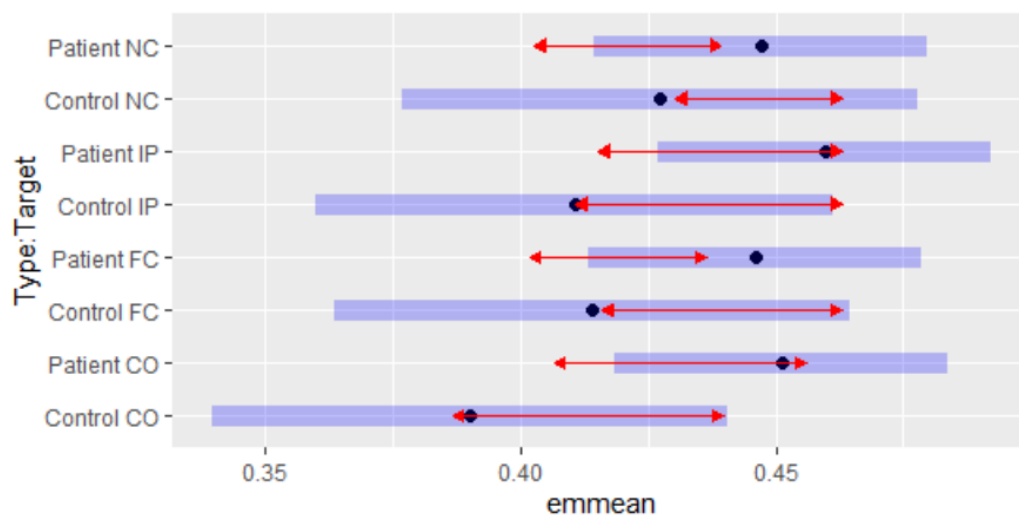
איור B.4 - שכבה 1, PC2, הבדלי הקבוצות ביחס למטרות השונות

The most difference between the groups can be seen on the FC target ($P=0.001$). the IP target have significant difference within the control group to all targets ($P<.001$) while the post-stroke subjects are likely equal.

```
> lm1 <- lmer(PC3 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lm1)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)
```

```
Response: PC3
          Chisq Df Pr(>Chisq)
Target      2.3632  3    0.5005
Type        2.0957  1    0.1477
Target:Type  5.7365  3    0.1252
```

איור B.5 - שכבה 1, PC3, תוצאות ANOVA

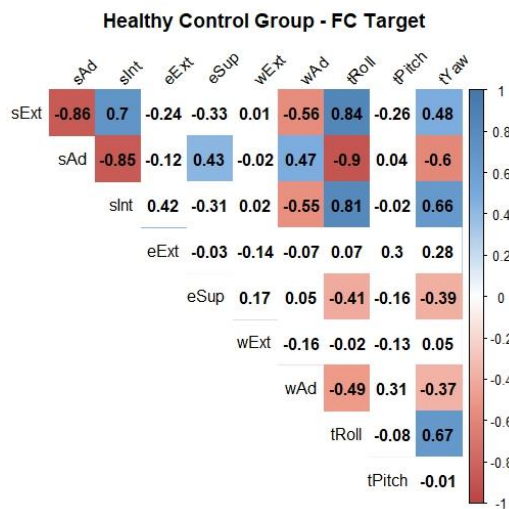


איור B.6 - שכבה 1, PC3, הבדלי הקבוצות ביחס למטרות השונות

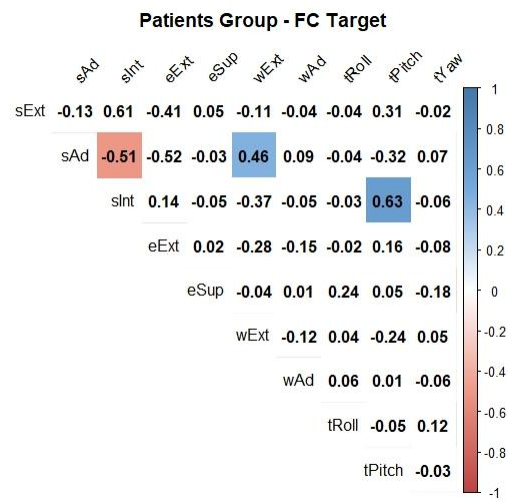
As we see almost all the line are on the same range what demonstrates the nonsignificant different between the groups, targets and their interaction.

נספח B5 – שכבה 2, קורלציות

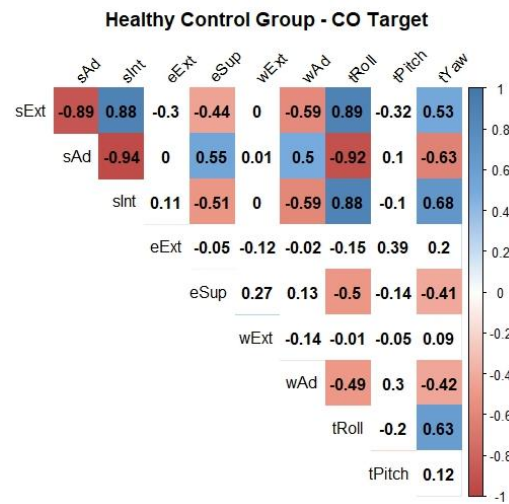
(1)



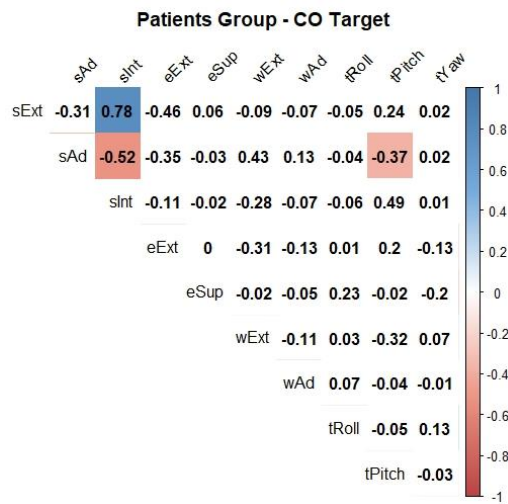
(4)



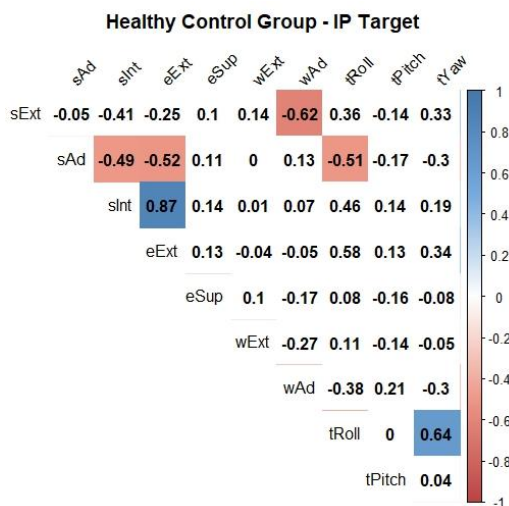
(2)



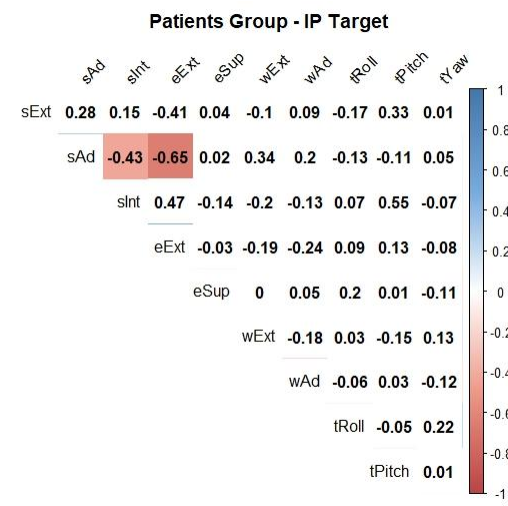
(5)



(3)



(6)



איור B.7 – שכבה 2, קורלציות ממוצעות לכל קבוצה

נספח B6 - שכבה 2, ממוצע מקדמי ההעמסה של קבוצת המטופלים

טבלה B.5 - ממוצע מקדמי עמסה של קבוצת המטופלים

Var Name		PC1		PC2		PC3	
		mean	std	mean	std	mean	std
Shoulder	sExt	0.289	0.017	-0.027	0.016	0.009	0.001
	sAd	-0.008	0.057	-0.126	0.013	0.005	0.001
	sInt	0.161	0.033	0.105	0.007	0.011	0.002
Elbow	eExt	-0.177	0.017	0.217	0.024	-0.003	0.002
	eSup	0.024	0.053	0.009	0.020	0.002	0.006
Wrist	wExt	-0.011	0.066	-0.043	0.007	0.002	0.004
	wAd	0.003	0.041	0.003	0.013	-0.010	0.005
Trunk	tRoll	-0.036	0.083	-0.002	0.011	0.004	0.001
	tPitch	0.065	0.055	0.096	0.011	-0.015	0.003
	tYaw	0.018	0.051	0.010	0.027	-0.001	0.002

נספח B7 - שכבה 2, פלטים של מודל הרגרסיה

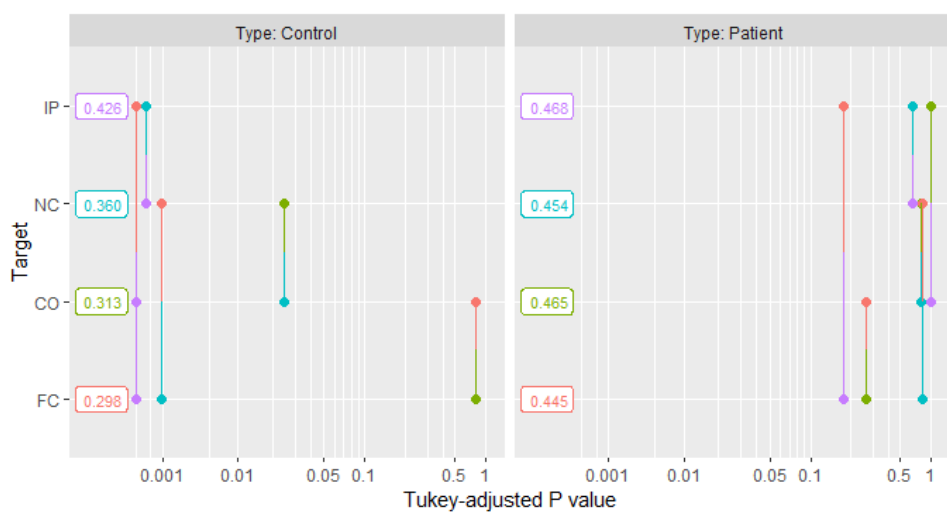
```
> lml <- lmer(PC1 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lml)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: PC1
              Chisq Df Pr(>Chisq)
Target      37.825  3  3.079e-08 ***
Type        13.089  1  0.0002971 ***
Target:Type  40.053  3  1.038e-08 ***
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

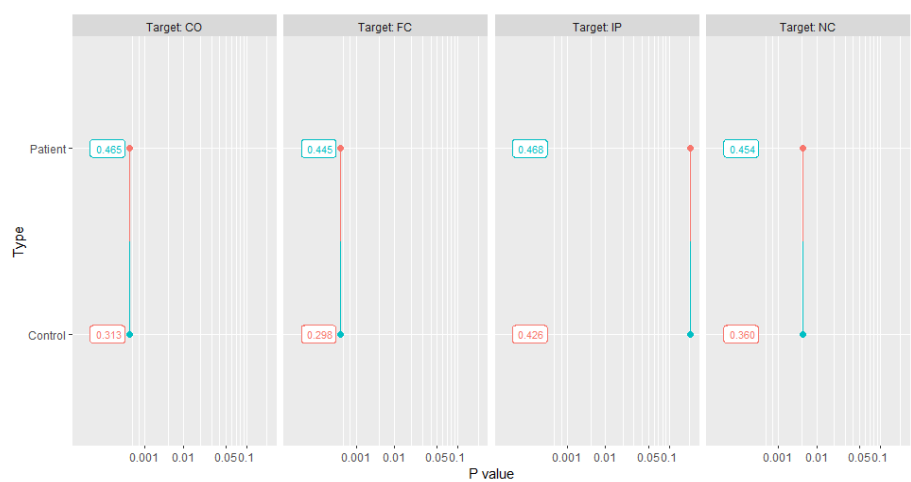
איור B.8 - שכבה 2, PC1, תוצאת ANOVA

טבלה B.6 - שכבה 2, PC1, תוצאות מבחן פוסט-הוק

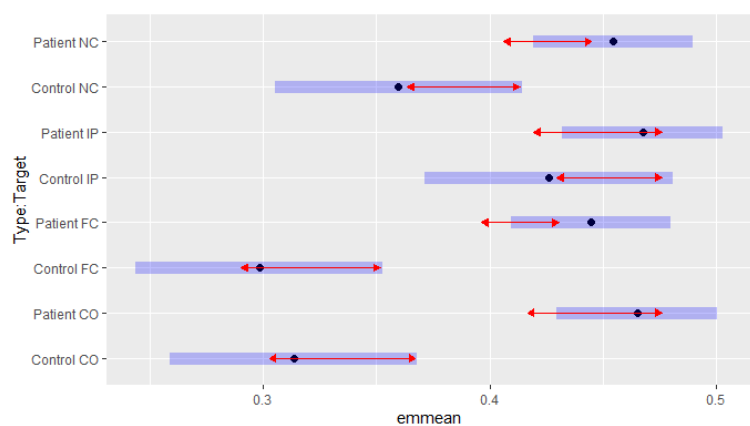
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,CO - Patient,CO	-0.152	0.0326	57.7	-4.665	0.0005
Control,CO - Control,FC	0.015	0.0164	2909.2	0.915	0.9847
Control,CO - Patient,FC	-0.131	0.0325	57.5	-4.043	0.0037
Control,CO - Control,IP	-0.113	0.0165	2909.5	-6.81	<.0001
Control,CO - Patient,IP	-0.154	0.0325	57.7	-4.74	0.0004
Control,CO - Control,NC	-0.046	0.0164	2909.2	-2.827	0.0888
Control,CO - Patient,NC	-0.141	0.0325	57.6	-4.338	0.0014
Patient,CO - Control,FC	0.167	0.0325	57.3	5.135	0.0001
Patient,CO - Patient,FC	0.020	0.0112	2909.6	1.816	0.6094
Patient,CO - Control,IP	0.039	0.0326	58	1.201	0.9283
Patient,CO - Patient,IP	-0.002	0.0113	2910	-0.212	1
Patient,CO - Control,NC	0.105	0.0325	57.5	3.24	0.039
Patient,CO - Patient,NC	0.011	0.0113	2909.5	0.949	0.9811
Control,FC - Patient,FC	-0.146	0.0325	57.1	-4.511	0.0008
Control,FC - Control,IP	-0.128	0.0164	2909.4	-7.765	<.0001
Control,FC - Patient,IP	-0.169	0.0325	57.3	-5.209	0.0001
Control,FC - Control,NC	-0.06146	0.0163	2909.1	-3.763	0.0042
Control,FC - Patient,NC	-0.15614	0.0325	57.2	-4.807	0.0003
Patient,FC - Control,IP	0.01877	0.0326	57.8	0.577	0.999
Patient,FC - Patient,IP	-0.02276	0.0112	2909.3	-2.033	0.4596
Patient,FC - Control,NC	0.08499	0.0325	57.4	2.615	0.1717
Patient,FC - Patient,NC	-0.00968	0.0112	2909.5	-0.865	0.989
Control,IP - Patient,IP	-0.04153	0.0326	57.9	-1.275	0.9044
Control,IP - Control,NC	0.06622	0.0165	2909.2	4.016	0.0016
Control,IP - Patient,NC	-0.02845	0.0326	57.9	-0.874	0.9873
Patient,IP - Control,NC	0.10776	0.0325	57.5	3.314	0.032
Patient,IP - Patient,NC	0.01308	1.12E-02	2909.5	1.163	0.9421
Control,NC - Patient,NC	-0.09468	0.0325	57.5	-2.912	0.0889



איור B.9 - שכבה 2, PC1, הבדלים פנים-קבוצתיים



איור B.10 - שכבה 2, PC1, הבדלים בין-קבוצתיים



איור B.11 - שכבה 2, PC1, הבדלים ביחס למטרות השונות


```

> lml <- lmer(PC2 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lml)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

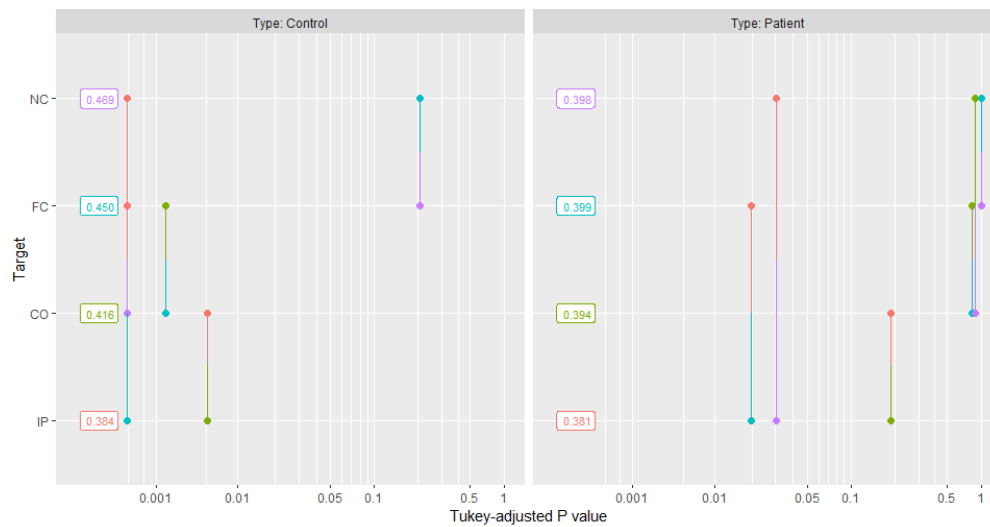
Response: PC2
              Chisq Df Pr(>Chisq)
Target        64.0247  3  8.109e-14 ***
Type          3.0865  1  0.07894 .
Target:Type   39.9681  3  1.082e-08 ***
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

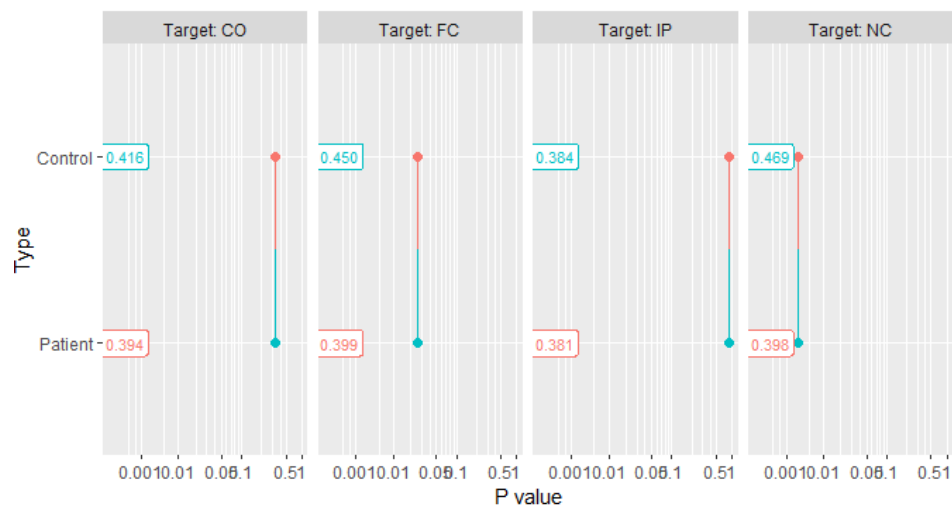
איור B.12 - שכבה 2, PC2, תוצאות ANOVA

טבלה B.7 - שכבה 2, PC2, הבדלים פנים-קבוצתיים

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,CO - Patient,CO	0.02206	0.02224	52.9	0.992	0.9737
Control,CO - Control,FC	-0.03471	0.00949	2909.1	-3.658	0.0063
Control,CO - Patient,FC	0.01633	0.02223	52.8	0.735	0.9955
Control,CO - Control,IP	0.03175	0.00958	2909.4	3.313	0.021
Control,CO - Patient,IP	0.03514	0.02224	52.8	1.58	0.7595
Control,CO - Control,NC	-0.05317	0.00952	2909.2	-5.585	<.0001
Control,CO - Patient,NC	0.01723	0.02223	52.8	0.775	0.9937
Patient,CO - Control,FC	-0.05677	0.02221	52.6	-2.556	0.1956
Patient,CO - Patient,FC	-0.00573	0.0065	2909.4	-0.881	0.9878
Patient,CO - Control,IP	0.00969	0.02226	53	0.435	0.9998
Patient,CO - Patient,IP	0.01308	0.00653	2909.7	2.003	0.4801
Patient,CO - Control,NC	-0.07523	0.02223	52.8	-3.384	0.0274
Patient,CO - Patient,NC	-0.00483	0.00653	2909.3	-0.74	0.9958
Control,FC - Patient,FC	0.05105	0.0222	52.5	2.299	0.3134
Control,FC - Control,IP	0.06647	0.00952	2909.3	6.98	<.0001
Control,FC - Patient,IP	0.06986	0.02221	52.6	3.145	0.0514
Control,FC - Control,NC	-0.01845	0.00946	2909.1	-1.951	0.5156
Control,FC - Patient,NC	0.05195	0.02221	52.6	2.339	0.2927
Patient,FC - Control,IP	0.01542	0.02225	52.9	0.693	0.9968
Patient,FC - Patient,IP	0.01881	0.00649	2909.2	2.9	0.0729
Patient,FC - Control,NC	-0.0695	0.02221	52.6	-3.128	0.0536
Patient,FC - Patient,NC	0.0009	0.00648	2909.3	0.139	1
Control,IP - Patient,IP	0.00339	0.02226	53	0.152	1
Control,IP - Control,NC	-0.08492	0.00955	2909.1	-8.892	<.0001
Control,IP - Patient,NC	-0.01452	0.02225	53	-0.652	0.9978
Patient,IP - Control,NC	-0.08831	0.02223	52.7	-3.973	0.005
Patient,IP - Patient,NC	-0.01791	0.00651	2909.3	-2.75	0.1083
Control,NC - Patient,NC	0.0704	0.02222	52.7	3.168	0.0485



איור B.13 - שכבה 2, PC1, הבדלים פנים-קבוצתיים



איור B.14 - שכבה 2, PC2, הבדלים בין-קבוצתיים

PC3

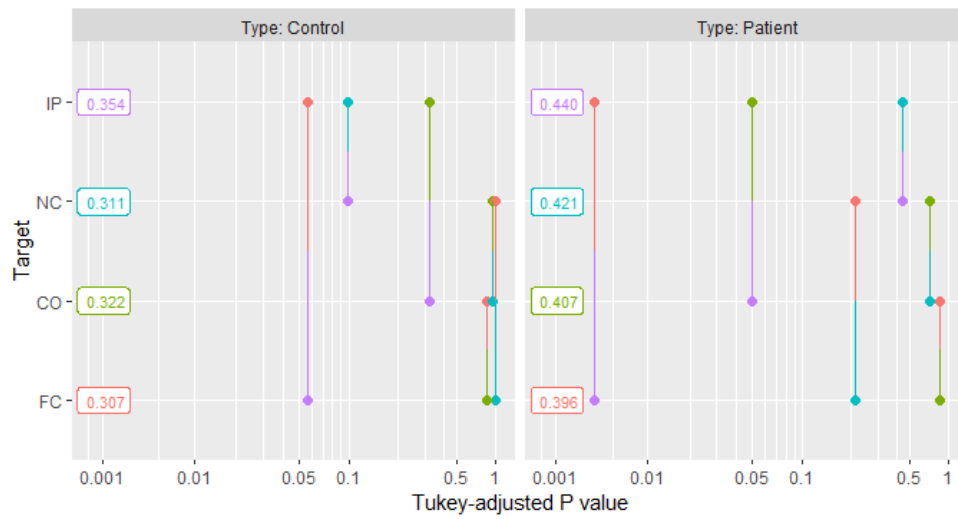
```
> lm1 <- lmer(PC3 ~ Target*Type + (1|ID), data = data)
> Anova(lm1)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)
```

```
Response: PC3
          Chisq Df Pr(>Chisq)
Target    19.3716  3  0.0002290 ***
Type      12.1287  1  0.0004965 ***
Target:Type 1.6113  3  0.6568375
```

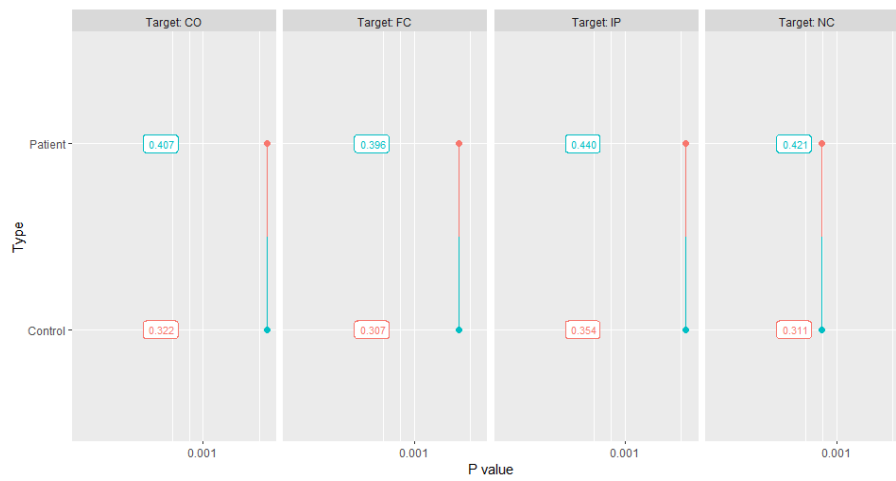
```
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

איור B.15 - שכבה 2, PC3, תוצאות ANOVA

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,CO - Patient,CO	-0.0851	0.03	68.2	-2.839	0.1023
Control,CO - Control,FC	0.01493	0.0185	2909.3	0.806	0.9928
Control,CO - Patient,FC	-0.07433	0.0299	67.9	-2.483	0.2206
Control,CO - Control,IP	-0.03193	0.0187	2909.9	-1.707	0.6826
Control,CO - Patient,IP	-0.11791	0.03	68.1	-3.935	0.0046
Control,CO - Control,NC	0.01097	0.0186	2909.4	0.59	0.999
Control,CO - Patient,NC	-0.09884	0.03	68.1	-3.299	0.0314
Patient,CO - Control,FC	0.10003	0.0299	67.5	3.346	0.0277
Patient,CO - Patient,FC	0.01077	0.0127	2909.9	0.849	0.9902
Patient,CO - Control,IP	0.05316	0.03	68.7	1.771	0.6416
Patient,CO - Patient,IP	-0.03282	0.0127	2910.6	-2.574	0.1657
Patient,CO - Control,NC	0.09607	0.0299	67.9	3.208	0.0403
Patient,CO - Patient,NC	-0.01375	0.0127	2909.8	-1.079	0.9611
Control,FC - Patient,FC	-0.08926	0.0299	67.2	-2.989	0.0714
Control,FC - Control,IP	-0.04686	0.0186	2909.7	-2.522	0.1866
Control,FC - Patient,IP	-0.13285	0.0299	67.5	-4.444	0.0008
Control,FC - Control,NC	-0.00396	0.0185	2909.2	-0.215	1
Control,FC - Patient,NC	-0.11378	0.0299	67.4	-3.807	0.007
Patient,FC - Control,IP	0.0424	0.03	68.3	1.414	0.8479
Patient,FC - Patient,IP	-0.04359	0.0127	2909.6	-3.443	0.0135
Patient,FC - Control,NC	0.0853	0.0299	67.6	2.852	0.0993
Patient,FC - Patient,NC	-0.02451	0.0127	2909.8	-1.938	0.525
Control,IP - Patient,IP	-0.08598	0.03	68.6	-2.864	0.0963
Control,IP - Control,NC	0.0429	0.0186	2909.4	2.302	0.2929
Control,IP - Patient,NC	-0.06691	0.03	68.5	-2.23	0.3476
Patient,IP - Control,NC	0.12888	0.0299	67.8	4.306	0.0014
Patient,IP - Patient,NC	0.01907	0.0127	2909.8	1.501	0.8074
Control,NC - Patient,NC	-0.10981	0.0299	67.8	-3.669	0.0107



איור B.16 - שכבה 2, PC3, הבדלים פנים-קבוצתיים



איור B.17 - שכבה 2, PC3, הבדלים בין-קבוצתיים

נספח C1 – תבניות תנועה לעבר המטרות המרכזיות

Movement patterns to the center targets (near, far) in the stroke group shows as differences from the control group in the

טבלה B.9 - הבדלי המדדים בין המטרות הקרובות

Target-Group Measure	Controls difference from subjects with stroke			
	NC, Healthy – NC, Patient	NC, Healthy – FC, Patient	FC, Healthy – NC, Patient	FC, Healthy – FC, Patient
Time [sec]	-0.999**	-1.072**	-0.968*	-1.04**
IC score	0.06	0.056	0.07	0.066
MTVW [mm/sec ²]	14.271***	12.397**	17.187***	15.313***
tRPL [mm]	-8.27*	-12.447**	-6.9°	-11.077**
tRFA [deg]	-10.733***	-10.495***	-9.368**	-9.13**
tPPL [mm]	-7.015	-9.989**	-6.789	-9.463*
tPFA [deg]	-3.656	-7.773	-3.112	-7.229
tYPL [mm]	-7.166*	-8.891**	-6.87*	-8.595**
tYFA [deg]	9.557***	9.719***	9.359**	9.521***
tFDPL [cm]	-9.446***	-11.935***	-9.276***	-11.765***
paPL [mm]	-7.048	-10.21	-5.172	-8.334
paFA [deg]	-7.267	-6.298	-5.854	-4.886
paNPTV	-0.863	-1.147	-0.383	-0.667

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '°' 0.1 '' 1
Significance values are for the difference NC target from FC target.

נספח C2 – תבניות תנועה לעבר המטרות הרחוקות

טבלה B.10 - הבדלי המדדים בין המטרות הרחוקות

Target-Group Measure	Within healthy control difference		Within patients' difference		Healthy differences from patients			
	FC, Healthy – CO, Healthy	FC, Healthy – IP, Healthy	FC, Patient – CO, Patient	FC, Patient – IP, Patient	FC, Healthy – CO, Patient	FC, Healthy – IP, Patient	CO, Healthy – CO, Patient	IP, Healthy – IP, Patient
Time [sec]	-0.017	0.012	-0.097***	0.008	-1.138***	-1.04**	-1.023**	-1.045**
IC score	0.003	0.011	-0.012	0.012*	-0.062	0.078	0.049	0.067
MTVW [mm/sec2]	-2.425***	5.533***	-0.415	1.631***	14.898***	16.944***	17.323***	11.422**
tRPL [mm]	-2.681***	2.007**	-3.524***	4.049***	-14.601***	-7.028°	-11.92**	-9.035**
tRFA [deg]	-3.551***	3.966***	0.392	0.966	-8.738**	-8.165**	-5.187	-12.131***
tPPL [mm]	-0.643	0.802	-1.268	0.908	-10.731**	-8.555*	-10.088**	-9.357*
tPFA [deg]	0.418	-0.102	0.778	0.497	-6.451	-6.732	-6.869	-6.349
tYPL [mm]	-0.639	0.993	-1.829***	0.563	-10.424***	-8.031**	-9.785**	-9.587**
tYFA [deg]	-0.224	0.328	-0.415	0.612°	9.106**	10.133***	9.128**	9.8052***
tFDPL [cm]	-0.044	0.204	0.246	0.402	-11.519***	-11.363***	-11.474***	-11.567***
paPL [mm]	1.158	-4.389***	-0.797	-2.249**	-9.13	-10.583	-10.288	-6.195
paFA [deg]	2.073**	-8.245***	0.359	0.244	-4.527	-4.642	-6.6	3.603
paNPTV	0.162	0.671**	-0.156	0.355°	-0.823	-0.311	-0.986	-0.982

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '°' 0.1 '°' 1

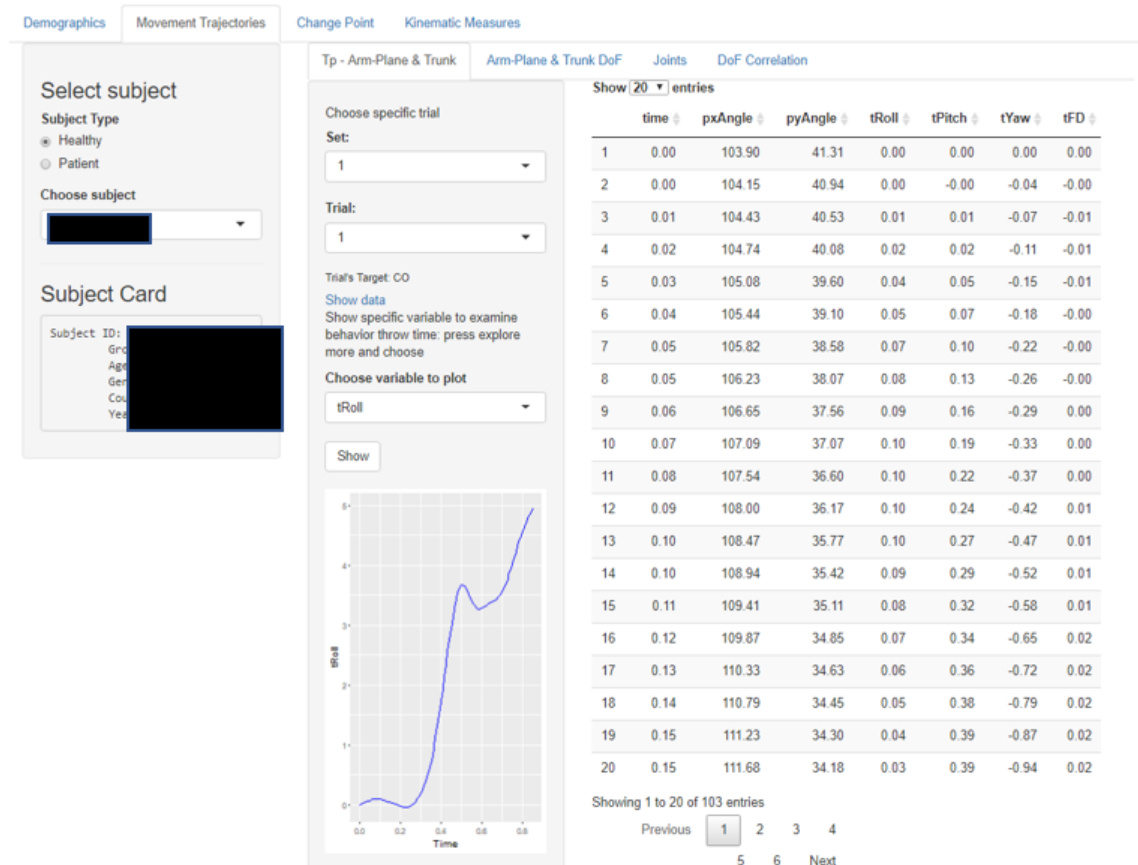
נספח D1 – ממשק ה-Shiny

ממשק Shiny הינו כלי מבוסס WEB המאפשר הצגת נתונים בצורה אינטראקטיבית ונוחה לתצוגה. ממשק זה פותח כחלק ממחקר זה לצורך הצגת, חקירת, מידול וראייה רחבה של מירב נתוני הפרויקט. מפאת חישובים רבים המתבצעים בפרויקט כמות הנתונים עולה ומכאן עולה הקושי במבט על.

בחלונית הראשונה, Demographics, מוצגים נתונים דמוגרפיים של הנבדקים הכוללים ממוצע גילאים, התפלגות מדינות ומין הנבדקים. כמו כן, מוצגים בטבלה פירוט הנתונים של כלל הנבדקים. חלונית זו הינה לשימוש פנימי של החוקרים.

החלונית השנייה, Movement Trajectories, מתייחסת למסלולי התנועה כאשר בחלונית הראשונה מוצג המידע אודות מסלולי התנועה של שלוש רוטציות הגו, תנועתו קדימה ושל זווית מישור היד. יש לבחור קבוצה ונבדק ספציפי ועבורו כל המידע בחלונית זו יופיע. כמו כן, לאחר בחירת הנבדק יופיעו בכרטיס הנבדק פרטיו הדמוגרפיים בעוד עבור לנבדקים מקבוצת המטופלים יופיע גם המדדים הקליניים שלו והיד הפגועה.

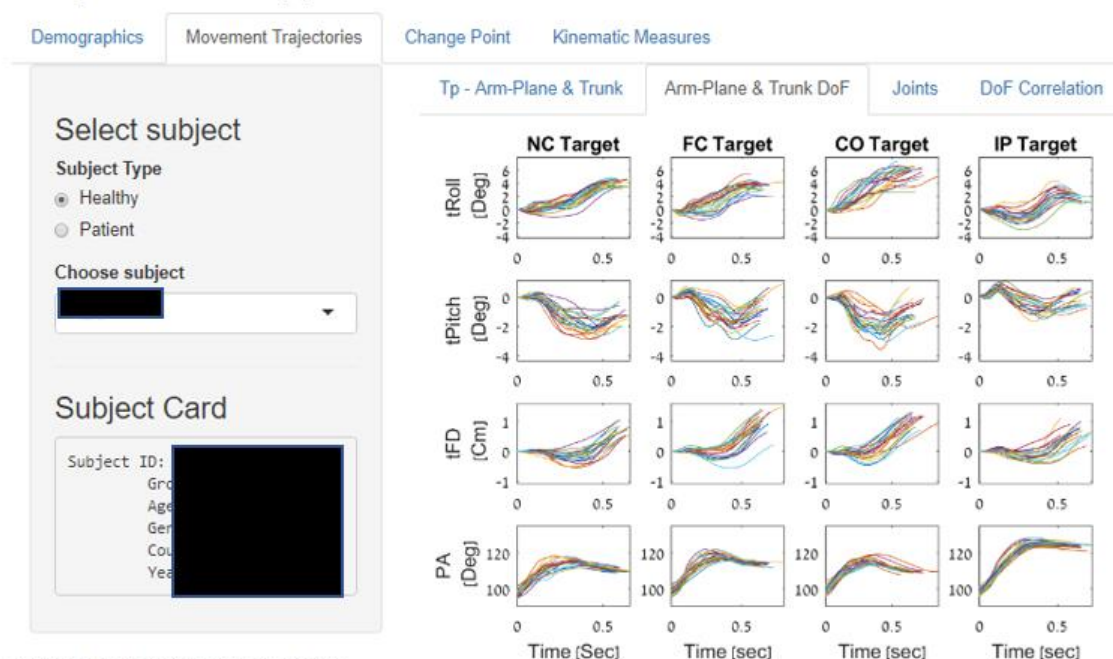
Subjects Data Application



בתת החלונית הראשונה, Tp Arm-plane & Trunk, ניתן לעיין במסלולי התנועה שחושבו. אזכיר כי החישוב בוצע עבור יחידת זמן בכל חזרה של משימת ההושטה-תפיסה. לפיכך, המידע המוצג שייך לחזרה בודדת וניתן לבחור מבין ביצועי הנבדק את החזרה הרצויה. כמו כן, המטרה אליה מבוצעת המשימה נרשמת באופן אוטומטי וכן, ניתן לבחור משתנה ספציפי לתצוגה גרפית (הגרף הכחול) שלו כפונקציה של הזמן.

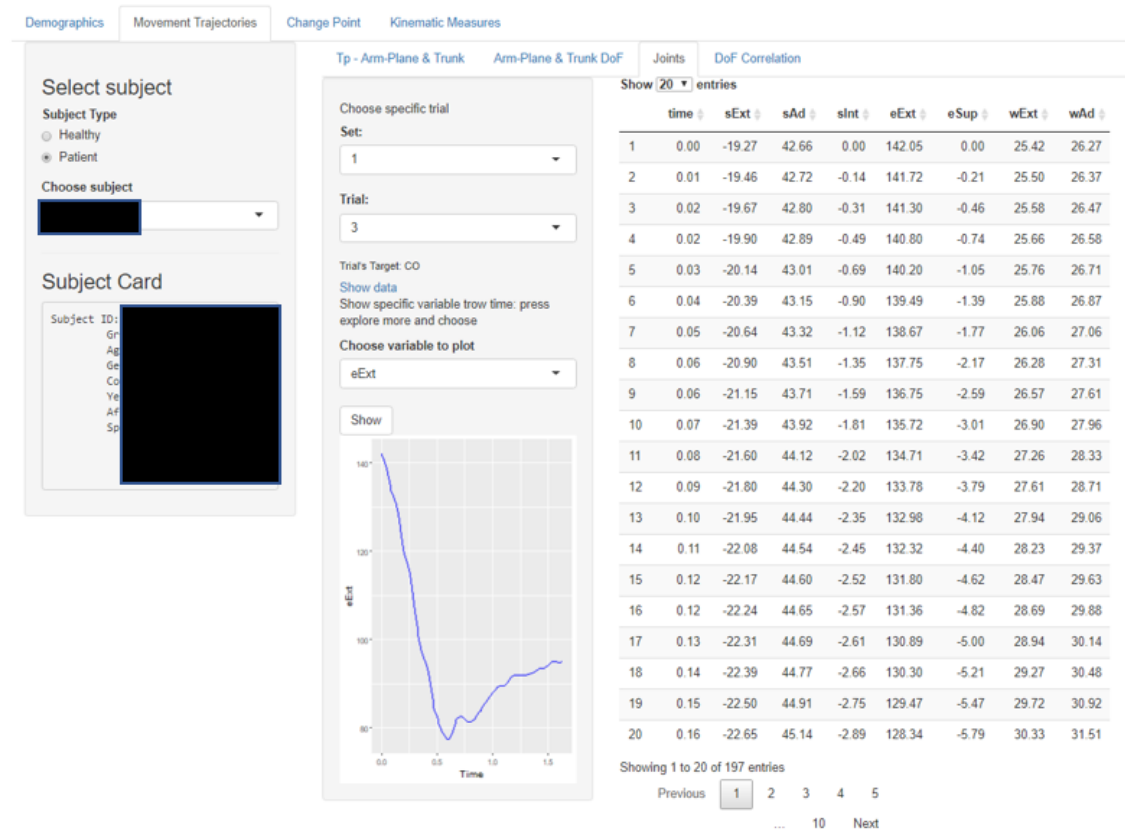
בתת החלונית השנייה, Arm-plane & TP DoF, מוצג גרף מסלולי התנועה כפי שמופיע בפרק 4, פרק התוצאות, המציג את כלל החזרות של נבדק לפי חלוקה למטרות כאשר כל קו מייצג חזרה בודדת של משימת ההושטה-תפיסה מה שמאפשר ללמוד מהם על ההבדלים בין תנועות הנבדקים בצורה מגמתית.

Subjects Data Application



בתת החלונית השלישית, Joints, מוצגים מסלולי שבע דרגות החופש של הכתף, המרפק ושורש כף היד. באופן דומה לתת חלונית הראשונה, יש לבחור מבין ביצועי הנבדק את החזרה הרצויה. כמו כן, המטרה אליה מבוצעת המשימה נרשמת באופן אוטומטי וכן, ניתן לבחור משתנה ספציפי לתצוגה גרפית (הגרף הכחול) שלו כפונקציה של הזמן.

Subjects Data Application



בתת החלונית הרביעית, DoF Correlation, מוצגות הקורלציות הממוצעת של מטרה מסוימת שנבחרה אל מול הקורלציות של חזרה בודדת שנבחרה. המטרה כאן היא היכולת להפיק נתונים אלה בלחיצת כפתור עבור סט של נבדקים.

Subjects Data Application



בחלונת השלישית, Change point, נסקרות התוצאות משלב זה במחקר. ניתן לבחור את שכבת הנתונים הרצויה ועבורה יוצג כל המידע שיפורט עבור ארבע תתי-החלונות.

Subjects Data Application

Demographics Movement Trajectories Change Point Kinematic Measures

Choose Layer of the data:

☒ Layer 1 ☐ Layer 2

PCA

Segmented Regression

Explore more

Breakpoints Analysis

Healthy

Show 25 entries

PC1_mean	PC1_var	PC2_mean	PC2_var	PC3_mean	PC3_var
0.29	0.00	-0.02	0.00	-0.02	0.00
-0.19	0.00	0.01	0.01	-0.02	0.00
-0.25	0.00	0.17	0.01	0.02	0.00
0.29	0.00	-0.03	0.00	-0.02	0.00
-0.18	0.00	-0.03	0.00	-0.02	0.00
-0.26	0.00	0.15	0.01	0.00	0.00
0.26	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01
-0.12	0.01	-0.13	0.01	0.03	0.00
-0.27	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
0.14	0.01	0.20	0.01	-0.03	0.00
-0.22	0.00	-0.07	0.01	-0.03	0.00
-0.25	0.01	0.09	0.01	-0.01	0.00
0.07	0.03	0.15	0.01	-0.06	0.02
-0.17	0.01	-0.16	0.01	0.01	0.01
-0.14	0.02	0.12	0.01	0.04	0.01

Showing 1 to 15 of 15 entries

Ayelet Davidi, Reaserch thesis vizualization

Previous

1

Next

Patients

Show 25 entries

PC1_mean	PC1_var	PC2_mean	PC2_var	PC3_mean	PC3_var
0.29	0.00	-0.02	0.00	-0.02	0.00
-0.19	0.00	0.01	0.01	-0.02	0.00
-0.25	0.00	0.17	0.01	0.02	0.00
0.29	0.00	-0.03	0.00	-0.02	0.00
-0.18	0.00	-0.03	0.00	-0.02	0.00
-0.26	0.00	0.15	0.01	0.00	0.00
0.26	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01
-0.12	0.01	-0.13	0.01	0.03	0.00
-0.27	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
0.14	0.01	0.20	0.01	-0.03	0.00
-0.22	0.00	-0.07	0.01	-0.03	0.00
-0.25	0.01	0.09	0.01	-0.01	0.00
0.07	0.03	0.15	0.01	-0.06	0.02
-0.17	0.01	-0.16	0.01	0.01	0.01
-0.14	0.02	0.12	0.01	0.04	0.01

Showing 1 to 15 of 15 entries

Previous

1

Next

בחלונית הראשונה, ממוצעי וסטיות תקן של מקדמי ההעמסה של קבוצה מוצגים בטבלה, בחלונית השנייה, ניתן לראות את ערכי נקודות השינוי הגולמיות שחושבו עבור כל משתנה בשכבת הנתונים המתאימה ועבור רכיבי ה-PC. נוסף לנתונים אלה, Boxplot המחולק לפי מטרה וקבוצה מוצג.

Subjects Data Application

Demographics Movement Trajectories Change Point Kinematic Measures

Choose Layer of the data:

☒ Layer 1 ☐ Layer 2

PCA

Segmented Regression

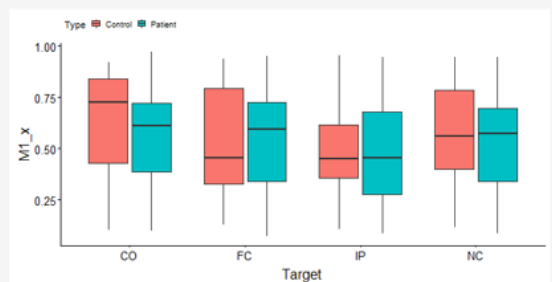
Explore more

Breakpoints Analysis

Summary result

Choose variable:

M1_x



Show 10 entries

Search:

ID	Type	Set	Trial	Target	M1_x	M1_y	M1_z	M2_x	M2_y	M2_z	M3_x	M3_y	M3_z	M4_x	M4_y	M4_z	M5_x	M5_y	M5_z	PC1	PC2	PC3
Control	1	10	FC		0.63	0.21	0.44	0.78	0.26	0.44	0.26	0.49	0.31	0.48	0.71	0.39	0.60	0.39	0.48	0.77	0.45	0.20
Control	1	11	NC		0.90	0.21	0.42	0.83	0.29	0.48	0.31	0.60	0.26	0.57	0.83	0.41	0.70	0.50	0.46	0.84	0.53	0.35
Control	1	12	IP		0.84	0.74	0.42	0.76	0.62	0.47	0.26	0.61	0.80	0.52	0.68	0.86	0.67	0.40	0.75	0.66	0.39	0.38
Control	1	13	NC		0.81	0.23	0.44	0.77	0.26	0.47	0.30	0.58	0.32	0.54	0.82	0.41	0.62	0.38	0.42	0.74	0.43	0.74
Control	1	14	IP		0.31	0.69	0.38	0.75	0.65	0.41	0.24	0.66	0.18	0.47	0.84	0.33	0.63	0.35	0.66	0.68	0.42	0.33
Control	1	15	CO		0.70	0.78	0.39	0.66	0.21	0.43	0.81	0.42	0.35	0.38	0.57	0.33	0.45	0.31	0.38	0.70	0.41	0.70
Control	1	16	FC		0.86	0.25	0.47	0.81	0.29	0.49	0.29	0.54	0.33	0.52	0.69	0.42	0.61	0.40	0.44	0.81	0.49	0.74
Control	1	17	NC		0.76	0.74	0.42	0.70	0.20	0.48	0.24	0.54	0.24	0.48	0.73	0.81	0.62	0.40	0.59	0.69	0.48	0.37
Control	1	18	FC		0.30	0.24	0.45	0.86	0.35	0.50	0.29	0.60	0.23	0.51	0.75	0.38	0.64	0.42	0.40	0.88	0.52	0.85
Control	1	19	IP		0.41	0.78	0.47	0.19	0.60	0.50	0.34	0.71	0.32	0.55	0.94	0.44	0.70	0.41	0.47	0.69	0.46	0.34

Showing 1 to 10 of 2,960 entries

Ayelet Davidi, Reaserch thesis vizualization

Previous

1

2

3

4

5

...

296

Next

בחלונית הבאה ניתן לבחור חזרה של נבדק ספציפי ולעיין בגרף התאמת נקודת השינוי המציג הן את פיזור הערכים ואת את הישר למקוטעין שהותאם.

Subjects Data Application

Demographics Movement Trajectories Change Point Kinematic Measures

Choose Layer of the data:

☒ Layer 1 ☐ Layer 2

PCA Segmented Regression Explore more Breakpoints Analysis

Group:

☒ Healthy
☐ Patient

Select Subject:

[Redacted]

Set:

1

Trial:

1

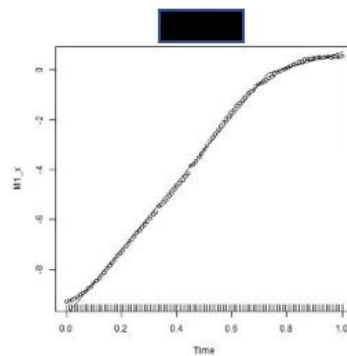
Select

Select

Select Variable

M1_x

GO



Ayelet Davidi, Research thesis visualization

בחלונית הבאה נבחנת השפעת הקבוצה והמטרה על ערכי נקודות השינוי.

Subjects Data Application

Demographics
Movement Trajectories
Change Point
Kinematic Measures

Choose Layer of the data:
☐ Layer 1 ☒ Layer 2

PCA
Segmented Regression
Explore more
Breakpoints Analysis

Select Variable
PC1
Fit Diffs

Model
[1] "PC1-Type*Target + (1|ID)"
Anova results
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)
Response: PC1

	Chisq	DF	Pr(>Chisq)
Type	13.1	1	3e-04 ***
Target	37.8	3	3.1e-08 ***
Type:Target	40.0	3	1.0e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Post-hoc Differences

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Control,CO - Patient,CO	-0.1518	0.0325	58	-4.670	<.0001
Control,CO - Control,FC	0.0150	0.0164	2909	0.910	0.9850
Control,CO - Patient,FC	-0.1315	0.0325	58	-4.040	0.0040
Control,CO - Control,IP	-0.1127	0.0165	2910	-6.810	<.0001
Control,CO - Patient,IP	-0.1542	0.0325	58	-4.740	<.0001
Control,CO - Control,NC	-0.0465	0.0164	2909	-2.830	0.0090
Control,CO - Patient,NC	-0.1411	0.0325	58	-4.340	0.0010
Patient,CO - Control,FC	0.1658	0.0325	57	5.130	<.0001
Patient,CO - Patient,FC	0.0204	0.0112	2910	1.820	0.6090
Patient,CO - Control,IP	0.0391	0.0326	58	1.200	0.9280
Patient,CO - Patient,IP	-0.0024	0.0113	2910	-0.210	1.0000
Patient,CO - Control,NC	0.1054	0.0325	58	3.240	0.0390
Patient,CO - Patient,NC	0.0107	0.0113	2909	0.950	0.9810
Control,FC - Patient,FC	-0.1465	0.0325	57	-4.510	0.0010
Control,FC - Control,IP	-0.1277	0.0164	2909	-7.770	<.0001
Control,FC - Patient,IP	-0.1692	0.0325	57	-5.210	<.0001
Control,FC - Control,NC	-0.0615	0.0163	2909	-3.760	0.0040
Control,FC - Patient,NC	-0.1561	0.0325	57	-4.810	<.0001
Patient,FC - Control,IP	0.0188	0.0326	58	0.580	0.9990
Patient,FC - Patient,IP	-0.0228	0.0112	2909	-2.030	0.4600
Patient,FC - Control,NC	0.0850	0.0325	57	2.620	0.1720
Patient,FC - Patient,NC	-0.0097	0.0112	2909	-0.860	0.9890
Control,IP - Patient,IP	-0.0415	0.0326	58	-1.270	0.9040
Control,IP - Control,NC	0.0062	0.0165	2909	4.020	0.0020
Control,IP - Patient,NC	-0.0285	0.0326	58	-0.870	0.9870
Patient,IP - Control,NC	0.1078	0.0325	57	3.310	0.0320
Patient,IP - Patient,NC	0.0131	0.0112	2909	1.160	0.9420
Control,NC - Patient,NC	-0.0947	0.0325	57	-2.910	0.0090

P value adjustment: tukey method for comparing a family of 8 estimates

Ayelet Davidi, Reaserch thesis vizualization

בחלונות, Kinematic Measures, אלה הם מדדי התנועה ניתן לראות חלוקה לשתי תתי-חלונות, תנועה המלאה ותנועה המחולקת כאשר בשניהם ניתן לבחור משתנה אליו מבוצעת התאמה של מודל מעורב כפי שמוצג בשורה העליונה, תוצאות מובהקות הגורמים מוצגים כחלק מפלט מבחן ה Anova וכן מוצגים ההבדלים בין הקבוצות השונות.

בתנועה המלאה ההבדלים מוצגים ביחס לקבוצות במיצוע על פני ארבעת המטרות ובנוסף ביחס למטרות השונות.

Subjects Data Application

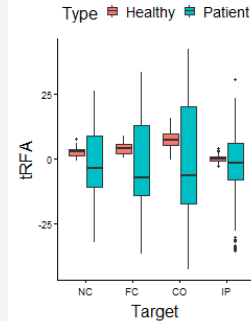
Demographics Movement Trajectories Change Point Kinematic Measures

Whole movement Segmented movement

Select Variable

IRFA

Fit Model Diffs



Model

[1] "trFA~Type*Target + Gender + Affected_Side + (Country|ID)"

Anova results

Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: trFA

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Type	51.26	1	8.1e-13 ***
Target	71.49	3	2.0e-15 ***
Gender	0.38	1	0.54
Affected_Side	298.64	1	< 2e-16 ***
Type:Target	103.73	3	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value
Type	1	77	77	1.85
Target	3	2934	978	23.60
Gender	1	266	266	6.43
Affected_Side	1	12384	12384	298.88
Type:Target	3	4298	1433	34.58

Post-hoc Differences

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-7.72	1.18	34.4	-6.538	<.0001

Results are averaged over the levels of: Target, Gender, Affected_Side

Target = NC:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-9.16	1.26	46.7	-7.278	<.0001

Target = FC:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-7.56	1.26	46.4	-6.008	<.0001

Target = CO:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-3.62	1.26	47.0	-2.868	0.0062

Target = IP:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-10.56	1.26	47.1	-8.368	<.0001

Results are averaged over the levels of: Gender, Affected_Side

בעוד מטה, מוצגים תרשימי ההבדלים

Target = NC:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-9.16	1.26	46.7	-7.278	<.0001

Target = FC:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-7.56	1.26	46.4	-6.008	<.0001

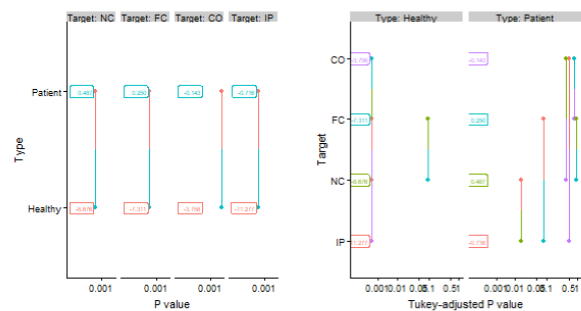
Target = CO:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-3.62	1.26	47.0	-2.868	0.0062

Target = IP:

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy - Patient	-10.56	1.26	47.1	-8.368	<.0001

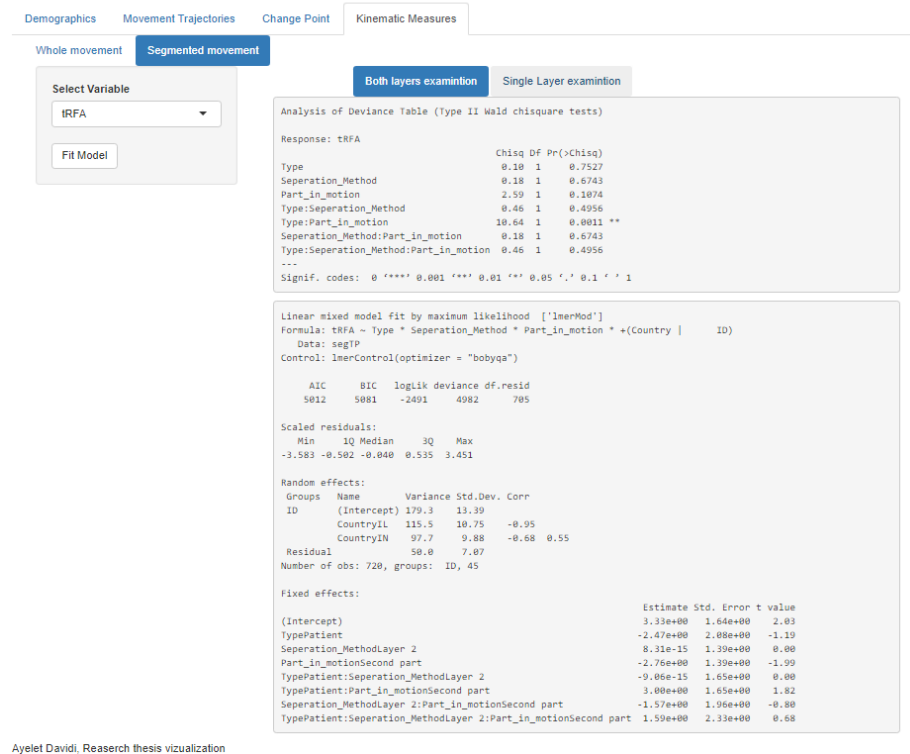
Results are averaged over the levels of: Gender, Affected_Side



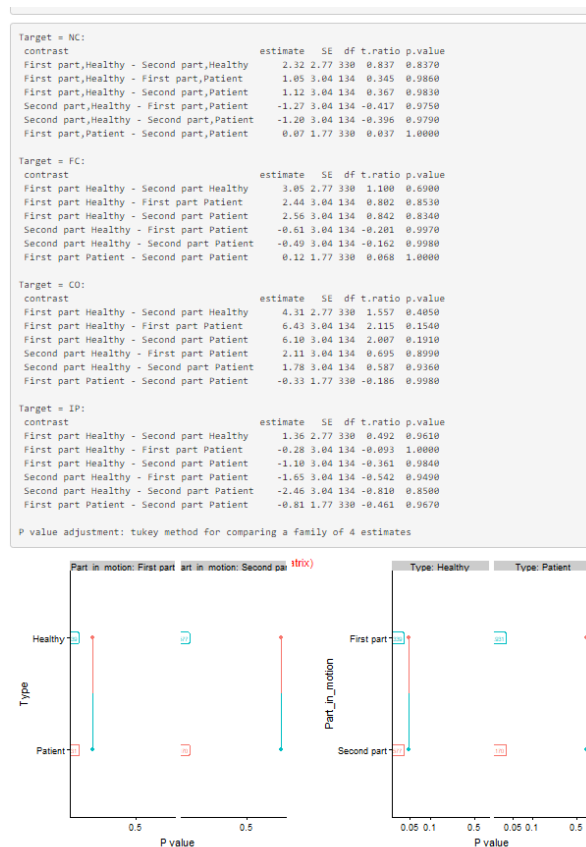
Ayelet Davidi, Reaserch thesis vizualization

בבחינת התנועה המחולקת נבחנו תחילה השכבות יחד,

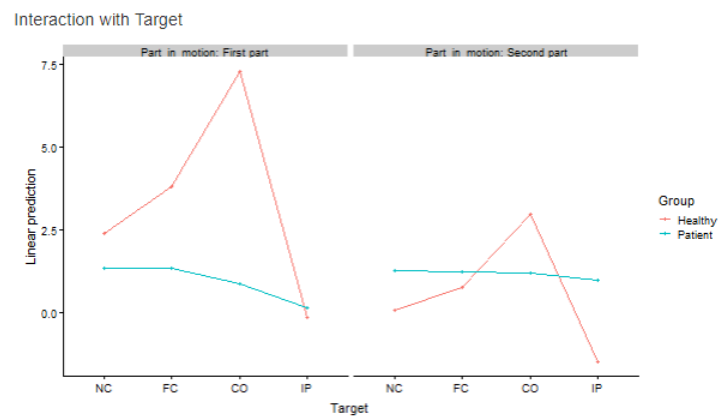
Subjects Data Application



וכן כל שכבה לגופה, כאן הבדלי התנועה מוצגים ביחס גורם החלק בתנועה במיצוע על פני המטרות
וכן, ביחס למטרות השונות, השוואת החלק התנועה של קבוצה.



וכן, תרשים אינטראקציה משולשת בין מטרה, חלק בתנועה וקבוצה מופק.



Ayelet Davidi, Reaserch thesis vizualization

Subjects Data Application

Demographics
Movement Trajectories
Change Point
Kinematic Measures

Whole movement
Segmented movement

Select Variable
IRFA
Fit Model

Both layers examination
Single Layer examination

Choose Layer of the data:
☒ Layer 1 ☐ Layer 2

Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)
Response: tRFA

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Type	0.20	1	0.651
Target	4.17	3	0.243
Part_in_motion	0.74	1	0.389
Type:Target	6.36	3	0.096 .
Type:Part_in_motion	3.49	1	0.062 .
Target:Part_in_motion	0.44	3	0.932
Type:Target:Part_in_motion	0.38	3	0.944

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value
Type	1	0.8	0.8	0.20
Target	3	199.0	66.3	1.39
Part_in_motion	1	35.4	35.4	0.74
Type:Target	3	303.2	101.1	2.12
Type:Part_in_motion	1	166.5	166.5	3.49
Target:Part_in_motion	3	21.0	7.0	0.15
Type:Target:Part_in_motion	3	18.2	6.1	0.13

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Healthy,First part - Patient,First part	2.408	2.278	45	1.057	0.7170
Healthy,First part - Healthy,Second part	2.761	1.386	330	1.993	0.1930
Healthy,First part - Patient,Second part	2.169	2.278	45	0.952	0.7770
Patient,First part - Healthy,Second part	0.353	2.278	45	0.155	0.9990
Patient,First part - Patient,Second part	-0.240	0.883	330	-0.271	0.9930
Healthy,Second part - Patient,Second part	-0.593	2.278	45	-0.260	0.9940

Results are averaged over the levels of: Target
P value adjustment: tukey method for comparing a family of 4 estimates

performed on the change points of the PC's and the change points mean by target (to each subject). Therefore, each subject has four unique change points, one to each target.

Kinematic measures including classics as tangential velocity, degree range of movement, path length, and final angle, for both, the whole movement and the segmented movement, were calculated for each of the compensation trajectories and for the endpoint, the wrist. To the chosen measures, multiple linear mixed models with random effects were fitted to examine the effects of the group factor, target factor, and their interaction. The kinematic measure computed twice for the segment movement, each one to each layer due to differences in the estimated change points while in the analysis of those results within-factor for the part in motion was added to the model and the second and third interaction was examined.

The result showed that the patients had different strategies compared to the control (healthy) subjects which had similar movement patterns. The patients also use new degrees of freedom in the reach-to-grasp movement characterized in lifting the elbow and great use of the trunk. The task duration was longer, the motion was less smooth and wasn't a similar movement pattern expressed in un-unique scatter of the movement trajectories. The patients had bigger path lengths of the trunk and arm-plane and a similar phenomenon has been seen toward the different targets. However, final angles dedicated to similar final positions on the control group while the patients characterized in higher variance. Moreover, the result showed the use of the compensation movement in the segmented movement (by the change point) in both parts of the movement on the patients' group. Although the nonsignificant differences of the final angles between the groups in both parts of the movement, the variance of the patients are higher. Also, although the differences in the path length between the groups, the similar use between the target has been constant. The segment movement, separated by the first layer of the data, the raw data layer, characterized in a within-group similar between the parts of the movement. The second layer, the degree of freedom layer, characterized in different use between the parts of the movement while on the first part the patients had a low use in all three trunk rotations and high use in the elbow which does not depend on the target location. The second part of the movement, however, had similar use in the trunk and arm-plane between the groups. Therefore, we hypothesis about the similar in the movement measure on the first part and the differences in the second part which haven't found.

Key words: Stroke, Compensation movement, Change-point, Pathological synergies,
Segmented movement

Abstract

One of the common disorders in post-stroke patients is a motor disorder which may lead to secondary complications. The motor disorder is characterized by limitation in motion range and decrease in the whole range of movements. Motor control is the process by which humans activate and coordinate muscles and limbs as part of the performance of a motor skill. This process requires interaction between the central nervous system (CNS) and the musculoskeletal system, where the components involved are required to act in unison to produce movement. This coordination problem encapsulates issues of hard-wired reflexes, synergies, redundancies, and variability, making the understanding of the process involved complex. New movement strategies are adopted to compensate those impairments in daily activities such as drinking water. Examination of the compensation movements can help in the rehabilitation section by focusing the therapist about the patient strategies and that way leads to minimizing the secondary impairments caused by the newly adopted strategies.

This research deals with the analysis of the compensation movement in post-stroke subjects in reach-to-grasp movement compared to a control group and to the spasticity common measures. Examination of the compensation movement includes four targets which can be separated into two kinds of targets, near versus far center targets, while the far center targets include one middle, one contralateral and one ipsilateral. The trunk rotations and the arm-plane angle trajectories were computed, and endpoint measures for movement assessment. Furthermore, the research aims to examine the existent of change point in the movement which divides the movement into two sub-movements while on the first part of the movement the subject raised their arm and on the second part, they reached toward the target by extension the elbow. Estimate the change point will perform on two layers of the data: the first layer of the data, the raw data layer, the recorded data from the reach-to-grasp movement, and the second layer of the data, the degree of freedom layer, which includes both the compensation movement trajectories and the upper limb joints angles' degrees of freedom of the wrist, elbow and shoulder. Computations of the change points performed on each layer of the data and have a pre-stage which examine the correlation between the variables and proceed to implement the algorithm, performing first data reduction with Principal Component Analysis (PCA) and second fitting a segmented linear model to each PC component to estimate the change points. In fact, in order to have unique change points, each trial of the reach-to-grasp movement (of each subject) had three change points, one to each PC and therefore a weighted average based on the percentage of variance explained

BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Compensation Movement data analysis of post-stroke patients

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE M.Sc. DEGREE

By: Ayelet Davidi

Supervised by Prof. Yisrael Parmet and Prof. Sigal Berman

Author: Ayelet Davidi

אילית דודי

Date: 14.10.2019

Supervisor: Prof. Yisrael Parmet

ישראל פרמט

Date: 14.10.2019

Supervisor: Prof. Sigal Berman

סיגל ברמן

Date: 15.10.2019

Chairman of Graduate Studies Committee:.....

ד"ר יוסי גורן

Date: 17/10/2019

October 2019

BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Compensation Movement data analysis of post-stroke patients

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE M.Sc. DEGREE

By: Ayelet Davidi

October 2019