



# Control of a Kinematically Coupled 2 DOF Underactuated Prosthetic Leg

**Shirat Nitzan, Nili E. Krausz**

Neuro-Robotics and Bionic Limb (eNaBle) Lab  
Faculty of Mechanical Engineering, Technion, Haifa, Israel

2025

## תוכן עניינים

רשימת אירורים.....	3
תקציר .....	4
..... Abstract	4
מטרת הפרויקט וחלום קטן לדרך .....	5
משמעות מידול תנועת אדם .....	6
פרוצזה עם מנוע מרכזי אחד .....	6
איסוף מידע על תנועת אדם בראיא .....	6
מפרק הירטול .....	7
מפרק הברך .....	7
טבלת סיכום אינכוטית .....	9
"מחקר תנועת אדם " .....	9
בעיית הכוונות .....	10
טוווח תנועת המפרקים .....	11
צימוד קינטמי .....	12
ערך קבוע בזמן .....	12
ערך משתנה בזמן .....	13
בנייה מודל ב-simscape .....	15
מידול צורות מיוחדות .....	16
אינטגרציה עם הצימוד הקינטמי .....	18
..... Impedance control	18
"מחקר החוג הסגור" .....	19
החוג הסגול .....	20
החוג הכחול .....	21
החוג הצהוב .....	22
ערך א קבוע .....	23
סיכום .....	24
נסחפים .....	26
הגדלה של חוג הבקרה- איור 16 .....	26
תרשים הסימולציה עם שמות הקבצים השותפים .....	27
קבצים שמתקבלים לאחר סימולציה .....	29
בשלב ראשון .....	29
בשלב שני .....	29
בשלב שלישי .....	30
בשלב רביעי .....	31

## רשימת איורים

איור 1- החרילים הגיבורים שלנו!	5
איור 2- תנועת הקרסול במחוז הילכה	7
איור 3- תנועת הברך במחוז הילכה	8
איור 4-טבלת סיכום איבוטית של תנועת המפרקים	9
איור 5-כיווניות תנועת המפרקים בשלושה מישורי ייחוס	10
איור 6-טבלת סיכום כמותית תנועת המפרקים והקשר ביניהם	11
איור 7-מציאת נק' קיצון וחלוקת לשעה מקטעים	11
איור 8- משועאות של הצימוד קינמי לפי שבעת המקטעים	13
איור 9- גраф של צימוד קינמי לפי שבעת המקטעים	14
איור 10-השוואה בין שתי השיטות של הצימוד הקינמי	14
איור 11-מודל הפרוטזה ב-SIMSCAPE	15
איור 12-מודל צורה מיוחדת ע"י הבנסה של נקודות נגד כיוון השעון (EXTRUSION SOLID)	16
איור 13-מודל צורה מלבנית שקיימת בסימסקיף (CYLINDRICAL SOLID)	17
איור 14- בניית של צורה ע"י פונקציית עד בצורה רציפה	17
איור 15- מודל הרגל בתוך SIMSCAPE	18
איור 16 - חוג בקרה ב-SIMULINK	19
איור 17-מודל SEA בחוג הבקורה	20
איור 18- ערכים התחלתיים שנלקחו מ"מחקר החוג הסגור"	21
איור 19- מציאת A עם השגיאה הקטנה ביותר של נורמה 2	22
איור 20-שגיאה של תנועת הברך והkersol במעלות	23

## תקציר

הפרויקט עוסק בפיתוח מודל פרוטזה ממנוע לפרק ברכ וקורסול, תוך שימוש במנוע מרכזי אחד. מטרתנו הייתה לאפשר תנועה טבעית ונוחה, להפחית פעילות מיותרת של שרירים ולשפר את חווית ההליכה. הבנו דפוסי התנועה ובנינו מודל במישור קדמי-אחורי כולל חלוקה למקטעים לניטוח הקשר בין הברך לקורסול.

במערכת **Simscape** פיתחנו מודל פיזי של הפרוטזה שכוללת שלושה חוגים בקרה עיקריים: חוג סגול (SEA) לבקרת מנוע עם קפיץ בין המנוע למפרק, חוג בחול (Impedance Control) שammesh קשר בטוח ואדפטיבי בין הזווית הרצiosa למומנט המנוע, וחוג צהוב לאופטימיזציה של  $n$  לקביעת משקל השגיאות של הברך והקורסול. הממצא המרכזי היה כי עיקבה אחורית הברך ( $n = 1$ ) מספקת את הביצועים הטובים ביותר. שילוב החוגים מאפשר סימולציה חלקה ובטוחה של הפרוטזה תוך התחשבות בתנועת המשתמש ובסביבה.

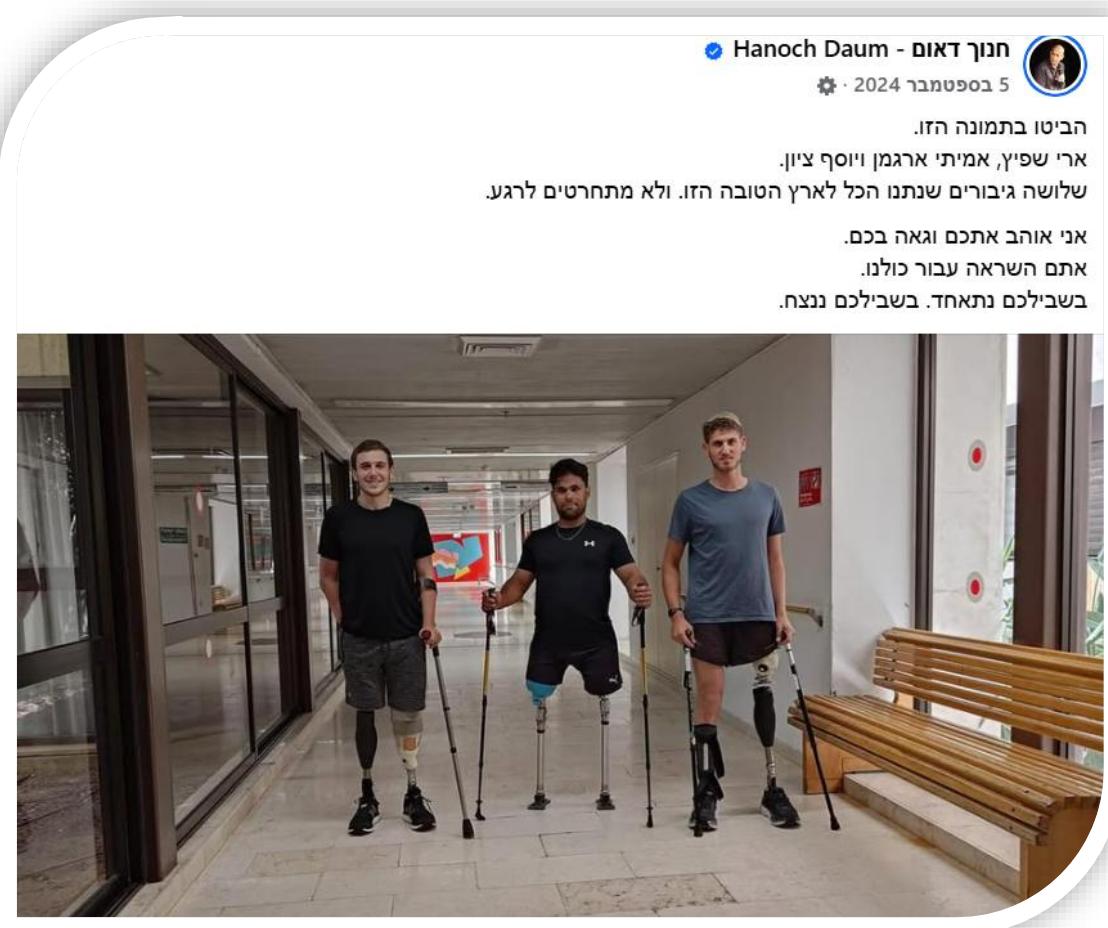
## Abstract

This project focused on developing a motorized prosthesis model for the knee and ankle joints, using a single central motor, aiming to enable natural movement, reduce unnecessary muscle activity, and improve walking experience. We understand joint movement patterns and build a sagittal plane model, including segmentation for analyzing the knee-ankle relationship.

The physical model was developed in **Simscape**, using Cylindrical Solids and extrusion solids for custom parts. The system integrates three main control loops: a purple loop (SEA) for motor control with a spring between motor and joint, a blue loop (Impedance Control) to implement a safe and adaptive relation between desired joint angle and motor torque, and a yellow loop for  $n$  optimization to weight knee and ankle errors. The key finding was that tracking the knee alone ( $n = 1$ ) provides optimal performance. The integration of these loops allows smooth and safe prosthesis simulation, accounting for both user movement and environmental interaction.

## מטרת הפרויקט וחלום קטן לדרך

פרויקט הגמר נועד לפתח מודל של פרוטזה מMOVEMENT לאדם עם קטיעה מעל הברך (איור מס' 1). המודל מתבסס על מנוע אחד מרכזי, אף על פי שקיים שני מפרקים "חסרים" שהם הקרסול והברך. בעתיד יתווסף גם מנוע קטן נוסף כדי לוודא שישופק מספיק מומנט למפרק הקרסול הבחירה בפרויקט נעשתה ברקע של מלחמת חרבות ברזל, שהביאה עימה לצערנו גידול במספר האנשים שהצטרפו למועדון הקטועים. מטרתנו היא שהידע שנוצר בפרויקט זה יתרום לשיקום פצועים צה"ל ונפגעי הטהורה, ובכך להוות פיסת תודה קטנה לפניהם על מסירותם והאמץ שלהם.



איור 1 - החילימ' הגיבורים שלנו!

לפי חנן דאום, קרדיט צילום לדקללה הפיזיותרפיסטיית

## **מושיבציגית מידול תנועת אדם**

לפנינו שצלמנו לפיתוח פרוטזה עם מנוע אחד לשני מפרקים, עסקנו בעצם הבחירה לשים מנוע בפרוטזה. מעבר לאתגר ההנדסי המעניין והמאתגר, מטרתנו הייתה ליצור פרוטזה אקטיבית שתסייע לאדם ללבת בצוואר טבעיות ככל האפשר. לדעטנו, ככל שההילכה תהיה קרובה יותר לטבעיות, כך תפחית הפעולות המטאבוליות של האדם ופחות שרירים שאינם חיוניים לתנועה כמו שרירי הגב שייאלצו להשתתף בתהליך.

המטרה המרכזית הייתה לאפשר לאדם חוויה של הליכה ועלייה במדרגות בכיף ובנוחות. חשיבות הדבר אינה רק בריאותית-פיזית, אלא גם תרומת לרווחתו הנפשית. בדומה לכך שאביזרי שעונים נתונים לאדם ביטחון לחיזיר באופן חופשי, כך מתן יכולת הליכה טבעיות לאדם עם מוגבלות פיזית מאפשרו לו לחוות עצמאות וביטחון בתנועה היומיומית.

## **פרוטזה עם מנוע מרכזי אחד**

לכורה, פרוטזה עם מנוע אחד מורכבת יותר מפרוטזה עם מנוע נפרד לכל מפרק, ביוון שהיא דורשת פיתוח צימוד מכני שיכל לחבר את תנועת המפרקים בצוואר מדויקת. לדוגמה עתידית יש לוודא כי מנגנון הצימוד יספק מספיק מומנט הן לקרסול והן לברכ. אולם, יצאנו לפרויקט עם שתי תקנות מרכזיות. האחת, להצליח להוריד את משקל הפרוטזה, מה שהיא גורם קרייטי לשיפור חווית המשתמש ולהפחיתת תנועות לא טבעיות של השרירים. שנייה, להראות כי הצימוד המכני מסייע בביטחון על תנועת המפרקים, וכך ניתן לדמות בצוואר מדויקת יותר את תנועת האדם באמצעות הפרוטזה.

## **איסוף מידע על תנועת אדם בΡΙΑ**

בהתבססה לתנועה הרצiosa של הפרוטזה חיפשנו מידע על תנועת אדם בΡΙΑ.  
המידע והגרפים נלקחו מ-

"Biomechanics: Musculoskeletal Key"

Written by: Jim Richards, Ambreen Chohan, Renuka Erande

Published on: Musculoskeletal Key, Fastest Musculoskeletal Insight Engine.

נקרא למחקר זה "מחקר זוויות הרגל".

## פרק ה الكرסול

לממנו כי מפרק ה الكرסול ממלא תפקיד מרכזי במהלך הליכה, כשהוא מסיע בבלימת עצועים בזמן הנחיתה, בקידום הגוף קדימה בשלב הדרכיה, ותומך בדחיפת כף הרגל מהקrukע לפני סיום הצעד.

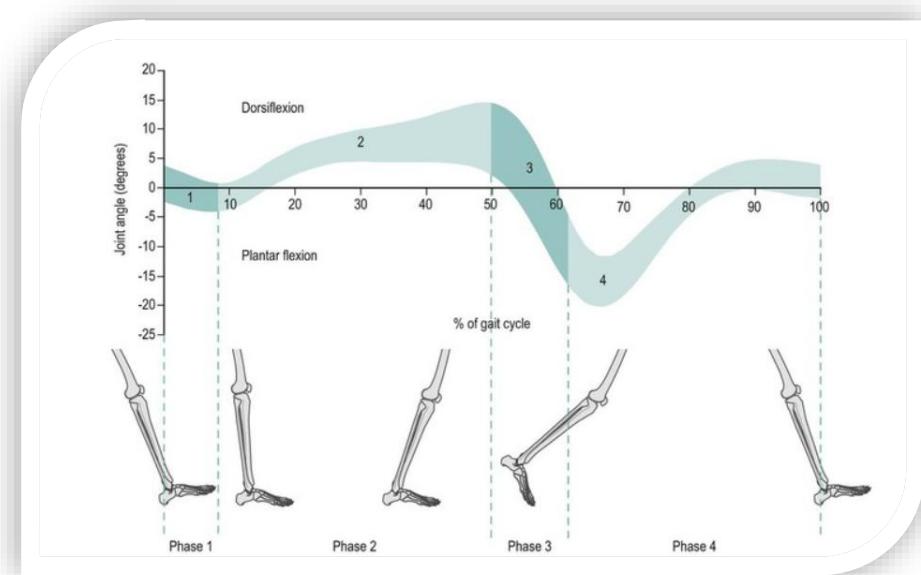
ניתן לחלק את תנועת ה الكرסול לארבעה שלבים:

**בשלב הראשון**, בעת הנחיתה על העקב, ה الكرסול נמצא בזווית ניטרלית ולאחר מכן מתבצעת מתייה קלה של כ-3 עד 5 מעלות עד שכל כף הרגל מגעת בקרrukע. בשלב זה, שריריהם הקדמיים של השוק פועלים כדי להאט את תנועת כף הרגל ולרכך את מגע הרגל בקרrukע.

**בשלב השני**, בשחרgal שטוחה על ה الكرrukע, ה الكرsol ממשיך לתמכוף עד לכ-10 מעלות, והעצם המרכזית שמתקדמת היא השוקה. בגין שריריהם פועלים כדי לבולם את התקדמות השוקה ולהשיג תנועה יציבה.

**בשלב השלישי**, העקב מתרומם ומתרכשת תנועה מהירה של כיפוף כף הרגל – ה الكرsol מגיע לזוויות חזקה אל מול ה الكرrukע, מה שמאפשר דחיפה חזקה קדימה. שריריהם האחוריים של השוק מפעילים בווח כדי להניע את כף הרגל הלאה.

**בשלב הרביעי**, כאשר כף הרגל בבר באוויר, ה الكرsol מתכוופ שוב במהירות כדי להרים את הרגל מהרצפה. באמצעות שלב זה מושגת תנוחה ישרה של ה الكرsol, שמשיכה עד למגע הבא של העקב. השריריהם פועלים בגין כדי להבטיח מעבר חלק ולמנוע גיריה של הרגל.



איור 2- תנועת ה الكرסול במהלך הליכה

nakch matot "מבחן זווית הרגל "

## פרק הברך

ראינו כי תנועת הברך מתבצעת בעיקר במישור הקדמי-אחורית וכוללת סדרת מעברים בין כיפוף למתיחה.

ניתן לחלק את תנועת הברך לחמישה שלבים:

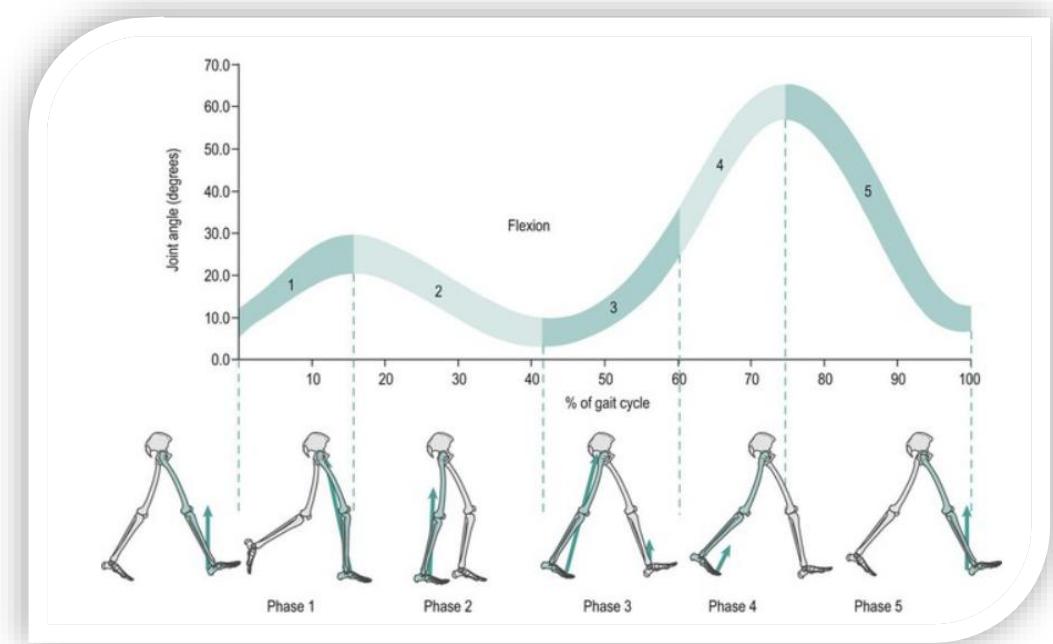
**בשלב ראשון**, מיד לאחר נחיתת העקב, הברך מתכוופת לזרווית של כ-20 מעלות, כדי לספוג את העומס שמופעל על הרגל עם תחילת נשיאת המשקל. זהו שלב קריטי לבילמת עצועים, והשרירים המסייעים של הברך פועלים כדי לוויסת את התנועה.

**בשלב שני**, לאחר שייאכיפוף הראשוני, הברך נמתתח בהדרגה כמעט למלא היישור, מה שמאפשר לגוף לנوع בצורה חלקה מעלה הרגל התומכת.

**בשלב שלישי**, עם תחילת הרמת העקב מהרצפה, הברךשוב נכנסת למצב של כיפוף בחלק מההכנה לשלב הדחיפה. זהו מעבר חשוב לקראתת תנועת הרגל קדימה.

**בשלב רביעי**, במהלך שלב התנופה המוקדם, הברך ממשיכת להתקופף בכ-55 עד 60 מעלות מהזרווית הקודמת, דבר שמשמעותו בהרמת כף הרגל מהרצפה ומאפשר מעבר בטוח מבלי לעוד.

**בשלב חמישי**, לקראת סוף שלב התנופה, הברך נמתתח במהירות בהכנה לנחיתה הבאה עם העקב. המעבר זהה חשוב להחזרת הרגל לעמדת המוצא בצורה יעילה.



אייר 3- תנועת הברך במהלך הליכה

nakm matuk "מבחן דיזיות הרגל"

#### טבלת סיכום אינטואיטיבית

הערכים שהוצגו מהווים קירוב בלבד, במטרה לספק תמונה מצב אינטואיטיב של תנועת המפרקים בהתאם לאיורים שהוצגו לעיל. בהמשך נביא נתונים מחקר במוני, כך שהערכים יהיו דומים אך עשויים להשתנות במעט, בהתאם לממצאים המדעיים המודרניים.

מפרק הברך		מפרק הירך		
שלב 1	כיפוף	שלב 1	מתיחה קלה	0-8
שלב 2	מתיחה	שלב 2	כיפוף	8-16
				16-41
שלב 3	כיפוף	שלב 3	מתיחה חרדה	41-50
				50-62
שלב 4	כיפוף	שלב 4	כיפוף	62-67
				67-74
שלב 5	מתיחה		כיפוף קל	74-80
				80-100

איור 4-טבלת סיכום אינטואיטיב של תנועת המפרקים

#### "מחקר תנועת אדם "

כדי להעמק את הבנת התנועה הטבעית של האדם, בחרנו במחקר

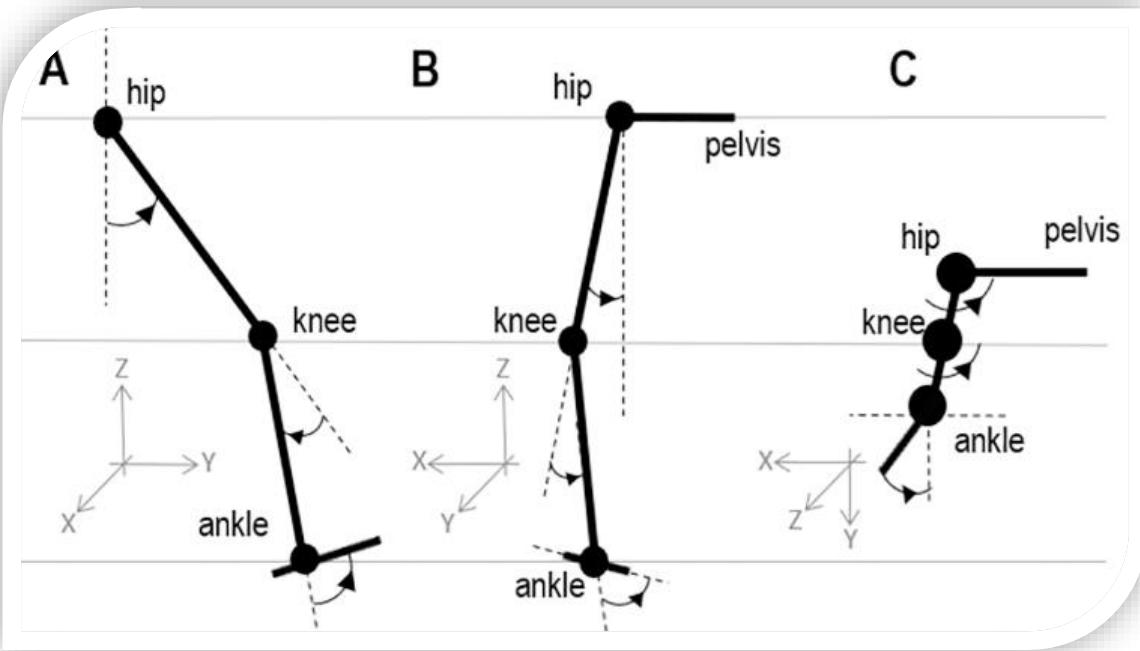
"Parametric Equations to Study and Predict Lower-Limb Joint Kinematics and Kinetics During Human Walking and Slow Running on Slopes"

Written by: Anat Shkedy Rabani, Sarai Mizrahi, Gregory S. Sawicki, Raziel Riemer,  
Ben-Gurion University of the Negev.

המחקר מיפה את תנועת המפרקים (ירך, ברך וירוסול) של אדם בריא (בגילאים: 24.56 ± 3.16 שנים ) בקצב ושיפורים שונים -

מהירות של 1.25 מטר/שניה בחמישה שיפורים (-15%, +10%, 0%, -10%, +15%).  
כמו כן, במהירות של 2.25 מטר/שניה בחמישה שונים (-10%, +5%, 0%, -5%, +10%).

באוטו המחקר, לאחר אישור זוויות תנועת המפרק בשלושה ממדים (מצורף איור מס' 5) החוקרים  
עשוי מודל מתמטי המבוסס על סדרות פוריה וגרסיה פולינומית של התנועות השונות, על סמך  
הנתונים שאספו (דיוק  $R^2 = 0.92 \pm 0.18$ ), וכן ייבאו את כל הנתונים לעבודה מסודרת  
ב- Matlab לצורך עיבוד וניתוח נוספת.



איור 5- כיווניות תנועת המפרקים בשלושה מישורי ייחודי

נקח מトル "מחקר תנועת אדם"

בעבודה זאת, נפערת את הבעה למשור הקדמי אחורי (כפי שראינו לעיל)- שהוא משור צד במחקר זה. נצפה מהברך להיות במצב ישיבה ב-  $90^{\circ}$  ובסמץ עמידה ב-  $-90^{\circ}$ . כמו כן נצפה מהקרסול להיות במצב ישיבה ועמידה (שיש מגע מלא עם הקרקע) ב-  $-90^{\circ}$ .

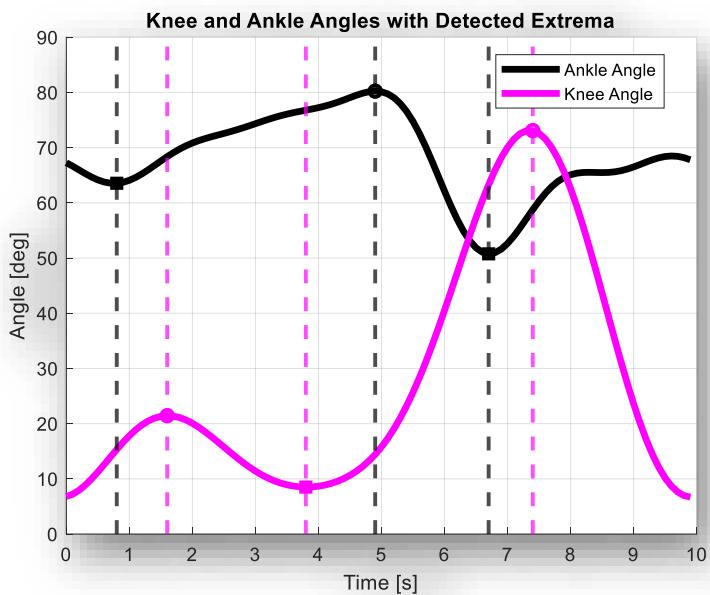
מחקר זה ילווה אותנו לאורק הפרויקט ושמו מעבשו יהיה "מחקר תנועת אדם". בחרנו כי מחזור הליכה שלם יהיה ב-עשר שניות.

#### **בעיית הביוויניות**

בחלק מהמידע של שני החוקרים שציינו לעיל, גילינו כי יש שלבים שהתנועה של הkrisol והברך הפוכות בסימנים: כאשר מפרק אחד מתכוופף, המפרק השני מתוישר וכן, המנגנון המכני הנדרש לצורך להתחשב גם בכיווניות התנועה ולא רק פקטור של הכפלת או הקטנה. בניתוח מצאנו נקודות קיצון (איור מס 7) לאורק התנועה של הברך והkrisol כך שסק כל התנועה חולקה לשבעה מקטעים. בכל מקטע בדקנו את סימן השיפוע שלהם ואת יחסיהם הגומلين ביניהם. באיזו ?? ביפורף הוא סימן חיובי ואילו מתייחס היא סימן שלילי.

Start Time	End Time	Knee Trend	Ankle Trend	Direction Relation
0	0.8	+	-	-
0.8	1.6	+	+	+
1.6	3.8	-	+	-
3.8	4.9	+	+	+
4.9	6.7	+	-	-
6.7	7.4	+	+	+
7.4	10	-	+	-

איור 6-טבלת סיכום כמותית תנועת המפרקים והקשר ביניהם



איור 7-מציאת נק' קיצון וחלוקת לשעה מקטעים

### טוווח תנועת המפרקים

נשים לב כי ה الكرסול עושה תנועות קטנות יחסית והן סביב 70 מעלות. לעומת תנועתה קרובה למצב מגע מלא עם ה الكرקע שהוא 90 מעלות. כמו כן, ה ברך בתחילת תנועתה סביב 10 מעלות שזהו מצב קרוב לעמידה עד מחצית הזמן שם יש כפוף חזק ולאחר מכן מתיחה בחלק משלבים ארבע וחמש שתוארו לעיל.

## צימוד קינמי

רצינו לבדוק אם קיים קשר בין התנועה של הברך והكرסול. לשם כך, ערכנו ניתוח של המידע ב- "מחקר תנועת אדם". התאמת הקשר תבצע לפי החלוקה למקטעים שדוברה לעלה. הצענו קשר מהצורה הבאה-

$$\theta_{ankle} = m \cdot \theta_{knee} + b$$

הסתמך של  $m$ , השיפוע, נקבע לפי יחס הגומלין שמצאו לעלה.

רצינו למצוא מידת ההתאמה של שני אלטרנטיבות-האחת, שיפוע קבוע והשני שיפוע משתנה בזמן. בשני המקרים, הסכמנו על היסט  $b$  משתנה בזמן.

חשיבות לציין שמדובר במודל מתמטי "תיאורטי", ולכן נדרש Kapoorות קפיצות חדות בין המקטעים השונים. כמובן, תופעה זו אינה מתרחשת במציאות, אך שמרנו על הצגת הנתונים בצורה זו כדי לשמר את בניית המודל ולשקף את חלוקת המקטעים.

למרות הפשטות והקפיצות במודל, הוא מספק בסיס שימושי לתכנון הצימוד המכבי של הפרוטזה, כיוון שהוא מאפשר להבין את הקשר בין תנועת הברך לקרסול ולהתאים את המנגנון כך שידמה את התנועה האנושית בצורה קרובה ככל האפשר.

## ערך קבוע בזמן

לשם כך, הרצנו בקוד **Matlab** אלגוריתם שמחפש את השיפוע הקבוע עם השגיאה הקטנה ביותר בכל אחד משבעת המקטעים. השגיאה נמדדה ביחס לזריות המקורית של الكرסול באמצעות שיטת הריבועים הפחותים, לפי הנוסחה:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{K=1}^N \frac{1}{N} (\theta_{ankle}^2 - \theta_{estimated}^2)}$$

התוצאות שהתקבלו הן:

*best slope(m): 0.266*

*Mean RMSE: 2.7410*

*STD of RMSE: 2.0868*

*Mean Intercept(b): 74.3352*

*STD of Intercepts(b): 4.5970*

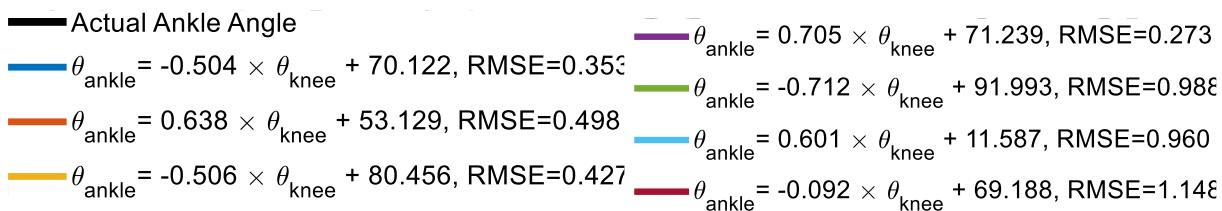
ממצא מעניין הוא כי היחס (b) יחסית קבוע בזמן - תוצאה שהפתיעה אותנו לטובה. בrama התיאורטית, אם נבנה מנגנון מכני עם היסט קבוע ושיפור קבוע (גם עד כדי סימן), הוא מצליח לדמות במידה רבה את התנועה הטבעית של האדם.

שיפור קבוע ניתן להשגה באמצעות גלגולות או יחסים קבועים בין גירים, בעוד שהיסט קבוע מושג באמצעות הסטה ראשונית של הזרויות. יש לשים לב כי במצב עמידה אנחנו נמצאים בהיסט ראשוני של  $90^\circ$ , וכן דחיפה של הרגל כלפי מעלה והורדת الكرסול כלפי מטה יכולים לספק, בrama התיאורטית, את המענה הנדרש לתנועת המפרקים באופן טבעי.

יתר על כן, הערכים הנמוכים של RMSE מעידים כי הקירוב המתמטי מתאים היטב לתנועת המפרקים, מה שמקנה ביטחון שהמנגן הפיזי שייבנה לפי נתונים אלו יכול לדמות את התנועה האנושית בצורה מדויקת מספיק, גם במנגן פשוט עם שיפור והיסט קבועים.

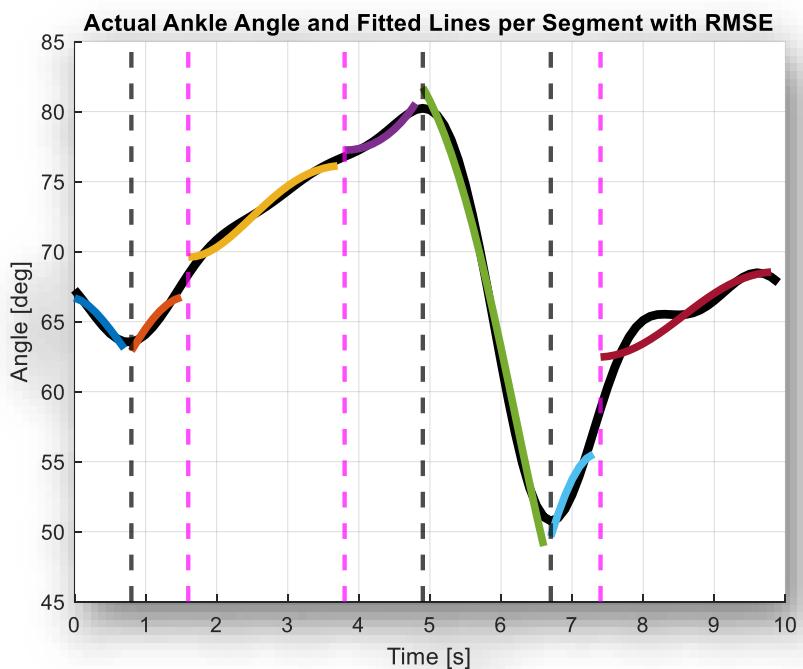
#### ערך משתנה בזמן

רצינו למצוא קשר תיאורי מדויק יותר על ידי משחק בערך השיפור  $\omega$ . אף כי שימוש במנגן הפיזי עשוי להיות מורכב מאוד ואולי בלתי אפשרי, מטרתנו הייתה לספק מידע מksamיל למבחן המכני שיבוא אחרים. בכך הוא יוכל להבין כי במידה ויתכן קשר "מושלם" וישתמש בחוג הבדיקה שלנו, ניתן יהיה לצפות את התוצאות הצפויות באופן מדויק, ולדמות את תנועת המפרקים בצורה הקרויה ביותר לטבעיות.

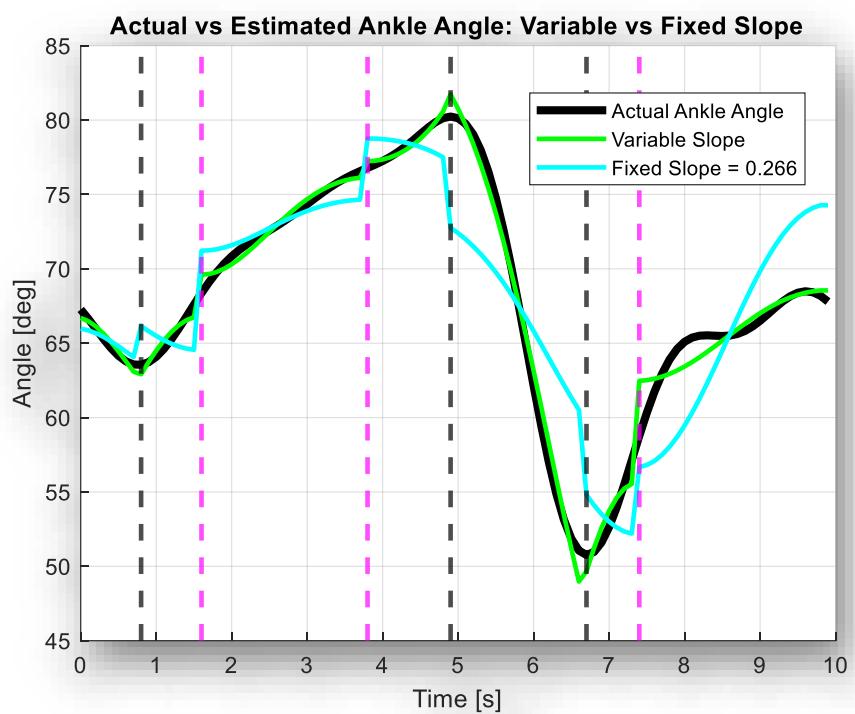


איור 8- משוואות של הצימוד קינטטי לפי שבעת המקטעים

ניתן לראות כי בשיטה זו (איור 9), שגיאת הריבועים הפחותים (RMSE) נמוכה מאוד, מה שמעיד על התאמת טובה של המודל הנוכחי לתנועת המפרקים.



איור 9- גраф של צימוד קינטמי לפי שבעת המקטעים



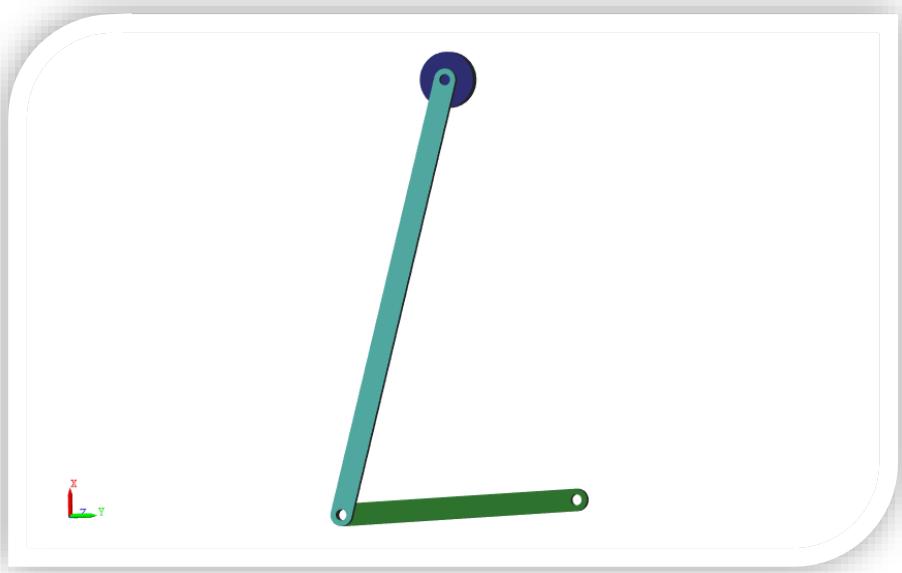
איור 10- השוואה בין שתי השיטות של הצימוד הקינטמי

ביצענו גם השוואה ויזואלית בין שתי השיטות של הצימוד הקינטמי. ניתן לראות כי כאשר השיפוע נשמר קבוע לאורך הזמן (הגרף התכלת), נוצרות אי-רציפות גדולות בין המקטעים, תופעה שאינה אפשרית במנגנון פיזי. לעומת זאת, בשיטה שבה השיפוע משתנה בזמן (הגרף הירוק), התנועה נראה חלקה יותר ופחות נתקלת בקפיצות ואי-רציפות, מה שמדגים התאמה טובה יותר לתנועה טבעית של האדם.

ממצאים אלה חשובים במיוחד לתוכנן הצימוד המבני של הפרוטזה, שכן הם מצביעים על כך שכדי להגיע לדימוי חלק אמיתי של התנועה, יש לקחת בחשבון אפשרות של שיפוע משתנה בזמן, או לפחות מנגנון שמקטין את האי-רציפות בין המקטעים, כך שהפרוטזה תספק חווית הליכה טבעית ונוחה למשתמש.

### *בנייה מודל בס-*simscape**

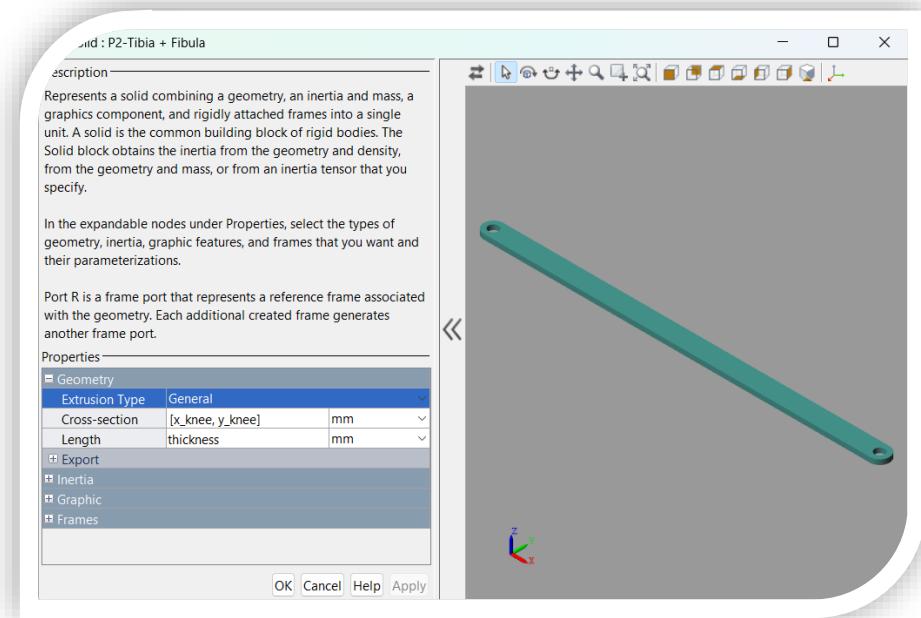
פיתחנו בסביבת **Simscape** (הרחבה ב-Simulink תחת Matlab) המאפשרת פיתוח מנוגנים מבניים מודל שמטרתו לצפות את תנועת הפרוטזה בסביבה וירטואלית לפני הדפסת א-טיפוס. כך ניתן יהיה לבדוק בפועל את גודל המנגנון המבני ולהבטיח פעולה חלקה של הפרוטזה. במודל דמיינו את הפרוטזה בשלושה חלקים עיקריים: המנווע מיוצג בגליל עם מסה, והשוק ובן הרגל מיוצגים בשני מוטות מעוגלים עם שני קדחים המוחברים ביניהם.



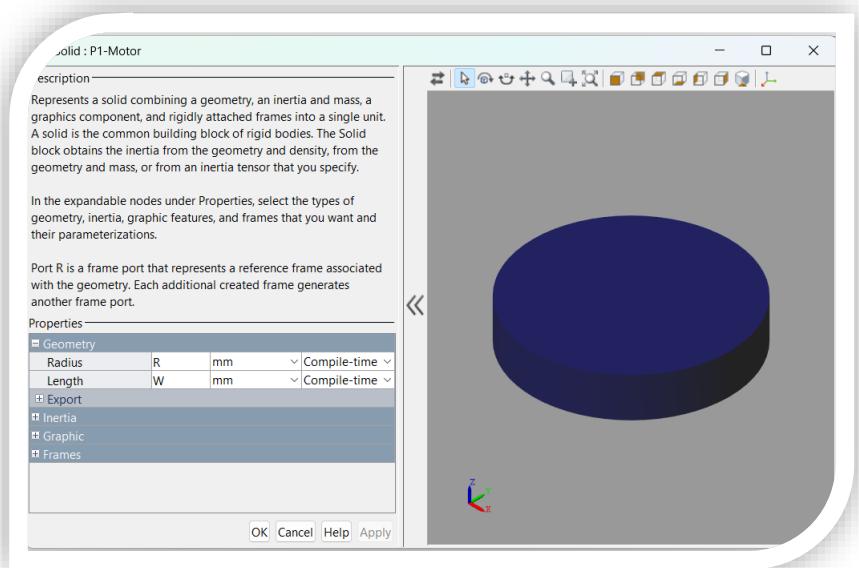
איור 11-מודל הפרוטזה בס-*simscape*

## מידול צורות מיוחדות

- ב- **Simscape** קיימים שלושה אופנים עיקריים לצירת אלמנטים תלת-ממדים של מנגנוןים:
1. יבוא קובץ STEP חיצוני - ניתן להביא למודל קובץ תלת-ממדי מוכן (כמו SolidWorks או תוכנה אחרת), אך שיטה זו דורשת יצירת הקובץ מראש בתוכנה נפרדת.
  2. שימוש באלמנטים מובנים - כגון Cylindrical Solid, Box, Sphere ועוד. שיטה זו נוחה ליצור צורות פשוטות כמו מעוינים או גלילים, אך אינה מאפשרת יצירת צורות מורכבות כמו מוטות עם קדחים.
  3. שימוש בצורות מיוחדות (Custom/Extrusion Solid) - שיטה זו מאפשרת ליצור מבנים מיוחדים בתוך **Simscape** בלבד להיעדר בקבצים חיצוניים. הצורה נוצרת באמצעות קובץ נקודות דו-ממדי נגד כיוון השעון שמיציג את קווי המתאר של האלמנט (איור 14). לאחר מכן, **Simscape** מבצע Extrusion כדי להפוך את הצורה למודל תלת-ממדי. יתרון השיטה הוא שניתן ליצור מבנים מורכבים, כולל מוטות עם קדחים, ולשמור על רציפות הקווים, דבר שאיים אפשרי במקרים מסוימים או במקרים המובנים.

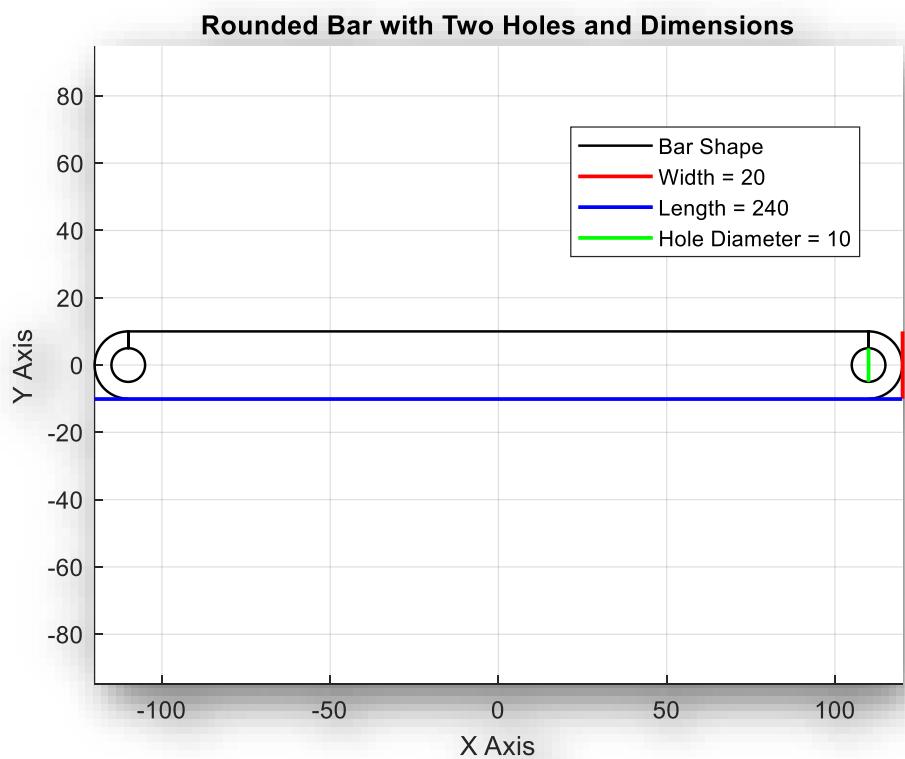


איור 12- מידול צורה מיוחדת ע"י הכנסה של נקודות נגד כיוון השעון (extrusion solid (solid extrusion))



איור 13- מודל צורה מוגנית שקיימת בסימקיף (cylindircal solid)

באופן זה, יצרנו את המוטות של השוק וכף הרגל בפורטזה כצורות מיוחדות תוך שימוש רק ברכישות המודול, כאשר הקווים השחורים שמעל הקדחים (באיור 14) מסמנים את נקודות הבנינה והיציאה, ומאפשרים יצירה של חריצים וקידוחים תוך שימוש על שלמות הצורה.



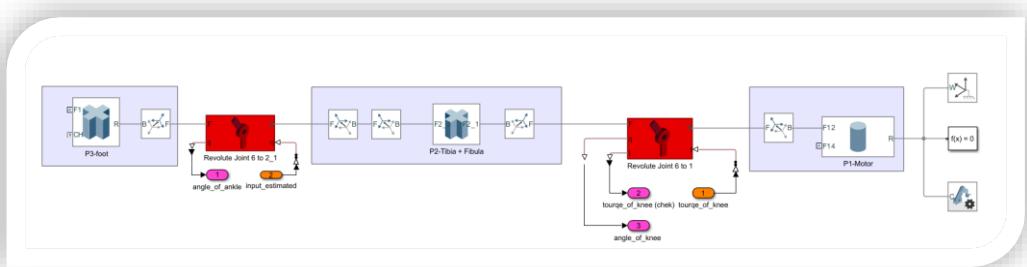
איור 14- בניית של צורה ע"י פונקציית עזר בצוות רכיפה

אינטרגרציה עם הציגו הדינמי

לאחר בניית החלקים הפיזיים של המודל, יצרנו את הקשרים המכניים והקינטטיים ביניהם (איור 15 - בניית מסומנות בכתום, יציאות בורוד).

לבסוף הוגדרה כניסה של מומנט שמאפיין את המפרק, ויציאה של זוויות שמאפשרת למדוד את מיקום הברך בכל רגע. זוויות אלו משמשות גם ככניסה לקרוסול, כך שהקרוסול עוקב אחר תנועת הברך.

לקראסול הגדרנו כניסה של זוויות לפי הקשר הקינטמי שניסחנו קודם: הזוויות שנמדדות ביציאה מהברך משמשות בקלט לקרוסול, לפי המשוואה  $b \cdot \theta_{knee} + m = \theta_{ankle}$ . בכך מתקבל חיבור חלק בין שני המפרקים, שמאפשר לדמות את תנועת הפרוטזה בצורה חלקה, רציפה וטבעית יותר, בדומה לאדם.



איור 15 - מודול הרגל בתוך Simscape

### *Impedance control*

חוג בקרה מסווג **Impedance Control** אנו יוצרים קשר ישיר בין זוית הברך הרצiosa - אותה אנו מקבלים מחקר "תנועת אדם" - לבין המומנט המזון למונע של הפרוטזה. הקשר מתואר באמצעות דימוי של קפיז ומרסן, המתממש באמצעות בлок PID שמוסיף "דיק פיזקל" לפעולה המערכת.

בחירה בחוג בקרה מסווג זה מאפשרת לא רק ליציב את המערכת באמצעות ערכיהם מתמטיים, אלא גם להעניק לה ערך פיזי ממשי וחינוי, המהווה את הממשק בין האדם למוכנה. לדוגמה: אם משנו חוסם את תנועת הפרוטזה של המשתמש, חוג בקרה שմבוסס רק על זוית היה גורם למונע להפעיל יותר ויוטר מומנט כדי להתגבר על המבשול, מה שעלול לפגוע פיזית בחוסם. לעומת זאת, ב **Control-Impedance**-מתקיים קשר בין התנועה לכוח המופעל, כך שהמערכת "מודעת" למוגבלות פיזיות. באמצעות שליטה נכונה בבלוק PID פשוט ניתן למנוע פגעה ולשמור על בטיחות המשתמש והסבירה, ואף להציג חיים במצבים קיצוניים.

## "מחקר חוג הסגור"

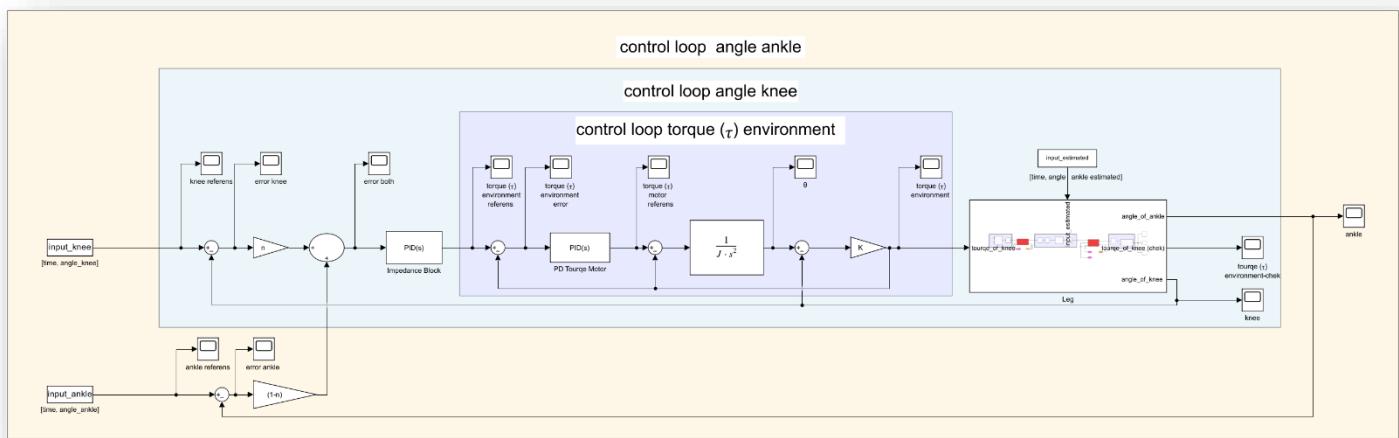
בחרנו בחרוג פשטוט לזכור מחקר זה, המבוסס על המאמר

"Impedance Control of Series Elastic Actuators: Passivity and Acceleration-Based Control".

Written by: Andrea Calanca, Riccardo Muradore, Paolo Fiorini, University of Verona

מחקר זה ילווה אותנו לאורך הפרויקט ושמו מעכשו יהיה "מחקר החוג הסגור".  
חוג הבקרה בשלמותו מופיע באירור 16.

כעת נפעננהivid את המקטעים שלו.



אייר 16 - חוג בקרה בסימולינק

(מצורפת הגדלה של חוג הבקרה בנספחים, בסוף הדוח).

## החוג הסגול

### SEA (Series Elastic Actuator)

בחוג הסגול אנחנו עושים בקרה למנועו עצמו. לשם כך מודל בחוג הבקרה מודל של SEA (Series Elastic Actuators), שהם מנועים שמצוידים בקפיץ בין המנוע למפרק. הקפיץ זהה נוטן כמה יתרונות חשובים בעולם הרובוטיקה:

1. גישה לכוח: הקפיץ מאפשר למדוד את הכוח שהמנוע מפעיל על הסביבה בדיק גובה יחסית, פשוט וע"י מדידת ההסתה של  $(q - \theta)$ .

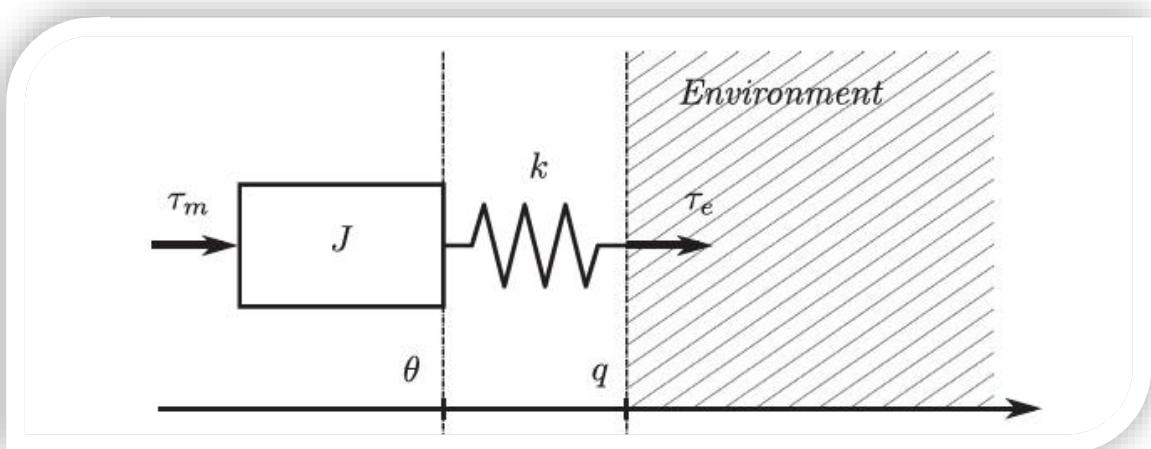
2. בקורת בוח ובטיחות: הקפיץ "סופג" חלק מהאנרגיה, מה שמחזית את הסיבוי לפגיעה בסביבה או בגוף אדם.

3. יכולת לפעול במצבים משתנים: המנוע לא צריך להיות מושלם או מדויק במיוחד – הקפיץ מייצר רכות ואינטראקציה בטוחה.

המשוואות השולטות-

$\tau_e = k(\theta - q)$  – זה הכוח (או המומנט) שהקפיץ מפעיל על הסביבה, כלומר ההבדל בין מיקום המנוע לבין מיקום המפרק  $q$ , מוכפל בקבוע הקפיץ  $k$ .

$\tau_m - J\ddot{\theta} = \tau_m - \tau_e$  – המשוואת הדינמית של המנוע: מומנט המנוע  $\tau_m$  גורם להאצה  $\ddot{\theta}$  של המנוע, בעוד קמץ מהמומנט "מתבטל" על ידי הקפיץ  $(\tau_e)$ .



אייר 17-מודל SEA בחוג הבקרה

נלקח מתוך "מחקר חוג סגור"

## החוג הבהיר *Impedance Control*

החוג הבהיר אחראי על יישום **Impedance Control** באופן ישיר. הוא מקבל את הזרווית הנדרשת מחקר "תנועת אדם" ומשווה אותה לזרווית הנמדדת במודול. ההבדל ביניהם מייצר **error signal** שמעובד על ידי בлок בסגנון PID כדי לחשב **torque** פיזי שמתאים למערכת. כפי שהזכרנו חוג זה אינו רק בקר מתמטי – הוא מייצג ממשק פיזי אמיתי בין האדם לפרוטזה, ומאפשר תנועה בטוחה ואדפתיבית.

### שילוב החוג הבהיר עם החוג הסגול (SEA)

המערכת משלבת את שני החוגים באופן הבא:

1. הזרווית הרצiosa נכנסת לחוג הבהיר, שיוצר **error signal** על בסיס ההבדל בין הזרווית הרצiosa לזרווית הנמדדת.
2. השגיאה מעובדת בחוג הבהיר בהתאם למודל **Impedance** (קפי-marsen), ומתקבל שמהחשב הן בתנועה הרצiosa והן במוגבלות פיזיות של הסביבה.
3. **torque** זה מזון לחוג הסגול, (**SEA – Series Elastic Actuator**) שאחראי על בקרת המנוע ישירות. בחוג הסגול המומנט מותאם לפי דינמיקה המנוע והאלמנט האלסטי שמחבר את המנוע למפרק  $\tau_e = k(\theta - q), J\ddot{\theta} = \tau_m - \tau_e$ :
4. בסוף **environment torque**, שנוצר בSEA-SEA-נכנס למודל **Simscape** וכן נוצרת סימולציה מלאה של הפרוטזה. התוצאה היא תנועת מפרק רציפה, חלקה ובטוחה, שמחקה את התנועה הטבעית של האדם, תוך שמירה על אינטגרציה מלאה בין חוגי הבקרה למנגנון המכנייה.

הערכים ההתחלתיים של החוג נלקחו מהמחקר, ומאפשרים סימולציה מדויקת של אינטראקציה בין המנוע למערכת המכנית.

```

% Gain section
K = 2.5; % Environment torque = K(theta - q)

% Impedance control PD
Kd = 1; % Kd <= K when SI = Kd
Dd = 1;

% Motor torque control PD
D = 1.5;
P = 80; % Kd <= K and P <= D^2 * K / J when SI = Kd

```

איור 18- ערכים ההתחלתיים שנלקחו מ"מחקר החוג הסגור"

## החוג הצהוב

אופטימיזציה של  $n$

בחוג הבקה שנמצא במחקר המקורי, התחשבות הייתה רק ב **error** של הברך. לעומת זאת, נבדקו הזוויות של הברך במודל מול הזוויות הרצויות, ומדדנו את הביצועים כאילו העולם אידיאלי.

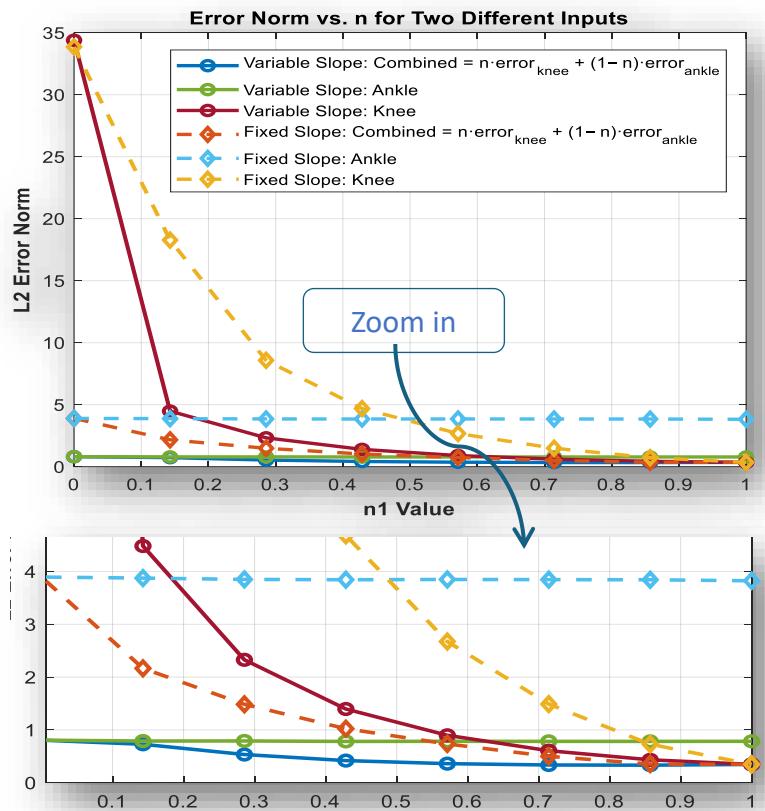
עם זאת, רצינו לבדוק אם תוספת של התחשבות ב **error** של הירך תשפר את הבקה. לשם כך, הצענו חישוב של **total error** בצורה משוקלת:

$$\text{Total error} = n \cdot \text{error}_{\text{knee}} + (1 - n) \cdot \text{error}_{\text{ankle}}$$

בחרנו למדוד את השגיאה ע"י נורמת  $L_2$ - הנורמה האוקlidית של וקטור השגיאה שמשמעותה

$$\|e\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2}$$

מהניתוח שלו עליה כי השגיאה הכלולה הקטנה ביותר מתקבלת כאשר  $1 = n$ , כלומר  
כאשר מתחברים רק בשגיאה של הברך.

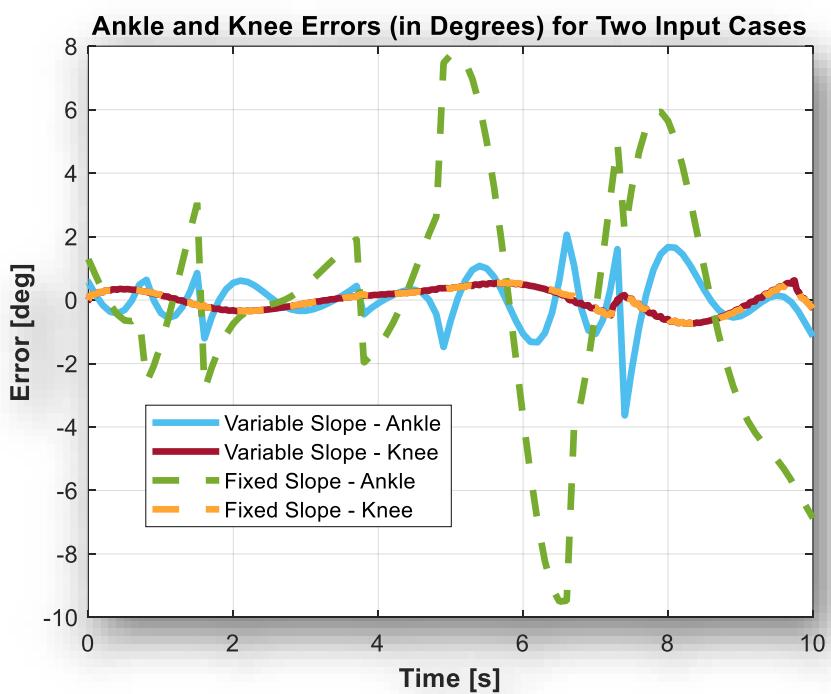


איור 19- מציאת  $n$  עם השגיאה הקטנה ביותר של נורמה 2

"יתכן כי בבחירה סט נתונים שונה ממחקר "תנועת אדם" יימצא ערך  $a$  אחר. עם זאת, התוצאה שהתקבלת תואמת את האינטואיציה: אם כל המנגנון מתבסס בעיקר על תנועת הברך, מעקב מודיק אחר שగיאות הזרויות של הברך הוא הדרכ הטובה ביותר להשגיה בקרה איבוטית של כל המערכת, תוך שמירה על תנועה טבעית ובטוחה למשתמש.

### ערך $a$ קבוע

לאחר שמצאנו כי  $1 = a$ , הוא הערך האופטימלי הרצינו את חוג הבקרה בשבייל לראות את השגיאות של שני המודלים שהצענו לעלה- שיפוע קבוע אל מול משתנה בזמן. קיבלנו-



איור 20-שגיאה של תנועת הברך והקרסול במעלה

התוצאות מראות כי במודל עם שיפוע משתנה בזמן יש קפיצות יחסית גדולות, כפי שהוא צפוי. הסיבה לכך היא שההתאמה שביצענו אינה מושלמת: קיימת בבר שגיאה מסוימת בההתאמה, ובנוסף נוצרות קפיצות בתוצאה מחיפור התאמה לפי המקרים השונים.

לעומת זאת, השיפוע המשתנה בזמן עוקב אחרי הזרויות בצורה די מדויקת לאורך כל מהזורה התנועה. חשוב לציין כי פיתוח מכני של מנגנון זהה יהווה אתגר ממשמעותי, ביון שהוא צריך ליצור מערכת שמסוגלת לשנות את השיפוע בזמן אמת תוך שמירה על דיק ובטיחות.

## סיכום

פרויקט הגמר עסוק בפיתוח מודל פרוטזה ממונעת לאדם קטוע וגל מעלה הברך, תוך שימוש במונע מרכזי אחד לשני מפרקים (ברך וקרטול). מטרת הפרויקט הייתה לא רק לפתח פתרון הנדסי מTEGR, אלא גם ליצור חוויה טבעית ונוחה להילבה, שתפחית את המעורבות של שרירים לא רלוונטיים ותשפר את הפעולות המטאבולית של המשתמש.

בחלק מהשלב ההתחלתי, אספנו מידע על תנועת מפרקים של אדם בריא מחקרים קיימים, כולל "מחקר תנועת אדם", שהעניק לנו נתונים בmortions על זווית הירך, הברך והקרטול בזמנים שונים. הנתונים שימשו לבניית מודל פשוט במשור קדמי-אחורית (ZY) וחולקה של התנועה לשבעה מקטעים. ניתוח הנתונים חשף את יחסי הגומלין בין תנועות הברך והקרטול, וקבע האם יש לשמור על סימן תנועה אחיד או הפוך בין המפרקים.

בהמשך, נבחנו שני מודלים של צימוד קינטטי: אחד עם שיפור קבוע והשני עם שיפור משתנה בזמן. באמצעות MATLAB חישבנו את השגיאה של המודל לפי root mean square error (RMSE) וראינו כי גם שיפור קבוע עם היסט קבוע מספק חיקוי די טוב של התנועה הטבעית, בעוד שיפור משתנה בזמן מדויק יותר. למודלים אלו יש קריפיות בתוצאה מחלוקת למקטעים.

לאחר מכן, פיתחנו במערכת Simscape מודל פיזי של הפרוטזה, שכלל את המונע, השוק וכף הרגל, תוך שימוש בצורות מלבניות (Solid) ובבנייה צורות מיוחדות בעזרת נקודות נגד כיוון השעון (solid extrusion).

המערכת כוללת שלושה חוגי בקרה עיקריים, בסדר הפעולה:

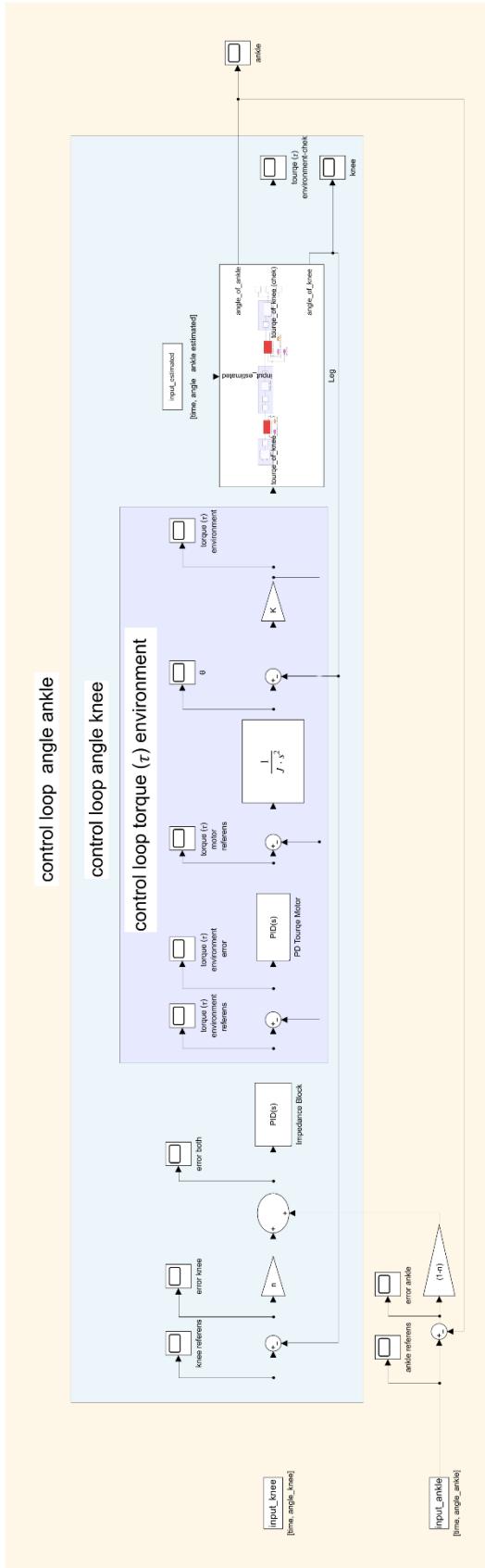
1. **חוג סגול (SEA)**: אחראי על בקרת המונע עצמו, תוך לקיחת האלמנט האלסטי בין המונע למפרק בחישוב. המשוואות הדינמיות מבטיחות התאמה בין torque המונע לתנועת המפרק:  $\tau_e = k(\theta - q), \tau_m - J\ddot{\theta}$ .

2. **חוג כחול (Impedance Control)**: אחראי על יצירת קשר בין חזיות הרצiosa של הברך לבין torque המונע, באמצעות עיבוד error signal דרך בлок PID החוג הכחול מאפשר אינטראקציה בטוחה ואძטטיבית בין האדם לפרוטזה, ומונע פגיעה פיזית בסביבה במקרים של עומס חיצוני.

3. **חוג צהוב (Optimal Impedance)**: מחשב weighted error בין הברך והקרטול כדי למצוא את ערך  $a$  האופטימלי. מהניתוח עליה כי עקיבה אחר הברך בלבד ( $1 = a$ ) היא השיטה הייעילה ביותר שמספקת את הביצועים הטובים ביותר של המערכת.

השילוב של שלושת החוגים מאפשר זרימה מלאה של האותות: הדוויות הרצויות נכנסות לחוג הצהוב, יוצרות **error signal** שמצון לחוג הכחול, וועבר התאמה במנוע דרך החוג הסגול. בכך בסופי בניית **environment torque** למודל **Simscape**.

לסיכום, הפרויקט מדגים כיצד ניתן לשלב מידע ביומכני, מודלים מתמטיים ומערכות בקרה שונות לייצור פרוטזה ממונעת, תוך שימוש בטבעית, בטיחות ואופטימיזציה של ביצוע המערכת, כאשר התובנה המרכזית היא כי עקיבה מדוייקת אחר הברך בלבד מספקת את האופטימום למודל זה.



## תרשים הסימולציה עם שמות הקבצים השותפים

Motorized Prosthetic Simulation  
2025  
שירות ניצן

קליטת שם תיקייה הסימולציה הראשית

צירת תיקייה ראשית +  
Simulation\_Log.txt

בחירה מאגר נתונים – STEP 1

מבוסס על "מחקר תנועת אדם"

נתונים לפי בחירת משתמש

נתונים שאנו בחרנו

Other\_dataset.m

הילכה 1.25 מ/ש  
לא שיפוע

ריצה 2.25 מ/שניה

הילכה 1.25 מ/ש

[paper\\_equations\\_run.m](#)

[paper\\_equations\\_walk.m](#)

Coef&slprj ש שימוש בתקיות  
modal\_coefs.mat-  
Supplementary Material.pdf-  
הסבר מורחב ב-Supplementary Material.pdf

Coef&slprj ש שימוש בתקיות  
modal\_coefs.mat-  
הסבר מורחב ב-Supplementary Material.pdf

[ALLDATAfinal\\_simulation.mat](#)

xicom זיוית המחקר שנבחר

[ALLDATAfinal0.mat](#)

xicom זיוית המחקר שנבחר

[report\\_data.m](#)

הכנות הזויות ל-SIMULINK

[Our\\_choise.m](#)

הכנות הזויות ל-SIMULINK

ניתוח נתונים והטאהה לינארית – STEP 2

齊מוד קינטטי

[find\\_section\\_p.m](#) ← האם להוציא גרפים?

[find\\_section\\_c.m](#)

חישוב מקטעים

[find\\_eq\\_p.m](#) ← האם להוציא גרפים?

[find\\_eq\\_c.m](#)

התאמת משוואות לינאריות

### STEP 3 – המודל פרמטרי אתחול

[parameters\\_to\\_D1.m](#)

בבחירה הפרמטרים של המודל הפיזי ושל חוג הבקרה

[createBar2hole.m](#)

יצירת צורה מיוחדת בסימסケפ

### STEP 4 – סימולציה רצת

[אופטימיזציה של ח](#)

[ערך קבוע של ח](#)

[error\\_sim.m](#)

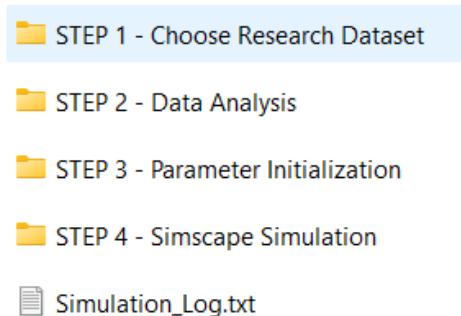
[error\\_sim\\_n1\\_const.m](#)

[D1\\_final.slx](#)

המודל בסימסקף

[סיום סימולציה](#)

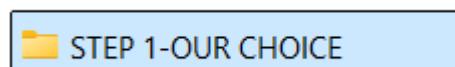
קבצים שמתכוונים לאחר סימולציה  
חווב לציין של מנת לקבל את כל הקבצים, יש לבקש להדפיס את כל הגרפים.  
בכל שלב נכנו קבצי mat שמכילים את הנתונים החשובים כך שניתן לטעון אותם בנפרד ולהמשיך  
לניתוח מתקדם. (לצורך זהה, נסמן אותם באדום).  
נקבל בתוך התקייה הראשית שייצרנו -



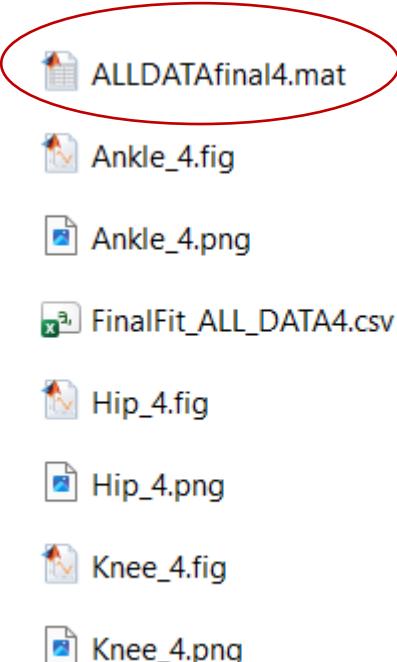
**שימוש לב** - לכל תח שבב יש מידע שמודפס בק אל command window ושמור בקובץ .simulation\_Log.TXT

#### בשלב ראשון

\* אם המשתמש רוצה את הנתונים שאנחנו בחרנו יש תקיה ביחד עם שאר קבצי הקוד שנקראת-



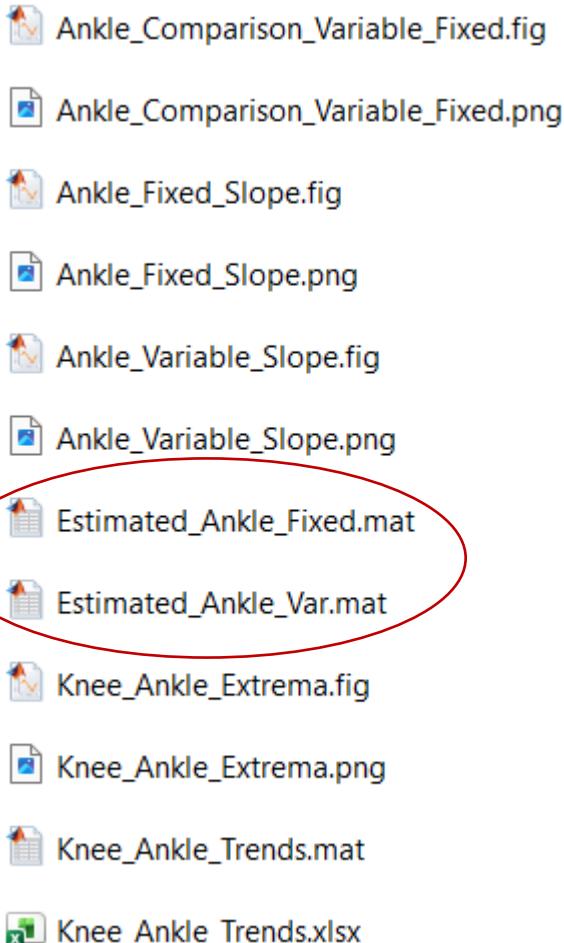
\*לכן בתוך התקייה החדשה שנוצרת כחלק מהשלב הראשון לא יהיה דבר.  
בתוך התקייה יהיו הקבצים הבאים-



- טבלה עם הזרויות, המומנט  
והמומנט המנורמל של שלושת  
המפרקים באמצעות מאה  
נקודות  
בפורמט של csv/mat

- הדפסה של הזרויות, המומנט  
והמומנט המנורמל של שלושת  
המפרקים.(בעצם בכל הדפסה  
יש את שלושת הגרפים)  
בפורמט של png/fig

### בשלב שני



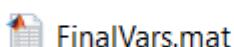
- הדפסה של זווית הקרסול  
המשוערת עם שיפוע  
משתנה/קבוע בזמן ושל שניהם  
אל מול זווית הקרסול המקורית  
מ"מ"חקר תנועת אדם"  
בפורמט של fig/png

- זווית משוערת של הקרסול עם  
SHIPוע משתנה/קבוע בזמן  
בפורמט של mat

- הדפסה של שבעת המקטיעים  
בפורמט של png/fig

- טבלה שמתארת את החלוקה  
לשבעת המקטיעים  
בפורמט של xlsx/mat

### בשלב שלישי



- כל הפרמטרים שנקבעו  
לSIMOLIZIA ע"י המשתמש  
בפורמט של mat

**בשלב רביעי**

בשלב זה , אם בוחרים אופטימיזציה של ח לא מודפסים גרפים.

- הדפסה של השגיאות של הצימוד הקינמטי שנבחר בפורמט של fig/png
  - הדפסה של חוג הבקעה בסקלרים ובסcapsule בפורמט של png
  - הבנisa והיציאה (שגיאות הזרויות) בפורמט של mat
  - שמירת הסימולציה עצמה בפורמט של matlab
- 
- Ankle\_Knee\_Errors.png
- 
- Ankle\_Knee\_Errors\_Combined.fig
- 
- D1\_final.png
- 
- D1\_final\_errors.mat
- 
- D1\_final\_inputs.mat
- 
- D1\_final\_simulation.mat
- 
- Leg.png