


פרויקט בנושא פיתוח שיטה למציאת פרמטרים לדימוי PLANT של רחפן



הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל
שיר קוזלובסקי 204321228
אביתר מטמון 305095002
הנחיה : מר יבגני אדיסון, רפאל.

פרופ' טל שימא, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, טכניון.

פרופ' משה אידן, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, טכניון.



תקציר

מטרת הפרויקט הייתה למדל PLANT מפושט של רחפן מסוג QUADROTOR באמצעות מספר פרמטרים עיקריים. המודל התאורטי שנבנה התבסס על 2 פרמטרים עיקריים: פרמטר הקושר בין מהירות המנועים לבין הדחף המתקבל בציר Z של גוף הרחפן, ופרמטר המייצג את החיכוך של הלהבים וכתוצאה מכך נוצר מומנט סבסוב בציר Z.

הסימולציה איתה עבדנו הייתה סימולציית דוגמא של MATLAB המדמה רחפן מסוג Quadcopter Mini-Drone של חברת PARROT. הסימולציה היא סימולציה מורכבת ומעמיקה אשר כוללת בתוכה דימוי כמעט מלא של PLANT הרחפן ושאר המערכות כגון סנסורים, דימוי סביבה וכו'. במהלך הפרויקט בוצעה שיטת למידת פרמטרים שהתבססה על פונקציית מחיר פשוטה אשר לקחה בחשבון את הפרשי הערכים המתקבלים עבור התאוצות והקצבים של המודל הפשוט ונתוני הייחוס (מודל מקורי/ רחפן אמיתי).

בשלב הראשון בוצע תהליך מציאת פרמטרים של המודל המפושט על סמך השוואה לסימולציה המקורית. תרחישי הטיסה נקבעו לפי הפרמטרים שנבחנו, כלומר עבור כל פרמטר נבחר תרחיש כך שהפרמטר הנבחן יבוא לידי ביטוי. לאחר מציאת הפרמטרים בוצעו תרחישי אימות הכוללים תמרון משולב על מנת לבדוק את נכונות המודל שהתקבל. עבור השלב הראשון התקבלה התאמה מדויקת בין המודל המפושט למודל המלא.

בשלב השני התהליך היה זהה לראשון רק שהפעם מודל הרפרנס היה הרחפן האמיתי ולא הסימולציה המקורית. לאחר ביצוע ניסויי הטיסה התקבלו פרמטרים קרובים יחסית לפרמטרים שהתקבלו בשלב הראשון. בשלב טיסת אימות המודל (תמרון משולב) ניתן היה לראות כי קיימת התאמה טובה בעיקר עבור הקצבים הזוויתיים. עבור התאוצות הקוויות ההתאמה הכללית הייתה טובה אך היה רעש מדידה גבוה אשר השפיע על מציאת הפרמטרים.

במהלך הפרויקט ראינו כי מודל מפושט (שהוא ליניארי) יכול לדמות את המערכת האמיתית כאשר התמרונים אינם 'חזקים' ואינם מצומדים. ניתן להרחיב בהמשך את העבודה ללמידת פרמטרים נוספים, מידול מדויק יותר של כוחות החיכוך וביצוע תמרונים הכוללים מרחקים ארוכים יותר.



תכן עניינים

1	תקציר.....
2	תכן עניינים.....
3	טבלת איורים.....
5	מודל תיאורטי.....
5	רוטור.....
6	כוחות אווירודינמיים.....
7	מומנטים.....
9	מבנה הסימולציה המקורית.....
12	בניית סימולציה מפושטת.....
12	מעבר מערכות צירים.....
13	מבנה בלוק מודל הרחפן המפושט.....
16	תהליך מציאת הפרמטרים - כללי.....
19	מציאת פרמטרים מסימולציה.....
30	תוצאות תרחיש הולידציה.....
33	למידת הפרמטרים במקביל.....
34	מציאת פרמטרים מרחפן אמיתי.....
34	נתוני הרחפן.....
35	תהליך הטסה.....
37	ניסויי טיסה של רחפן mini-drone.....
48	תוצאות תרחישי ואלידציה.....
53	המשך עבודה.....
54	סיכום ומסקנות.....
54	References.....



טבלת איורים

5	איור 1- מערכת צירים גוף ואינרציאלית.....
8	איור 2- מומנטים וכוח המתקבלים כתוצאה ממהירויות סיבוב שונות של הרוטורים.....
9	איור 3 – מבנה סימולציה הראשי.....
10	איור 4- בלוק המערכת המוטסת.....
10	איור 5 – מידול דינמיקת הרוטורים בסימולציה המקורית.....
11	איור 6 -בקרת הטיסה.....
11	איור 7 – בלוק סביבה.....
12	איור 8 -מערכות צירים של המודל המפושט והמלא.....
13	איור 9 – מיקום הבלוק שהוחלף בסימולציה המקורית.....
14	איור 10 – מבנה הבלוק המפושט.....
14	איור 11 –בלוק חישוב כוחות ומומנטים במודל המפושט.....
15	איור 12 – בלוק commander.....
15	איור 13 –מבנה בקרת הגובה.....
16	איור 14 – סכימת החוג ונקודת המדידה.....
17	איור 15 – סכמת תהליך חישוב פונקציית המחיר.....
17	איור 16 – סכמת תהליך ריצת הקוד.....
18	איור 17 – סכמת תהליך למידת פרמטרים באופן מקביל.....
19	איור 18 – תרחיש ראשון עבור פרמטר K.....
19	איור 19 – תרחיש שני עבור פרמטר K.....
20	איור 20 – תרחיש שלישי עבור פרמטר K.....
20	איור 21 התכנסות פונקציית המחיר עבור הפרמטר K.....
21	איור 22 - תאוצה קווית עבור המודל המלא והמודל המפושט בתרחיש הראשון עבור K.....
22	איור 23 – תאוצה קווית עבור המודל המלא והמפושט בתרחיש השני עבור K.....
22	איור 24 – תאוצה קווית עבור המודל המלא והמפושט בתרחיש השלישי עבור K.....
23	איור 25 – פקודת כניסה וביצוע תרחיש שלישי עבור K.....
24	איור 26 – תרחיש ראשון עבור b.....
24	איור 27 תרחיש שני עבור b.....
25	איור 28 - תרחיש שלישי עבור b.....
25	איור 29 – התכנסות פונקציית המחיר עבור הפרמטר b.....
26	איור 30 – מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש ראשון עבור b.....
26	איור 31 – – מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש שני עבור b.....
27	איור 32 – – מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש שלישי עבור b.....
27	איור 33 – פקודת כניסה וביצוע בתרחיש השלישי עבור b.....
28	איור 34 – פקודת גובה תרחיש ואלידציה.....
29	איור 35 – פקודות זוויתיות תרחיש ואלידציה.....
30	איור 36- תוצאות תרחיש הולידציה עבור תנועה זוויתית.....
31	איור 37 – תוצאות תרחיש ואלידציה עבור זווית אוילר.....

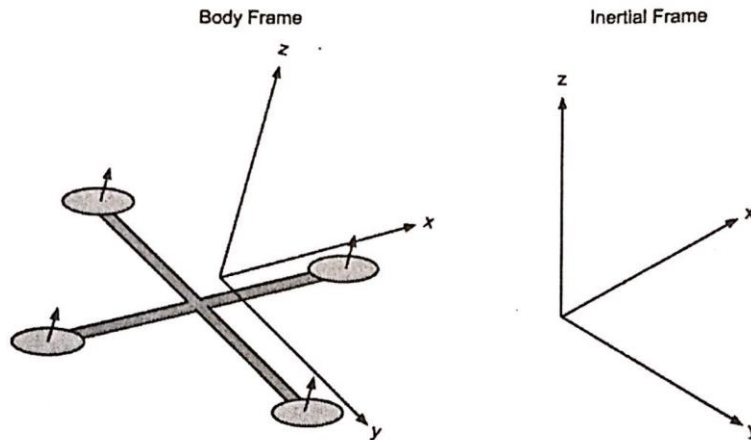


- איור 38 – תוצאות תרחיש ואלידציה עבור תנועה קווית..... 32
- איור 39 – תרחיש ראשון עבור k , למידה מרחפן אמיתי..... 37
- איור 40 – תרחיש שני עבור k , למידה מרחפן אמיתי..... 38
- איור 41, תרחיש שלישי עבור k , למידה מרחפן אמיתי..... 38
- איור 42 – פקודת כניסה וביצוע עבור תרחיש שלישי, למידת k , רחפן אמיתי..... 39
- איור 43- התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש ראשון..... 40
- איור 44 - התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש שני..... 41
- איור 45 - התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש שלישי..... 42
- איור 46 – תרחיש ראשון, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b 43
- איור 47 - תרחיש ראשון, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b 44
- איור 48- תרחיש שני, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b 44
- איור 49 - - תרחיש שני, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b 45
- איור 50 -- תרחיש שלישי, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b 45
- איור 51 - תרחיש שלישי, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b 46
- איור 52 – התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש ראשון..... 47
- איור 53 - - התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש שני..... 47
- איור 54 - התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש שלישי..... 48
- איור 55 – תוצאות מהירויות ותאוצות קוויות עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 49
- איור 56 - תוצאות זוויות אוילר עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 50
- איור 57 - תוצאות מהירויות זוויתיות עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 51
- איור 58 – תוצאות תאוצות ומהירויות קוויות, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 52
- איור 59 - תוצאות זוויות אוילר, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 52
- איור 60 - תוצאות מהירויות זוויתיות, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט..... 53



מודל תיאורי

בחלק הראשון בפרויקט נבנה מודל אווירודנמי בסימולציית הרחפן המתמקד בהפיכת הסיגנלים המגיעים מהבקרה לכוחות ומומנטים. זהו מודל מפורש ובסיסי יחסית, וזהו גם יתרונו היחסי. המודל קל לשינוי, נגיש ונוח ומתבסס על מספר פרמטרים עיקריים. המודל מתבסס על עבודה קודמת אשר פותחה בה התיאוריה עבור רחפן אשר הינו בקונפיגורצית (+) במערכת צירי גוף.



Quadcopter Body Frame and Inertial Frame

איור 1- מערכת צירים גוף ואינרציאלית

רוטור

עבור רוטור חשמלי כמו במקרה שלנו, מומנט הפיתול נתון ע"י:

$$(1) \quad \tau = K_t(I - I_0)$$

כאשר I זהו זרם הכניסה, I_0 זהו זרם הייחוס במצב ללא עמיסה על הרוטור, K_t הוא קבוע פרופורציה של המומנט.

המתח הנופל על הרוטור הוא סכום של EMF והפסדים כתוצאה מהתנגדות:

$$(2) \quad V = IR_m + K_v\omega$$

כאשר R_m התנגדות הרוטור, ω מהירות זוויתית של הרוטור, K_v קבוע פרופורציה.

בהזנחת התנגדות הרוטור ובנוסף $\tau \ll K_t I_0$ ניתן לקבל את הקשר הבא עבור ההספק (andrew.gibiansky):

$$(3) \quad P \approx \frac{K_v}{K_t} \tau \omega$$



כוחות אווירודינמיים

נניח כי הרחפן נמצא במצב ריחוף. הקשר בין ההספק למהירות הוא:

$$(4) \quad P = TV_h$$

כאשר V_h היא מהירות האוויר העובר דרך הרוטור בזמן ריחוף. על פי תאוריית התנע עבור כנף סובבת, תוך הנחה כי המהירות רחוק מהרחפן היא 0 והרחפן במצב ריחוף מתקבל הקשר הבא בין המהירות לדחף תוך שימוש במשוואות שימור מסה, משוואת התנע ומשוואת ברנולי (Cunha, 2013):

$$(5) \quad V_h = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}}$$

כאשר T הדחף, ρ צפיפות האוויר, A השטח הנוצר על ידי סיבוב הרוטור.

כעת ניתן לכתוב את הקשר הבא:

$$(6) \quad P = \frac{K_v}{K_t} \tau \omega = \frac{K_v}{K_t} K_t T \omega = \frac{T^{1.5}}{\sqrt{2\rho A}}$$

כאשר K_t קבוע פרופורציה התלוי בקונפיגורציית הלהב ובפרמטרים שלו.

נבודד את הדחף ונקבל את הקשר למהירות סיבוב הרוטור:

$$(7) \quad T = \left(\frac{K_v K_t \sqrt{2\rho A}}{K_t} \omega \right)^2 = K \omega^2$$

מטעמי סימטריה הכוחות מכל הרוטורים זהים לכן ניתן לכתוב את שקול הכוחות המתקבל בציר Z גוף:

$$(7) \quad T_B = \sum_{i=1}^4 T_i = k \left[\sum \omega_i^2 \right]$$



$$(8) \quad F_D = \begin{bmatrix} -K_d \dot{x} \\ -K_d \dot{y} \\ -K_d \dot{z} \end{bmatrix}$$

מומנטים

כוח החיכוך הפועל על רוטור כאשר הוא מסתובב נתון ע"י:

$$(8) \quad F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2$$

כאשר v מהירות משיקית של הרוטור, A שטח ייחוס של הרוטור (בשונה מה A שהוזכר קודם), C_D מקדם גרר.

מומנט הסבסוב (סביב ציר Z גוף) המתקבל כתוצאה מכוח החיכוך הוא:

$$(9) \quad \tau_D = \frac{1}{2} R \rho C_D A v^2 = \frac{1}{2} R \rho C_D A (\omega R)^2 = b \omega^2$$

כאשר b מקדם החיכוך המימדי.

המומנט סביב ציר Z גוף המתקבל הוא:

$$(10) \quad \tau_Z = b \omega^2 + I \dot{\omega}$$

כאשר I מומנט האינרציה של הרוטור.

על מנת לפשט את המודל נניח כי $\dot{\omega} \approx 0$ ונקבל את המומנט הפועל בציר Z גוף:

$$(11) \quad \tau_Z = (-1)^{i+1} b \omega_i^2$$

כאשר $(-1)^{i+1}$ חיובי עבור הרוטור ה- i כאשר הוא מסתובב עם כיוון השעון.

סה"כ המומנט המתקבל בציר Z גוף הוא:

$$(12) \quad \tau_\psi = b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_3^2)$$



המומנטים עבור ROLL ו- PITCH מתקבלים מהפרש הדחף המתקבל עבור כל צמד רוטורים נגדי:

$$(13) \quad \tau_\phi = \Sigma r \times T = L(K\omega_1^2 - K\omega_3^2) = LK(\omega_1^2 - \omega_3^2)$$

$$(14) \quad \tau_\theta = LK(\omega_2^2 - \omega_4^2)$$

כאשר L הינו המרחק בין הרוטורים למרכז הרחפן.

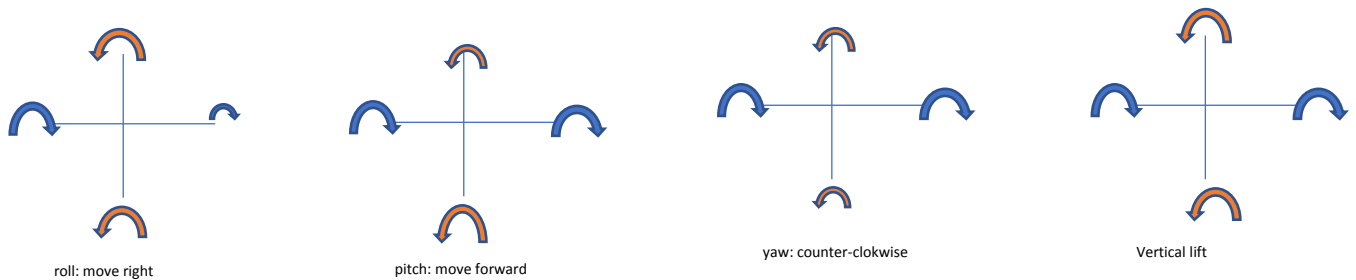
סה"כ נקבל:

(15)

$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix}$$

המומנט במערכת צירי גוף מתקבל כתוצאה מסיבוב זוג רוטורים נגדיים בכיוונים הפוכים. סיבוב זה גורם למומנט טהור כתוצאה מעילוי הפועל בכיוונים מנוגדים.

בשרטוט הבא מתוארים המומנטים הפועלים כתוצאה מכיוון סיבוב הרוטורים ועצמת הסיבוב (גודל החץ מייצג גודל מהירות סיבוב של הרוטור):



איור 2 - מומנטים וכוח המתקבלים כתוצאה ממהירויות סיבוב שונות של הרוטורים

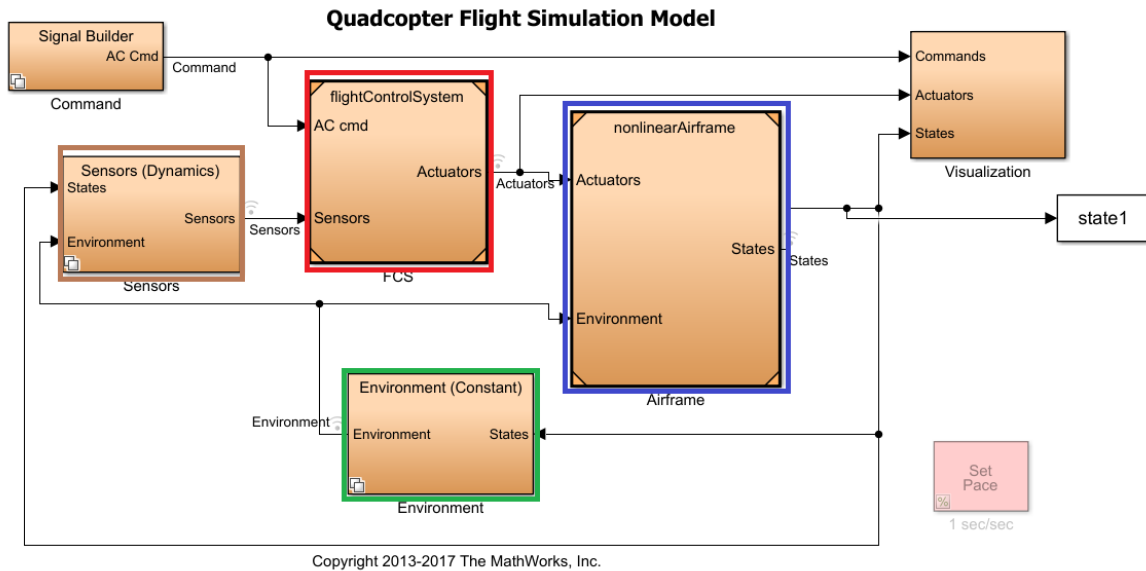
המודל שקיבלנו הוא מודל מפשט ביותר, כאשר הזנחנו את התופעות הלא ליניאריות, ואת כוחות החיכוך כתוצאה מתנועה סיבובית של הרחפן.



מבנה הסימולציה המקורית

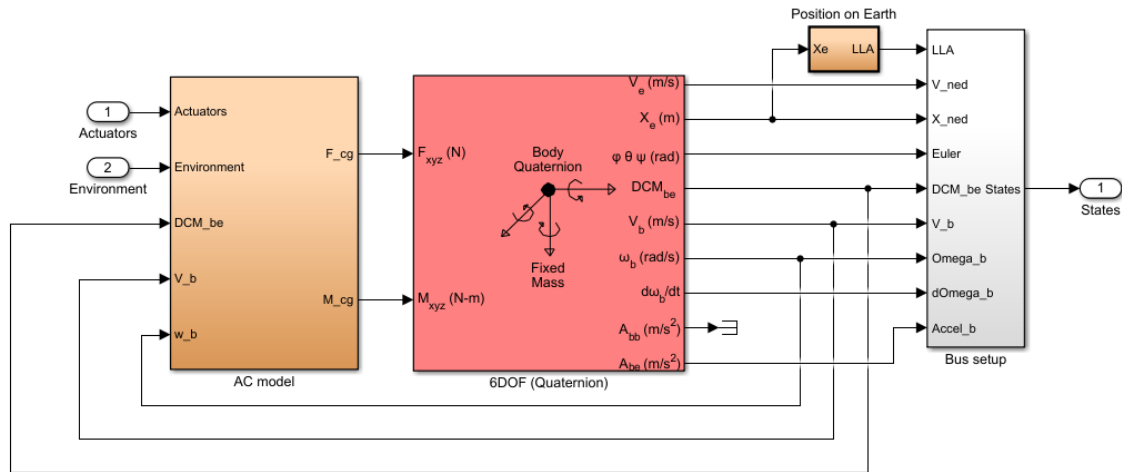
הסימולציה איתה עבדנו היא סימולציית הרחפן של matlab הנקראת Quadcopter example project גרסת 2017b. הסימולציה עברה עדכונים בין גרסאות שונות של matlab. הסימולציה נבנתה על בסיס ה-PLANT שמודל בעבודה קודמת (Paul Pounds, 2006). המודל של הרחפן בסימולציה הינו מורכב ומעמיק ולכן נרצה לקבל מודל פשוט יותר המתבסס על מספר פרמטרים עיקריים שניתן לתקף אותו אל מול ניסוי טיסה.

מבנה הסימולציה הראשי:



איור 3 – מבנה סימולציה הראשי

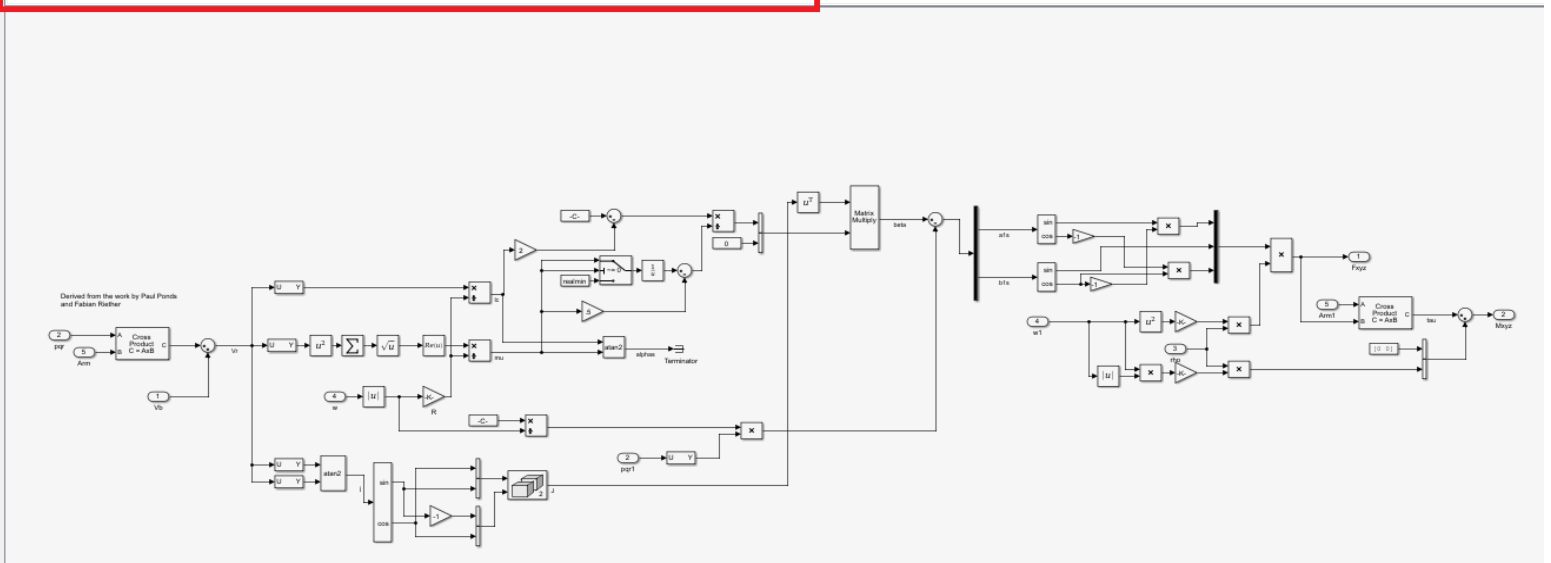
1. **מודל מדידים**- מודל זה בא לדמות את מדידי הקצב ומדידי התאוצה. המודל מקבל את נתוני הסביבה ומשתני המצב של המערכת ומוציא את קריאות החיישנים.
2. **מודל המערכת המוטסת**- בלוק זה מהווה מודל של מערכת הרחפן. בתוך הבלוק מתבצע חישוב הכוחות והמומנטים הפועלים על הרחפן, ובנוסף מתבצעת אינטגרציה על 6 משוואות התנועה (3 משוואות כוחות ו-3 משוואות מומנטים).



איור 4- בלוק המערכת המוטסת

בלוק AC model - בלוק זה מדמה את המודל הפיזיקלי של הרחפן. בלוק זה מקבל נתוני מהירות זוויתית וקווית ומפיק את המומנט והכוח הפועלים על הרחפן במערכת צירי גוף במהלך הטיסה. בתוך הבלוק AC model מופיע הבלוק Rotor Dynamics (משורשר תחת הבלוקים המופיעים בשורת הכתובת בתמונה):

nonlinearAirframe ▶ Nonlinear ▶ AC model ▶ Motor Forces and Torques ▶ For Each Subsystem ▶ Rotor Dynamics



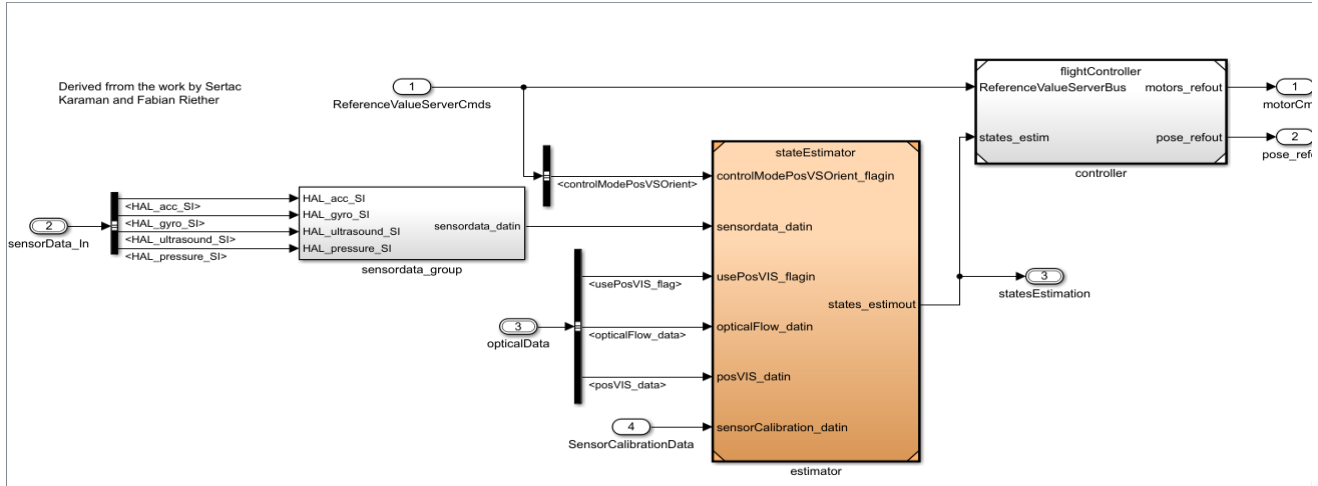
איור 5 – מידול דינמיקת הרוטורים בסימולציה המקורית



בבלוק הנ"ל מבוצע החישוב בפועל של הכוח והמומנט על דיסקת הרוטור. במהלך הפרויקט יוחלף הבלוק במודל מפושט יותר.

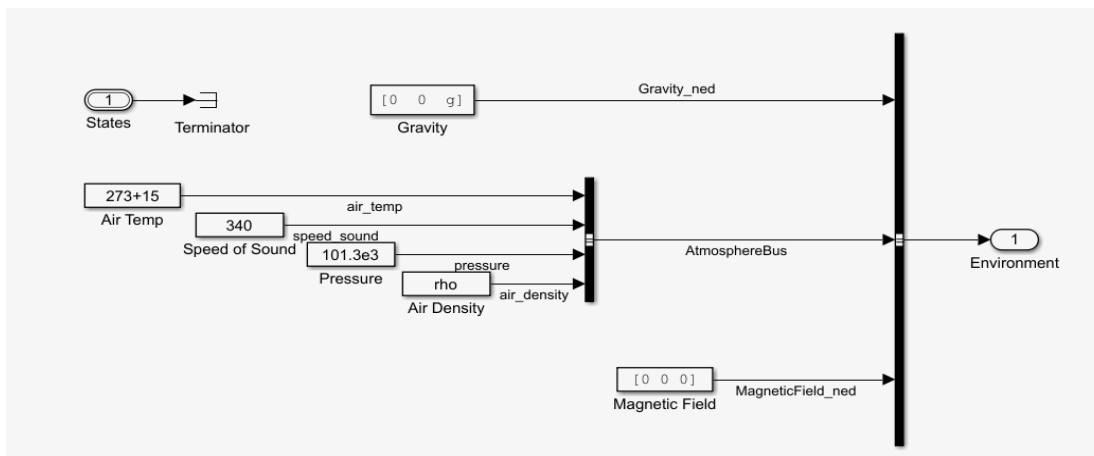
בלוק 6DOF- בבלוק זה מתבצעת האינטגרציה של 6 משוואות התנועה. מומנטי האינרציה נקבעים על ידי הקובץ Vehicle.Airframe.Inertia וניתן לגשת אליהם על ידי מאפייני הבלוק.

3. **בקרת הטיסה**- בלוק זה מהווה את בקרת הטיסה של הרחפן. הבלוק מקבל פקודות ממחולל האותות ופידיבק ממערכת סנסורים, ומחשב את הפקודה הרצויה למפעילים.



איור 6- בקרת הטיסה

4. **סביבה**- בלוק זה מפיק את נתוני הסביבה השונים (כגון לחץ, צפיפות וכו').



איור 7 - בלוק סביבה

בנוסף קיימים עוד בלוקים של תצוגה (VISUALIZATION), מאפשר הצגת הפלט בצורה גרפית), ובלוק סנסורים.



בנית סימולציה מפושטת מעבר מערכות צירים

בשלב הראשון בוצע מידול מפושט של הרחפן (בלוק **subsystem simplified**) אשר מטרתו הייתה להחליף את הבלוק המורכב הקיים (**Motor Forces and Torques**) בסימולציה המובנית.

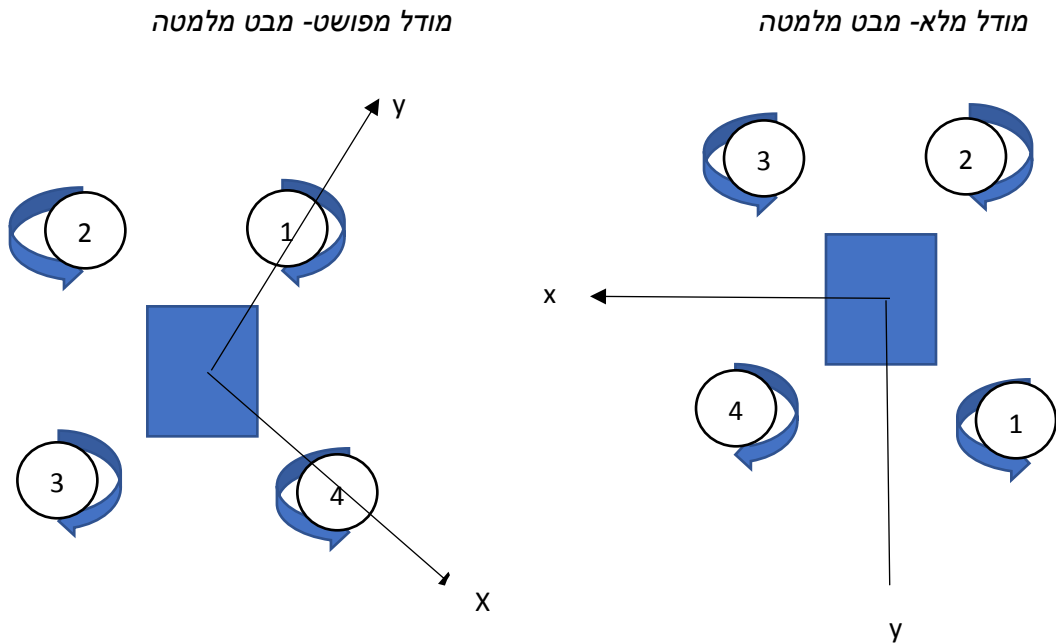
מערכת הצירים עבור המודל המקורי נבחנה על ידי בחינת מומנטים והשוואתם לקריאות מהירויות המנוע (RPM):

- עבור מציאת ציר Z ניתנה פקודת מומנט בציר Z ונבחן גרף המומנט (סימן חיובי/שלילי) וקריאת סיבובי הרוטורים (חיובי/שלילי).
- עבור מציאת ציר X ניתנה פקודת מומנט בציר X ונבחנו גדלי מהירויות סיבוב הרוטורים וסימנם (חיובי/שלילי). במקרה זה התקבל כי RPM של רוטור 4 ו-1 היה גדול בערכו מוחלט מאשר 2 ו-3, ובנוסף קיבלנו RPM1 חיובי ו-RPM4 שלילי.
- עבור מציאת ציר Y ניתן להשתמש בכלל יד ימין, אך לצורך וידוא גם כאן ניתנה פקודת מומנט בציר Y ונבחנו גדלי וסימני מהירויות הרוטורים.

מטריצת הסיבוב ממערכת מודל מפושט למערכת מודל מלא:

$$C_{full}^{simple} = \begin{pmatrix} \cos(-\frac{\pi}{4}) & -\sin(-\frac{\pi}{4}) & 0 \\ \sin(-\frac{\pi}{4}) & \cos(-\frac{\pi}{4}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

מערכות הצירים עבור המודל המלא והמודל המפושט:



איור 8 - מערכות צירים של המודל המפושט והמלא

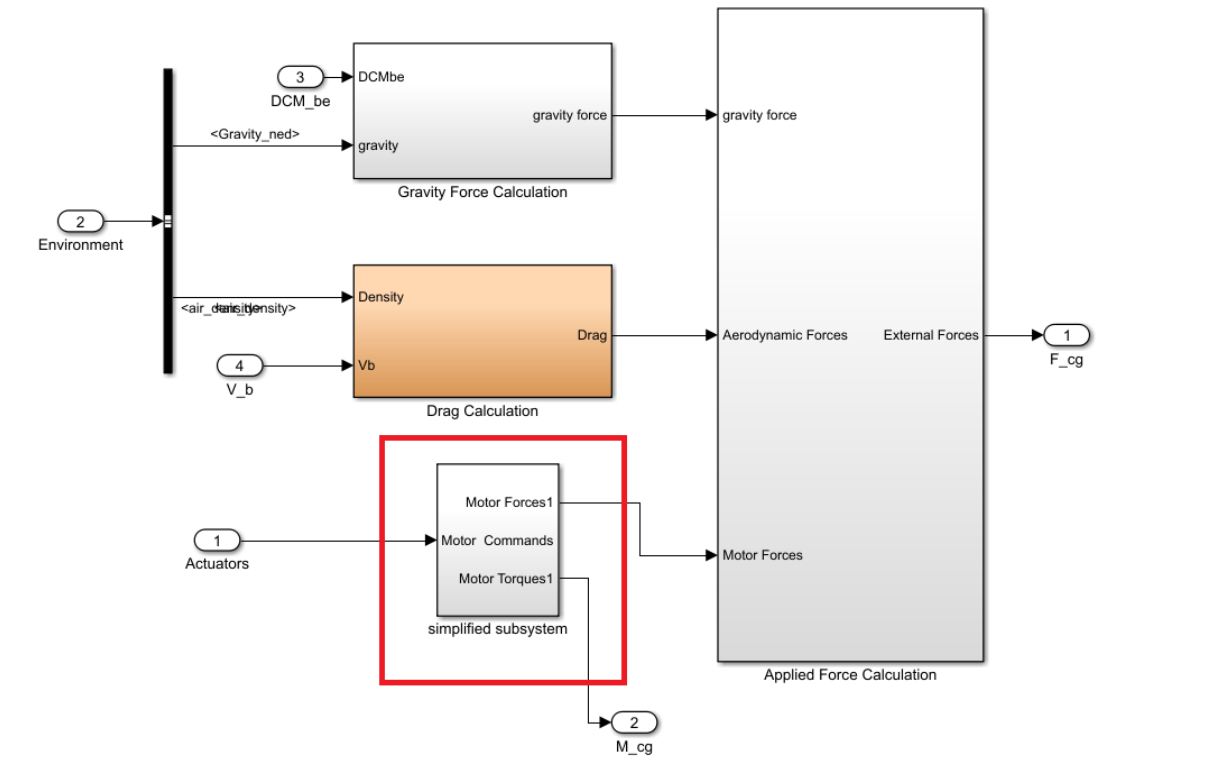


על מנת להעביר את **המומנטיים** ממערכת מקורית למפושטת נשתמש במטריצת סיבוב ולאחר מכן נהפוך את הסימן של רכיב Z.

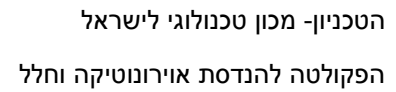
עבור חישוב הכוחות נשים סימן מינוס ברכיב Z במודל המתמטי המפושט על מנת להיות תואם למערכת המקורית.

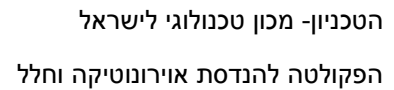
מבנה בלוק מודל הרחפן המפושט

בתוך בלוק AC MODEL הוחלף הבלוק המקורי **Motor Forces and Torques** בבלוק המפושט **subsystem simplified**:



איור 9 – מיקום הבלוק שהוחלף בסימולציה המקורית





לרחפן יש מנגנון המראה אוטומטי ברגע שמתחילה הסימולציה. ההמראה האוטומטית של הרחפן מוגדרת לשניה אחת ובתאוצה של 2 מטר לשניה. ההגדרה של זמן ההמראה נמצא בבלוק **COMMAND**:



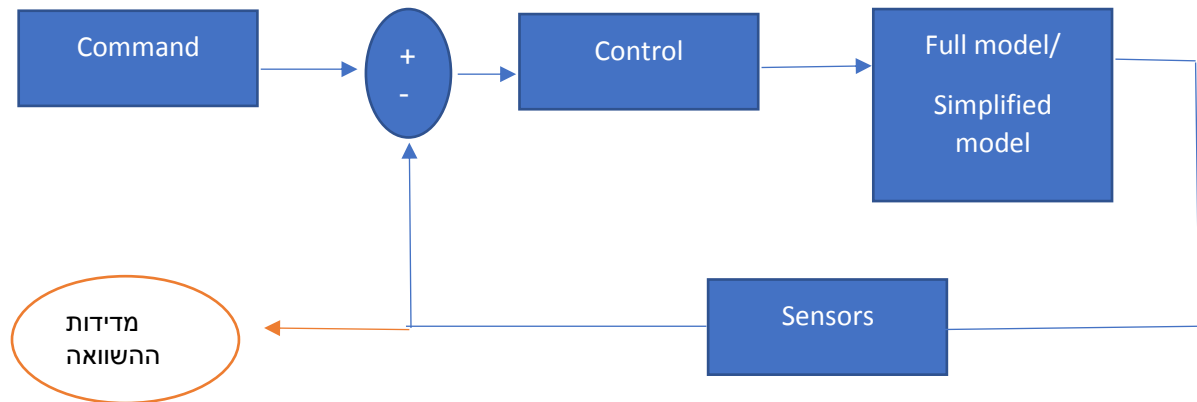
איור 13 – מבנה בקרת הגובה

15



תהליך מציאת הפרמטרים - כללי

תהליך מציאת הפרמטרים התבצע על בסיס השוואת התאוצות הקוויות והמהירויות הזוויתיות המתקבלות עבור המודל המלא והמודל המפושט. מכיוון שהמודל המפושט מתבדר בחוג פתוח התהליך בוצע בחוג סגור. דבר זה מניח כי שאר החוג (לרבות מערכת הבקרה) זהה עבור המודל המפושט ועבור המודל המלא. עבור זיהוי הפרמטרים של מודל הסימולציה המלא זוהי הנחה נכונה (מכיוון שהחוג זהה עבור 2 המודלים) אך עבור זיהוי פרמטרים של רחפן בניסוי טיסה בפועל ייתכן וההנחה תהיה שגויה.



איור 14 – סכימת החוג ונקודת המדידה

נגדיר פונקציית מחיר J באופן הבא, כאשר ערכי הרפרנס נמדדים מהמודל המלא של הסימולציה.

$$(18) \quad J = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^n (y_{l,k} - y_{l,k}^{ref})^2$$

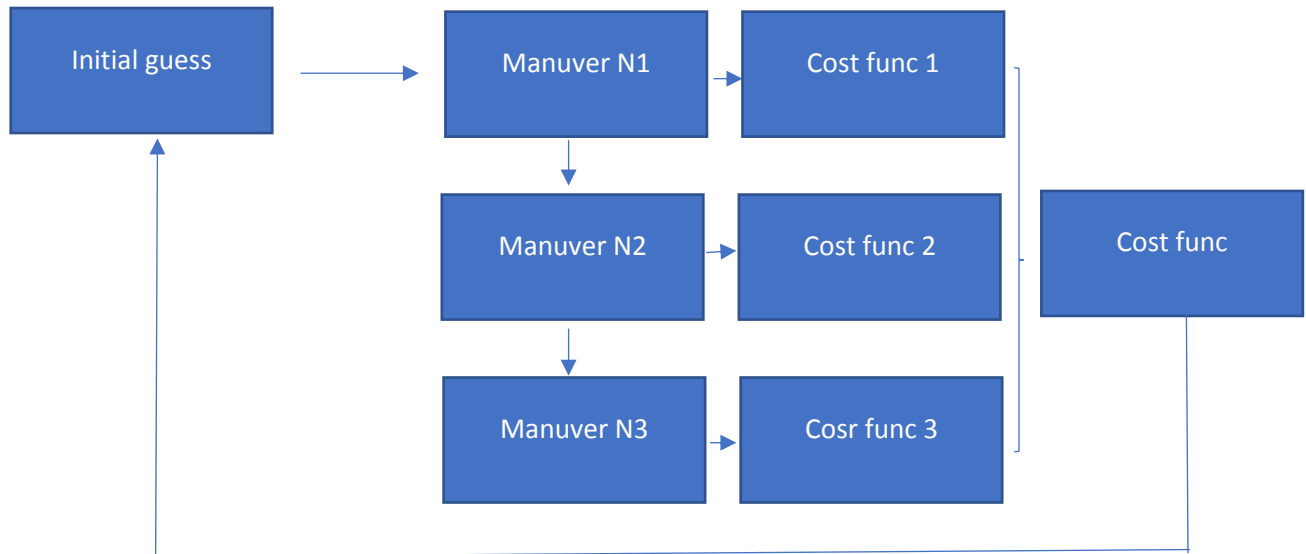
כלומר עבור כל פרמטר מתקיימים 3 ניסויים (האינדקס k) כאשר בכל ניסוי יש n נקודות השוואה (האינדקס l). המידע הנמדד הוא מהירויות זוויתיות ותאוצות קוויות בשלוש הצירים. על מנת למצוא את הקבועים נדרוש מינימום לפונקציית המחיר J .

תהליך מציאת הפרמטרים יבוצע בהדרגה תוך עירור המודלים הרלוונטים לכל פרמטר:

1. למידת הפרמטר b תתבצע על בסיס השוואת גרף תאוצה קווית בציר Z כאשר פקודות הכניסה יהיו תמרונים קווים בציר Z .
2. למידת הפרמטר K תתבצע על בסיס גרפי מהירות זוויתית ציר Z כאשר פקודות הכניסה יהיו תמרונים זוויתיים סביב ציר Z .
3. לאחר מציאת הפרמטרים בשיטה המפורקת נבצע למידה נוספת עבור תמרון משולב כאשר הפרמטרים ימצאו במקביל. תנאי ההתחלה עבור הלמידה הזאת יהיה הפרמטרים שנמצאו קודם לכן.

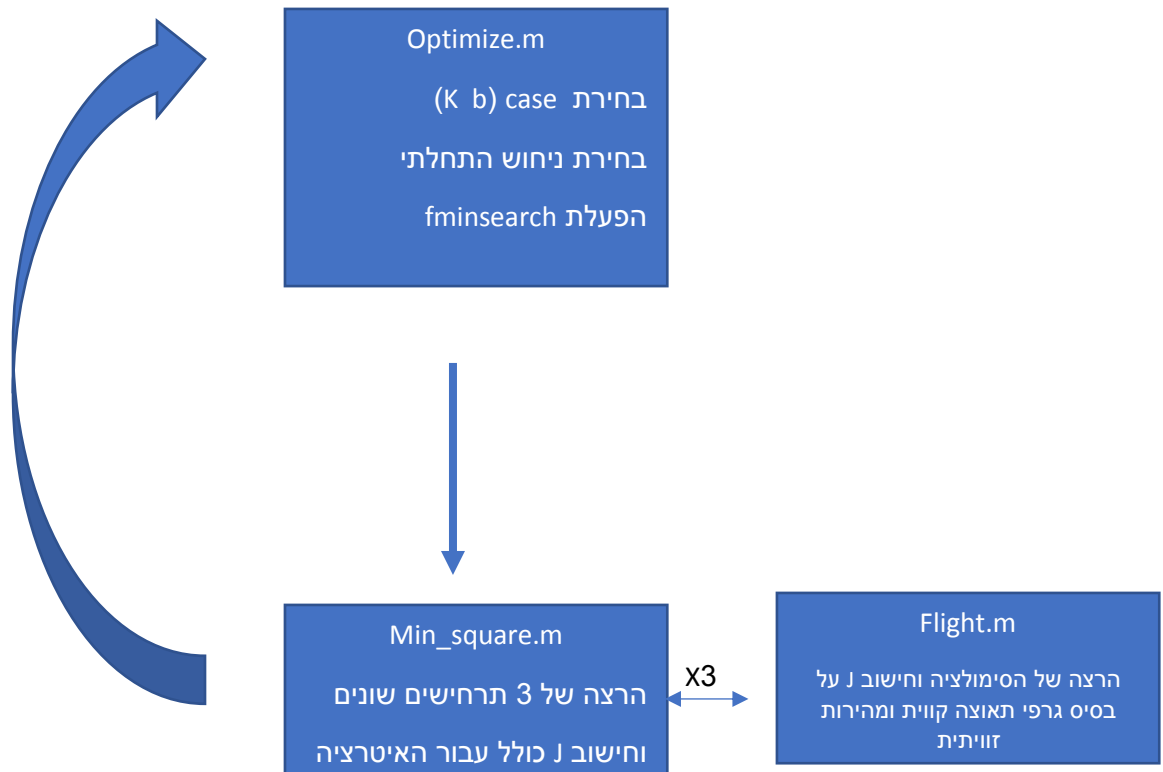


תיאור סכמטי של תהליך למידת פרמטר שלב 1+2:



איור 15 – סכמת תהליך חישוב פונקציית המחיר

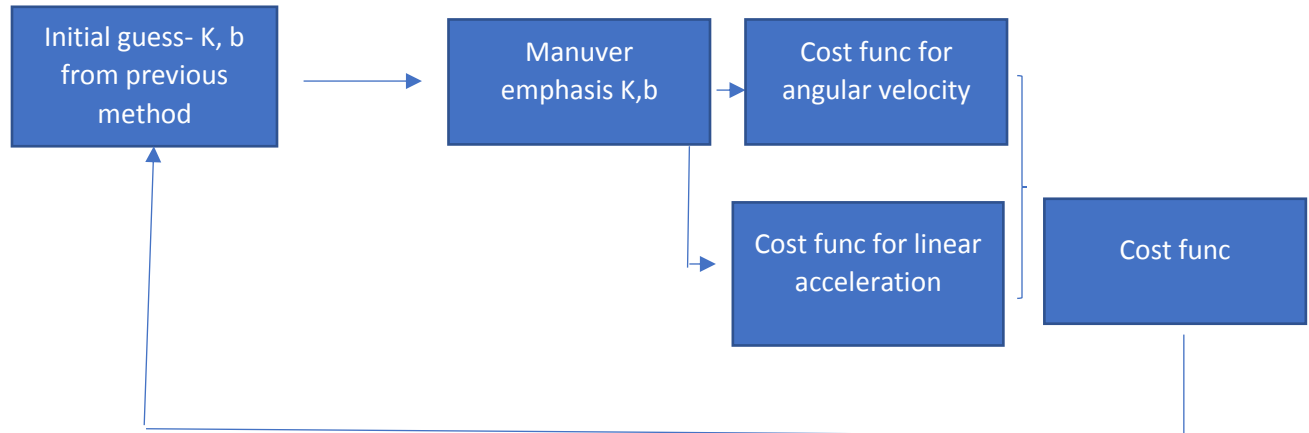
תיאור סכמת הקוד עבור השלבים הנ"ל:



איור 16 – סכמת תהליך ריצת הקוד



לאחר למידת הפרמטרים באופן מפורק (כלומר כל פרמטר נבחן לפי תמרון ספציפי שבו הוא בא לידי ביטוי) נרצה לבצע העמקה של לימוד הפרמטרים באמצעות למידה במקביל על ידי תמרון משולב. כלומר ניקח את הפרמטרים שנמצאו בשיטה המפורקת ונשתמש בהם בתור תנאי ההתחלה לשיטה השנייה. השיטה השנייה התבצעה כלדקמן:



איור 17 – סכמת תהליך למידת פרמטרים באופן מקביל

כלומר כעת הלמידה תתבצע במקביל עבור 2 הפרמטרים כאשר התמרון יהיה משולב.

הפרמטר n (אשר מסמן את מס' נקודות ההשוואה) נקבע לפי תדר הדגימה של האות (דגימת ערכי y) ולפי זמן הניסוי באופן הבא:

(19)

$$n = t\omega$$

נקבע אותו תדר דגימה עבור הסימולציה עם המודל המלא ועבור המודל הפשוט על מנת לקבל השוואה מדויקת. על מנת להיות מותאמים לתדר הדגימה של הרחפן (mini drone) נבחר אותו להיות $\omega=200$ hz.

כאמור למידת הפרמטרים התבצעה על בסיס 3 תרחישים שונים, כאשר בכל תרחש נלקחו בחשבון הן התאוצות הקוויות והן המהירויות הזוויתיות (מדידות, קצבים ותאוצות).

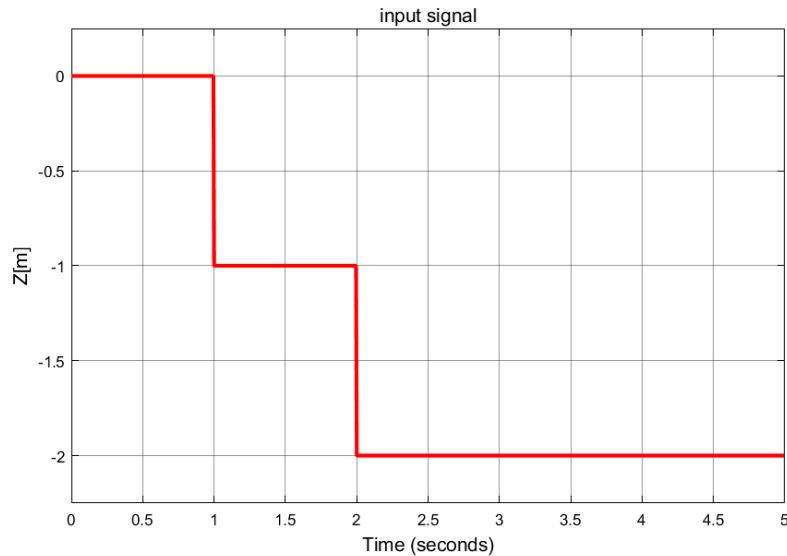


מציאת פרמטרים מסימולציה

מציאת הפרמטר K

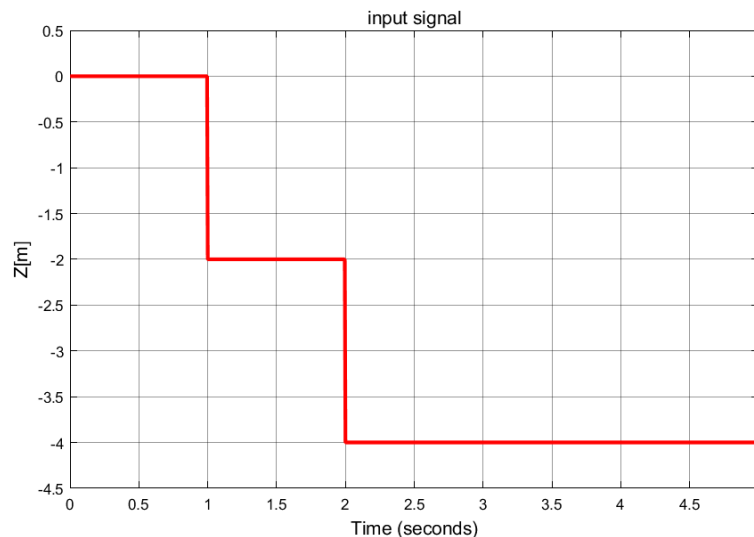
על מנת להביא את הפרמטר לידי ביטוי כך שהוא מבודד משאר הפרמטרים (עד כדי קירוב המודל) נבחנו תרחישים המביאים לידי ביטוי כוח בציר Z BODY.

התרחיש הראשון הוא עלייה לגובה של 1 מטר, ריחוף קצר בגובה הזה ולאחר מכן עלייה לגובה של 2 מטר.



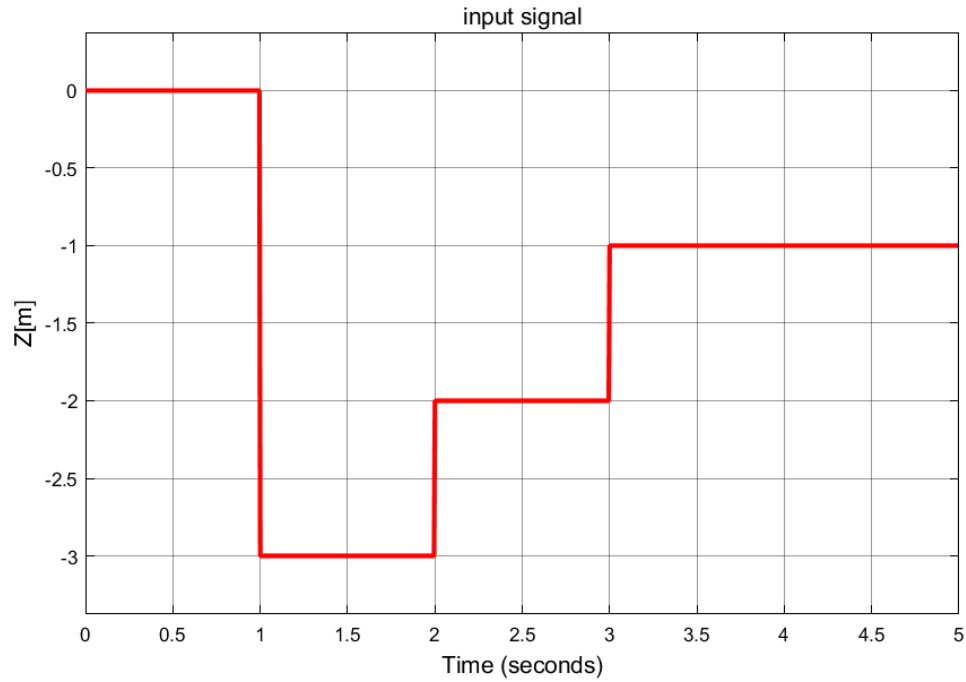
איור 18 – תרחיש ראשון עבור פרמטר K

התרחיש השני דומה ראשון רק שבמקרה זה העלייה לגובה היא בקפיצות של 2 מטר כל פעם:



איור 19 – תרחיש שני עבור פרמטר K

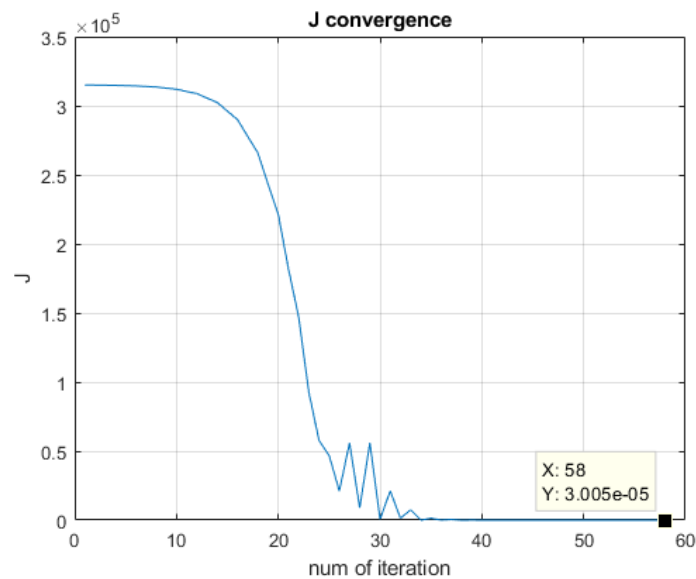
התרחיש השלישי הוא עלייה לגובה של 3 מטר ולאחר מכן ירידה הדרגתית לגובה 1 מטר:



איור 20 – תרחיש שלישי עבור פרמטר K

הפרמטר שהתקבל הוא: $K = 4.72 \cdot 10^{-8}$

גרף ההתכנסות של פונקציית המחיר J :



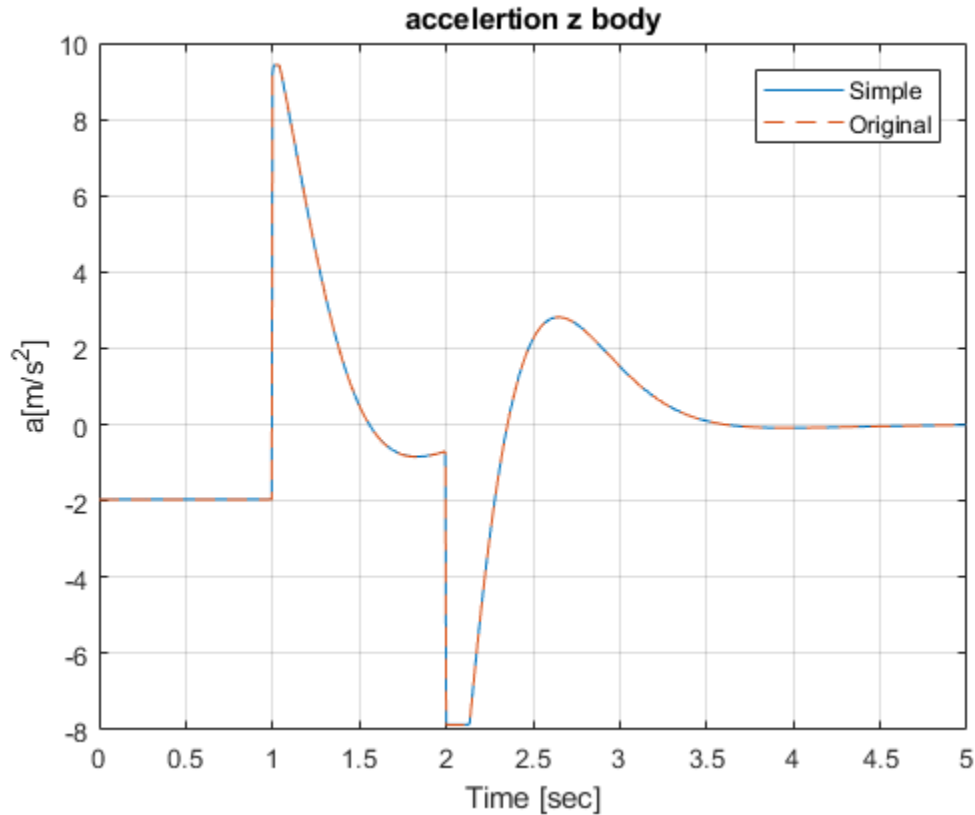
איור 21 התכנסות פונקציית המחיר עבור הפרמטר K

ניתן לראות כי לאחר 58 איטרציות פונקציית המחיר מתכנסת לסדר גודל של 10^{-5} , כלומר קיבלנו מינימום גלובלי.



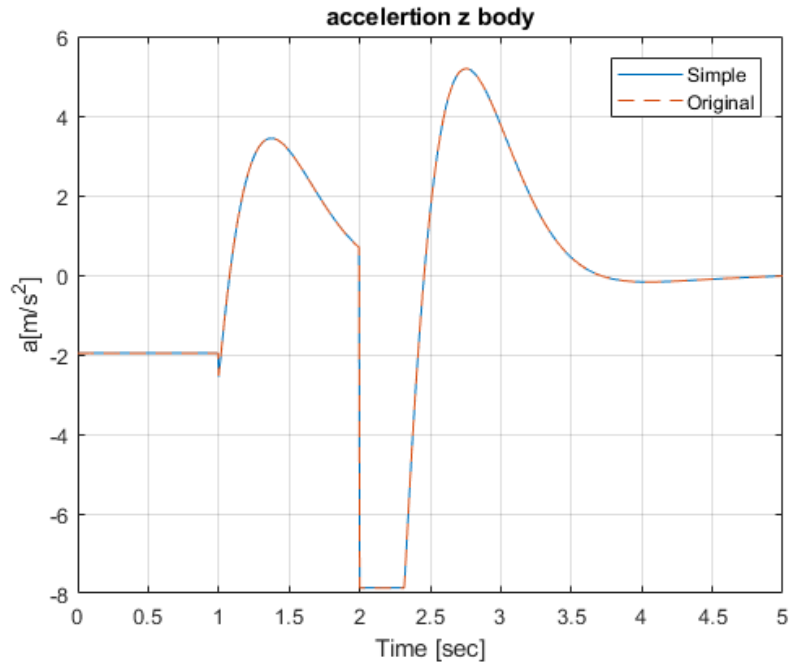
ההתאמה שהתקבלה עבור התמרונים הנ"ל:

עבור התרחיש הראשון:



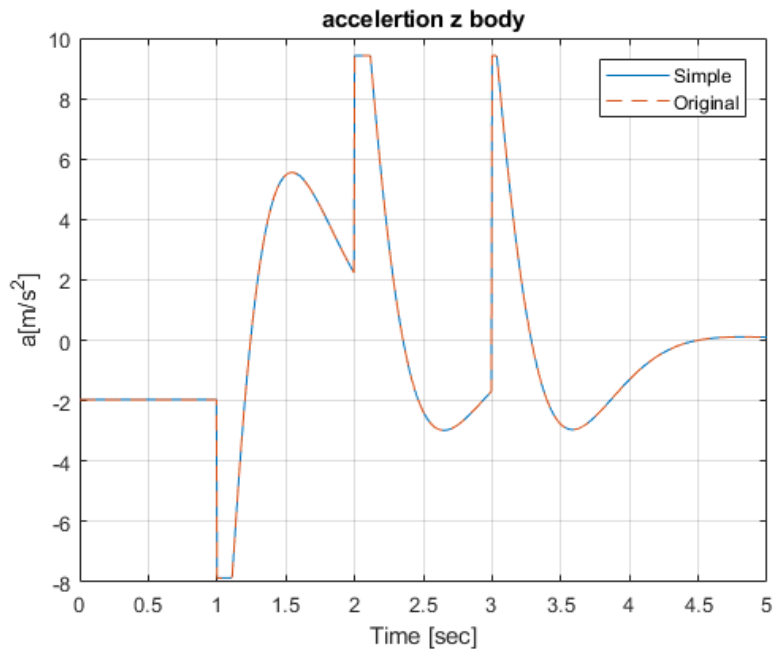
איור 22 - תאוצה קווית עבור המודל המלא והמודל המפושט בתרחיש הראשון עבור K

נשים לב כי פקודת התאוצה שהתקבלה הינה חיובית למרות שנתנו בפקודת כניסה לעלות לגובה בציר Z, כלומר היינו מצפים לתאוצה שלילית (ציר Z חיובי כלפי מטה). הדבר נובע מכיוון שהרחפן מתחיל מתאוצה התחלתית של 2 m/s^2 (מנגנון ההמראה האוטומטית) בכיוון מינוס Z ולכן בקר הגובה מושפע מזה.



איור 23 – תאוצה קווית עבור המודל המלא והמפושט בתרחיש השני עבור K

עבור התרחיש השלישי:

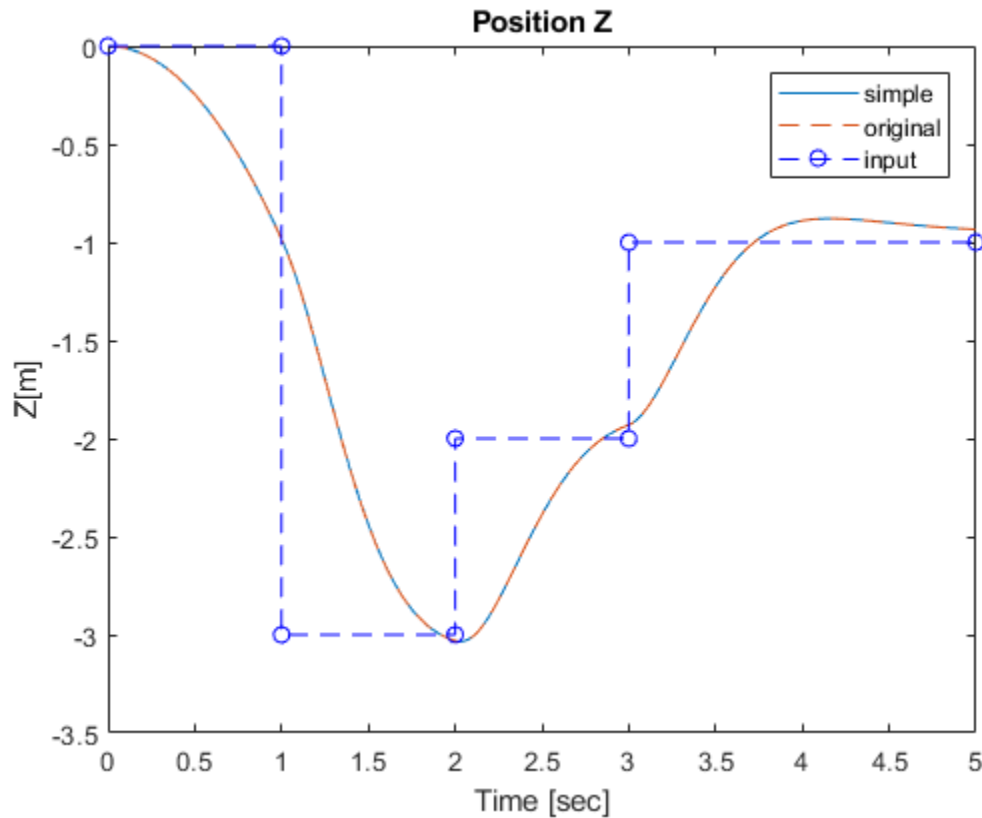


איור 24 – תאוצה קווית עבור המודל המלא והמפושט בתרחיש השלישי עבור K

ניתן לראות כי התקבלה התאמה טובה בין הסימולציה המלאה למפושטת.



נשרטט גרף של פקודת כניסה (מיקום בציר Z) אל מול הביצוע בתרחיש 3. הפלט מהסימולציה אינו כולל מיקומים (X Y Z) אינרציאלי) לכן על מנת לשרטט את הגרף נבצע אינטגרציית אוילר (בעלת שגיאה של $O(2)$) על המהירות. כלומר נבצע הכפלה של כל אלמנט בוקטור המהירות ב- $\frac{1}{\omega} = 0.005sec$ ונבצע סכימה:



איור 25 – פקודת כניסה וביצוע תרחיש שלישי עבור K

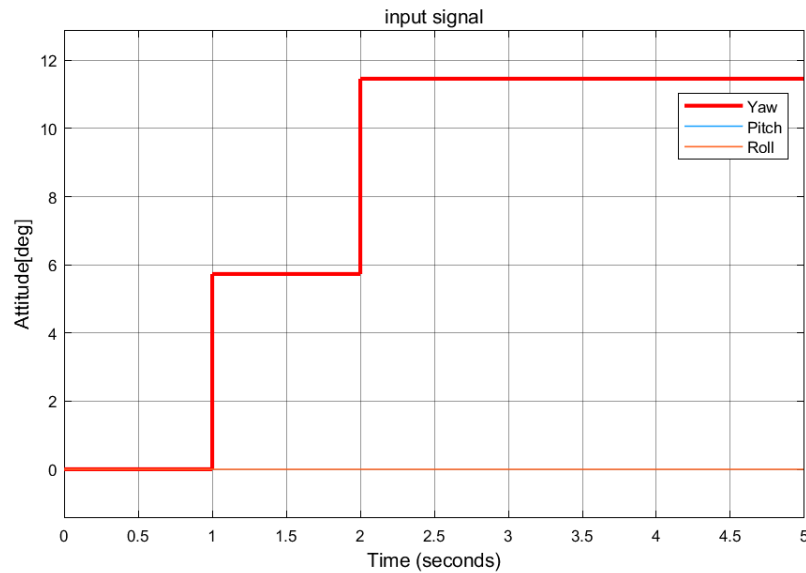
ההתאמה הטובה התקבלה עקב כך שביצענו תמרון בציר בודד, כלומר אין השפעה של תופעות אי ליניאריות הנובעות תמרון מצומד עבור צירים שונים.

בנוסף נשים לב כי קיבלנו התאמה למרות שהנחנו בפיתוח המודל המפושט שמהירות האוויר המגיעה לרוטורים הרבה יותר גדולה מאשר מהירות הטיסה של הרחפן – כלומר הנחנו מצב ריחוף. ניתן לראות כי בתנאי הטיסה הנוכחיים ההנחה הייתה קבילה.



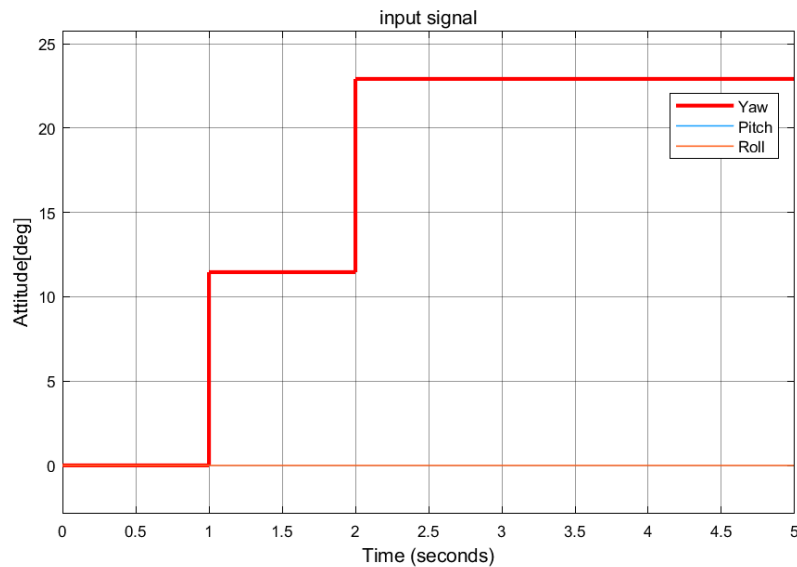
עבור פרמטר זה נבחן תרחישים הכוללים מומנטים בכיוון Z.

התרחיש הראשון הוא שני תמרונים הדרגתיים עבור זווית סבסוב YAW, כאשר במדרגה הראשונה אנו מסתובבים בזווית של 0.1 רדיאן (5.729 מעלות) ולאחר מכן מבצעים סיבוב נוסף באותה זווית.



איור 26 – תרחיש ראשון עבור b

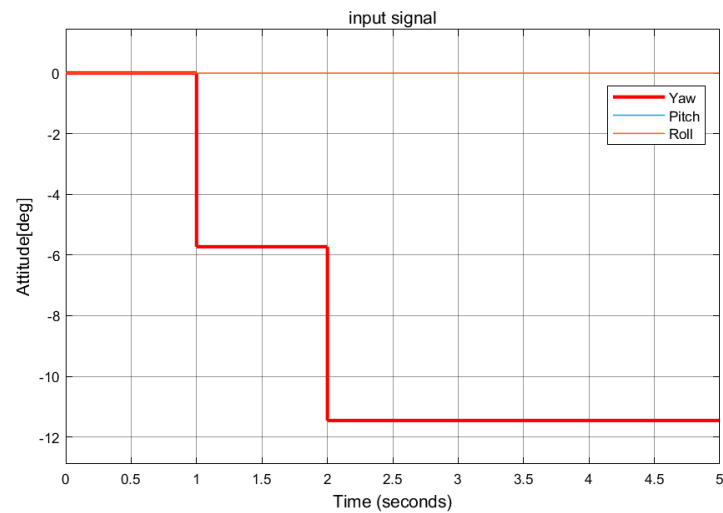
התרחיש השני דומה לתרחיש הראשון רק שהפעם אני מסתובבים בזווית של 0.2 רדיאן (11.459 מעלות) ולאחר מכן מבצעים סיבוב נוסף באותה זווית:



איור 27 תרחיש שני עבור b



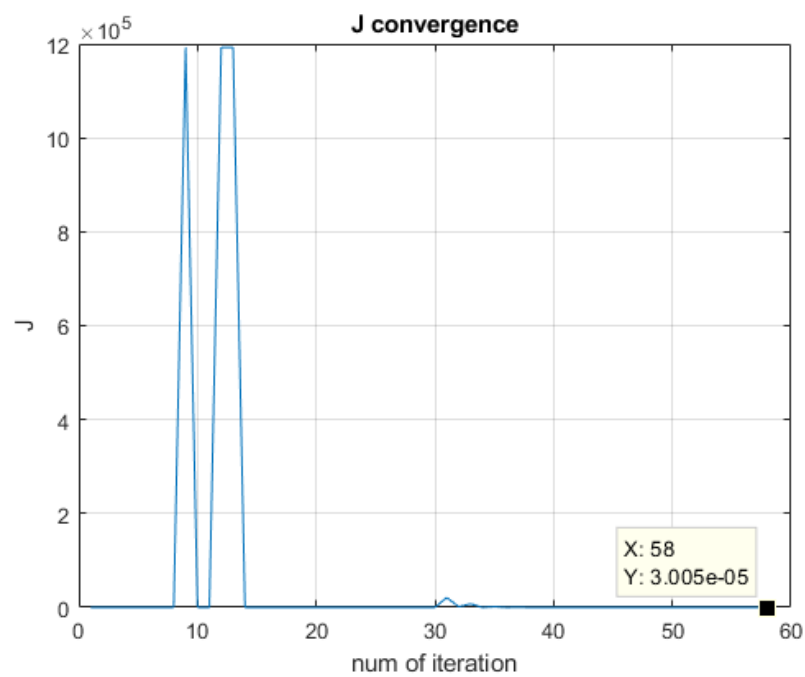
התרחיש השלישי דומה לתרחיש הראשון רק שהפעם כיוון הסיבוב הוא לצד הנגדי.



איור 28 - תרחיש שלישי עבור b

הפרמטר שהתקבל הוא: $b = 1.1406 \cdot 10^{-10}$

גרף ההתכנסות של פונקציית המחיר עבור הפרמטר b :

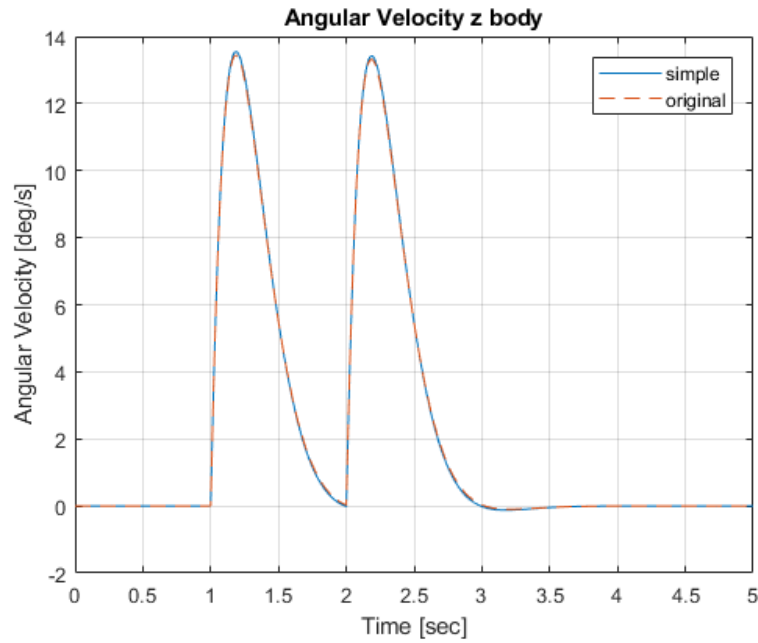


איור 29 – התכנסות פונקציית המחיר עבור הפרמטר b



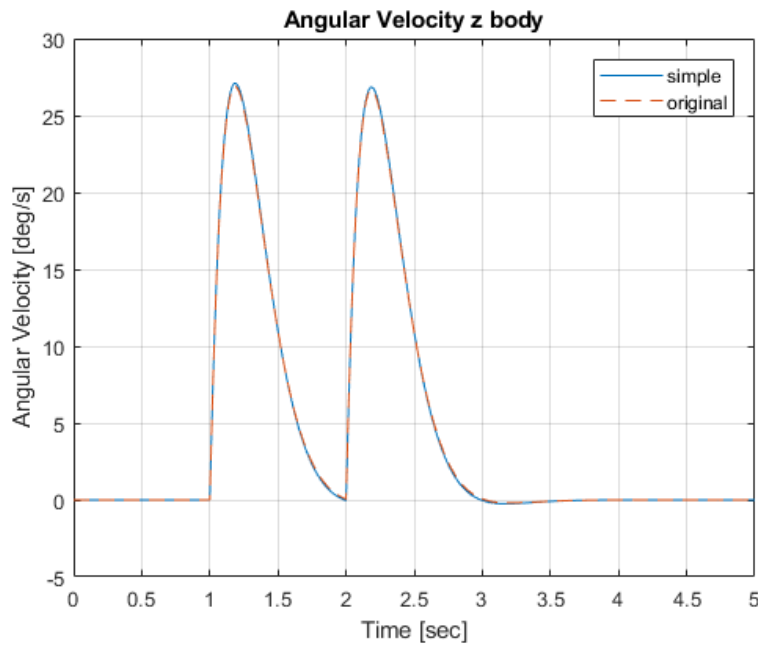
ההתאמה שהתקבלה עבור התמרונים הנ"ל:

עבור התרחיש הראשון:



איור 30 – מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש ראשון עבור b

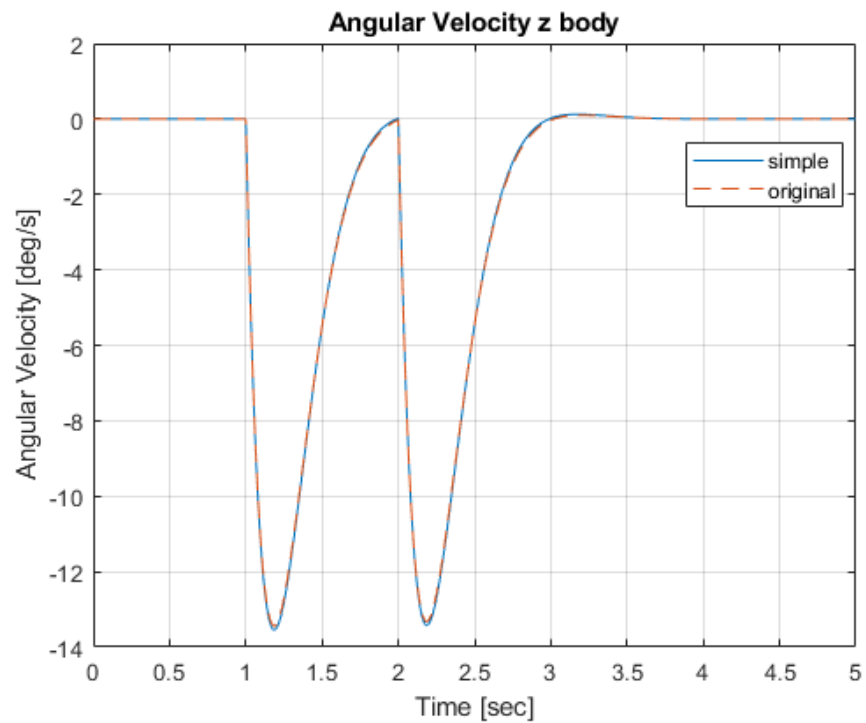
עבור התרחיש השני:



איור 31 - - מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש שני עבור b

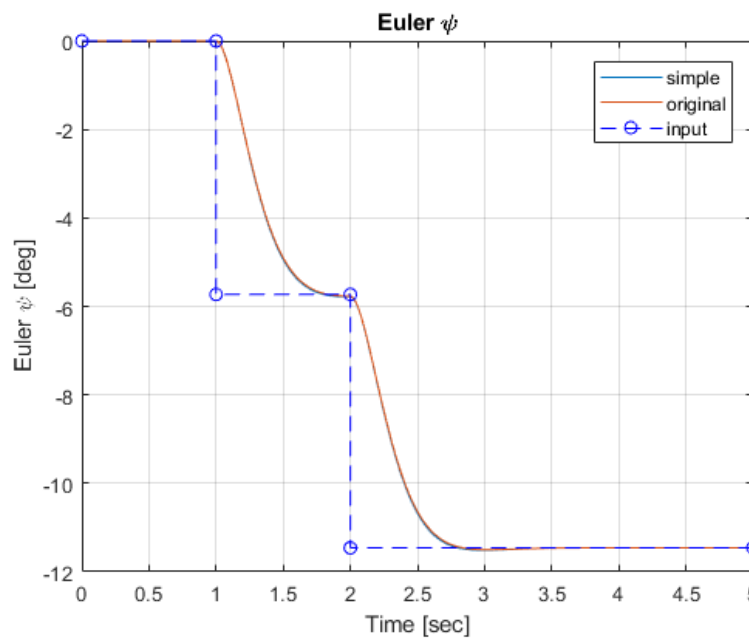


עבור התרחיש השלישי:



איור 32 - מהירות זוויתית מודל מלא ומפושט בתרחיש שלישי עבור b

גרף פקודת כניסה (זווית סבסוב ψ) אל מול הביצוע עבור תרחיש 3:

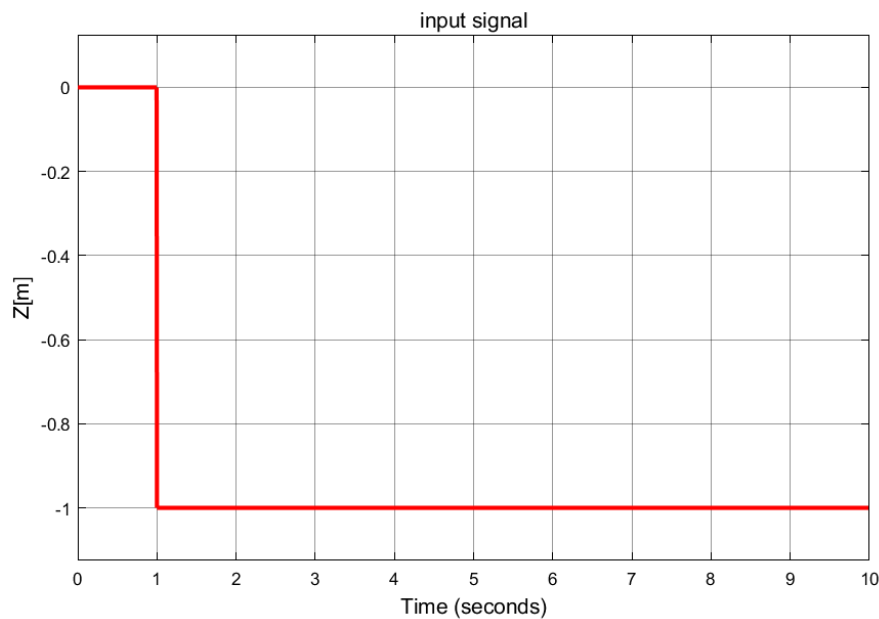


איור 33 - פקודת כניסה וביצוע בתרחיש השלישי עבור b

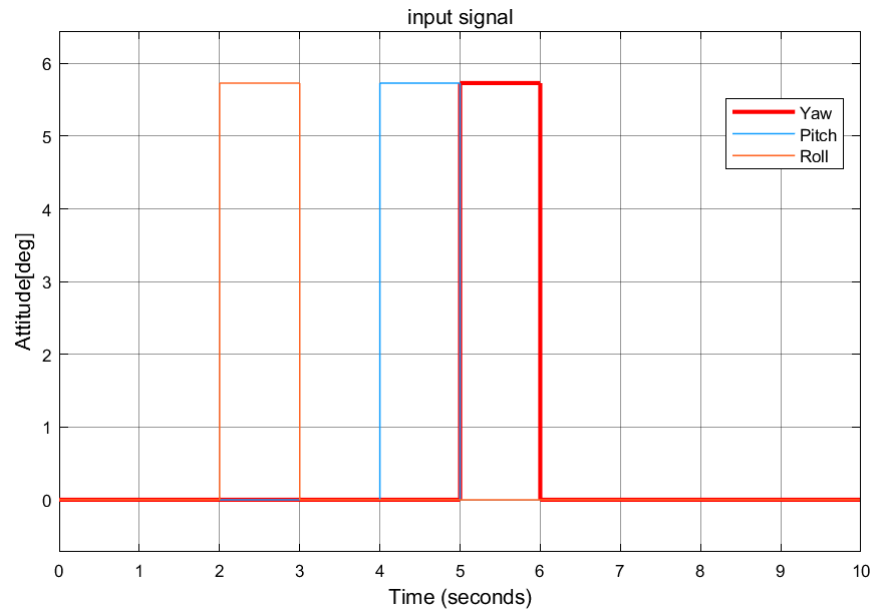


ניתן לראות כי גם עבור המהירויות הזוויתיות יש התאמה בין המודל המפושט למודל המלא עבור תמרון הכולל ציר אחד בלבד. בתמרון הנ"ל אין צימוד עבור שאר הצירים, ולפי המודל המפושט (משוואה (14)) הפרמטר הנלמד b הוא הפרמטר היחיד (עד כדי קירוב המודל) שמשפיע על התוצאות הנ"ל ולכן קיבלנו התאמה טובה בין המודלים.

לאחר מציאת הפרמטרים בוצע תרחיש ולידציה הכולל תמרונים בכל הצירים. התמרון כלל פקודת גובה לערך של 1 מטר ולאחר מכן פקודת זווית עבור ROLL, PITCH, YAW באופן הבא: בזמן $t=2\text{sec}$ פקודת ROLL לזווית של 0.1 רדיאן (5.729 מעלות) ולאחר שניה אחת פקודת חזרה לזווית ROLL של 0 מעלות. בזמן $t=4\text{ sec}$ מבצעים אותן תמרון עבור PITCH ומיד לאחר מכן עבור YAW.



איור 34 – פקודת גובה תרחיש ולידציה



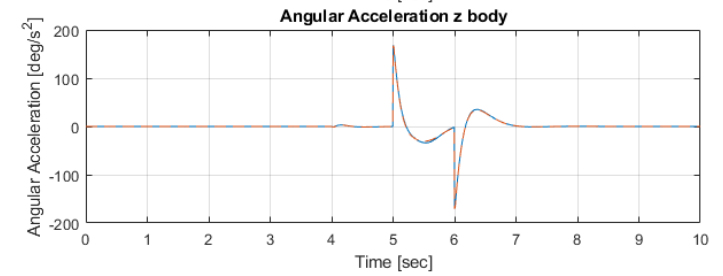
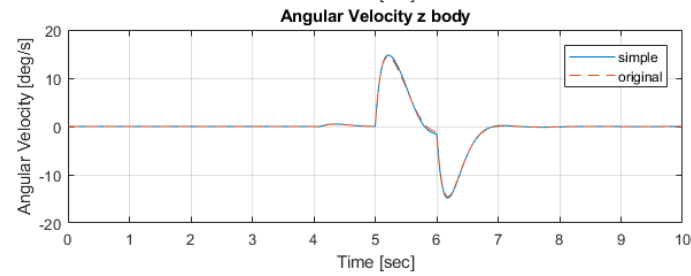
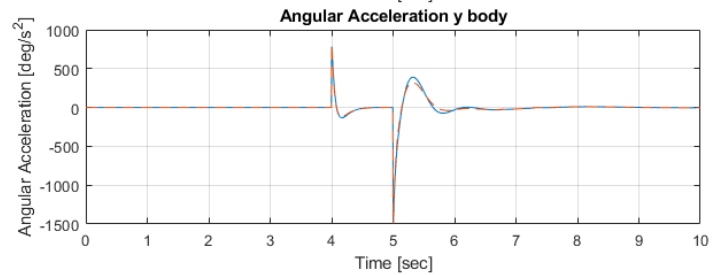
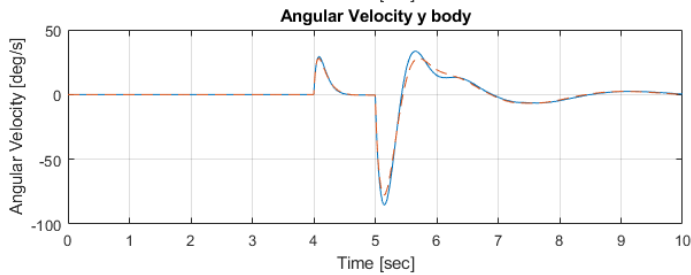
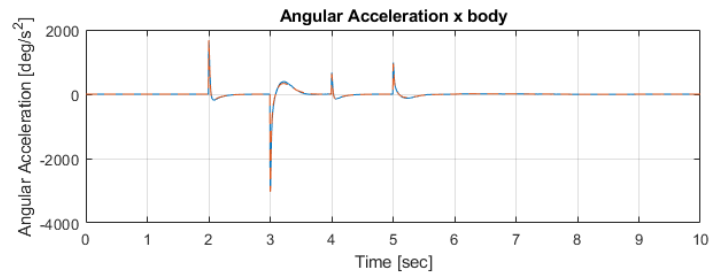
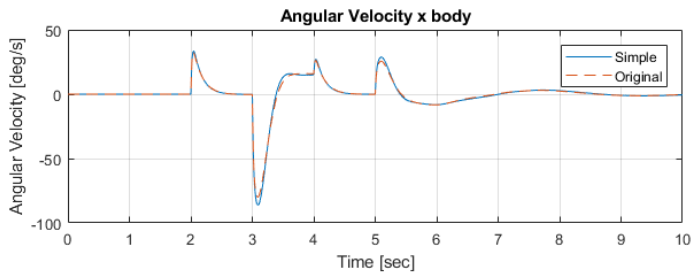
איור 35 – פקודות זוויתיות תרחיש ואלידציה

-----המשך בעמוד הבא-----



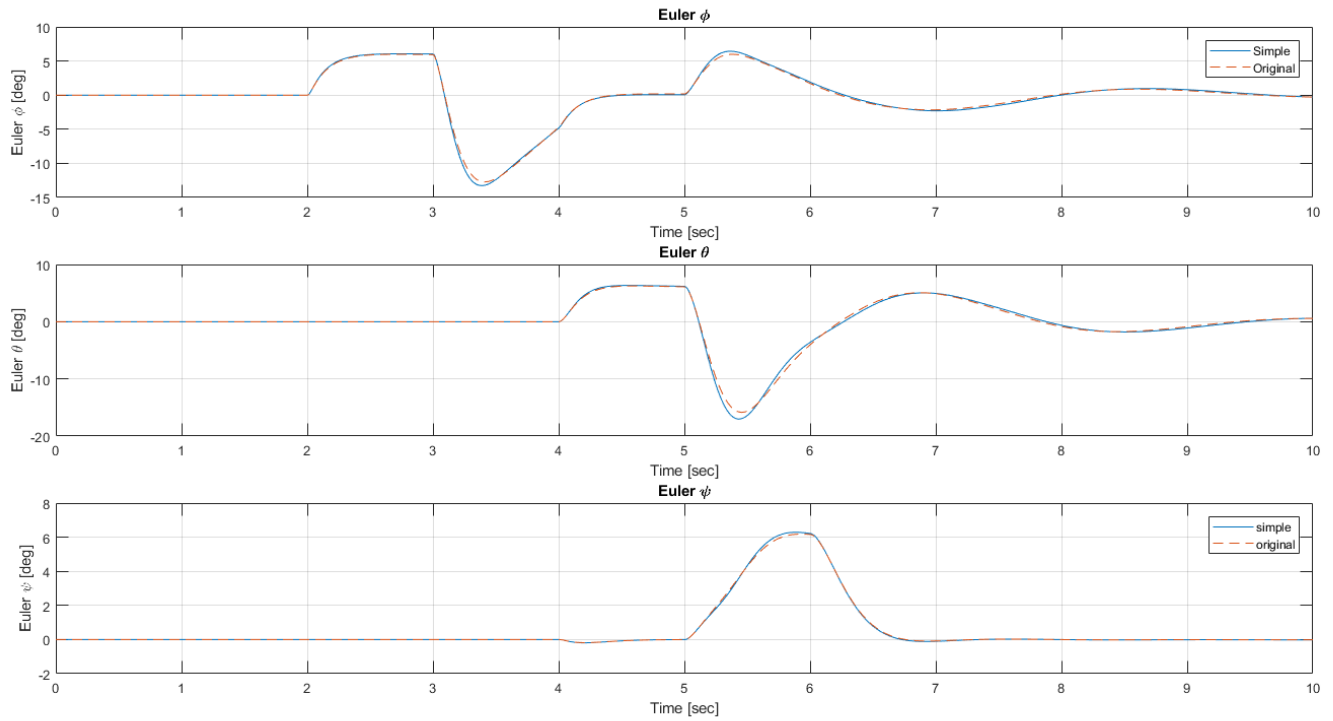
תוצאות תרחיש הולידציה

גרפים תנועה זוויתית -



איור 36- תוצאות תרחיש הולידציה עבור תנועה זוויתית

-----המשך בעמוד הבא-----



איור 37 – תוצאות תרחיש ואלידציה עבור זווית אוילר

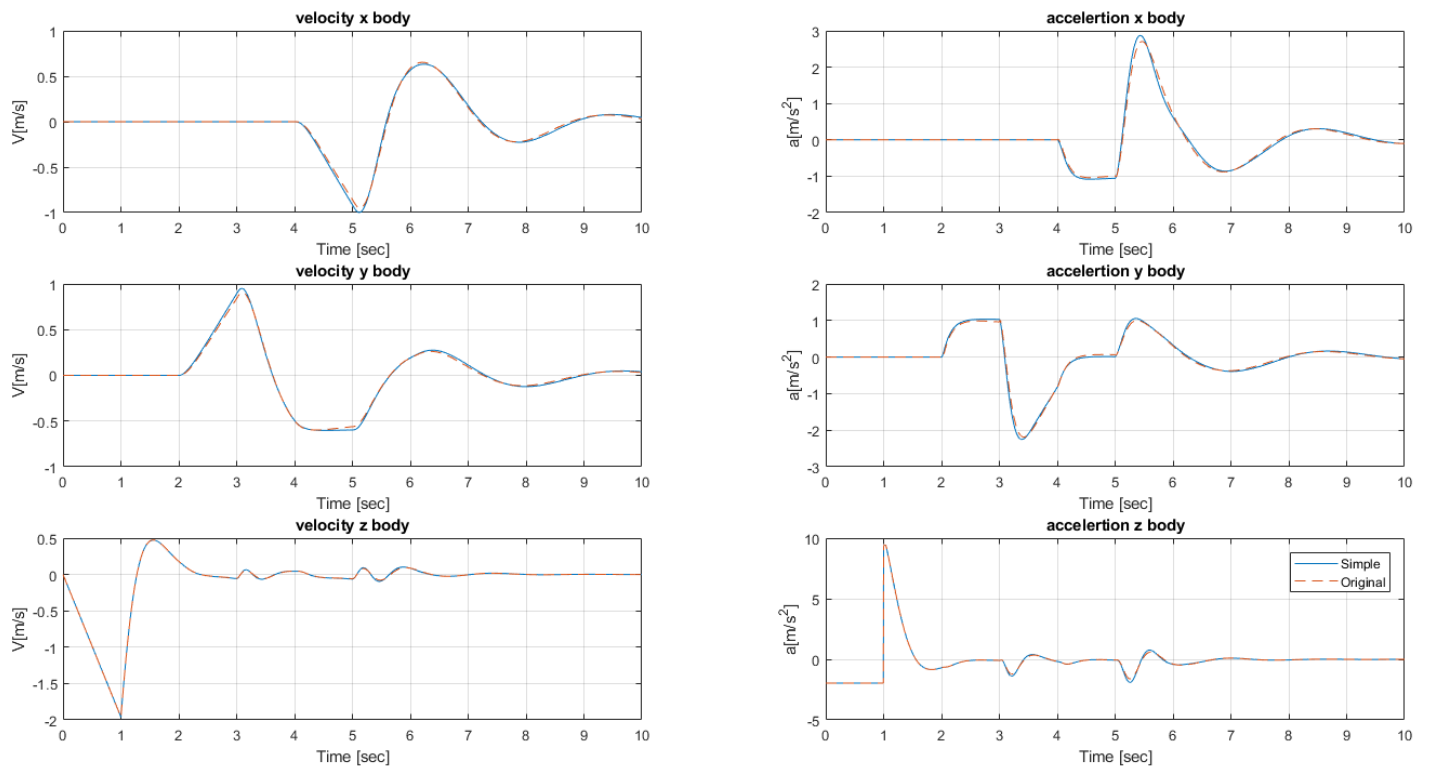
-----המשך בעמוד הבא-----



ניתן לראות כי באופן כללי התקבלה התאמה טובה. עבור המהירויות הזוויתיות רואים כי המודל המפושט הניב מהירות זוויתית מעט גבוהה יותר (בערך מוחלט) מאשר המודל המלא. הסבר אפשרי לכך הוא שבמודל המפושט הזנחנו את החיכוך שמתקבל כתוצאה מתנועה סיבובית של הרחפן.

זוויות אוילר הינן אינטגרציה של המהירויות הזוויתיות ולכן מקבלים כאן הפרש קטן בערכים המתקבלים עבור המודלים.

גרפים תנועה קווית-



איור 38 – תוצאות תרחיש ואלידציה עבור תנועה קווית

גם כאן התקבלה באופן כללי התאמה טובה. ניתן לראות כי עבור המודל המפושט התקבלו ערכי תאוצה מעט גבוהים יותר מאשר המודל המלא (כנראה מאותן סיבות של חיכוך).



למידת הפרמטרים במקביל

בשלב הזה בוצע דיוק נוסף לפרמטרים על ידי למידה נוספת כאשר תנאי ההתחלה הם הפרמטרים שהתקבלו קודם:

$$K = 4.72 \cdot 10^{-8}$$

$$b = 1.1406 \cdot 10^{-10}$$

התרחיש עליו בוצעה הלמידה הוא תרחיש הולידציה כאשר קטע הזמן שנבדק $t > 0.7$. בנוסף, פונקציית המחיר הוגדרה כסכום השגיאות עבור המהירות הזוויתית והתאוצה הקווית עבור ציר Z. על מנת להימנע מהשפעת החלק הניטרלי בתמרון (כלומר איזור ללא תמרון- עלול להשפיע על תוצאות למידת הפרמטרים) בפונקציית המחיר של המהירות הזוויתית נכניס משקל לערכים המתקבלים בזמנים $t > 5$.

נזכיר כאן כי פונקציית המחיר היא הפרש ערכי המדידה בין ערך הרפרנס (המודל המלא) לבין הערך הנמדד (המודל המפושט):

$$(20) \quad j_{total} = j_{angular\ velocity} + j_{linear\ acceleration}$$

$$(21) \quad j_{angular\ velocity} = \sum_{l=1}^n (\omega_{z,l} - \omega_{z,l\ ref})^2$$

$$(22) \quad j_{linear\ acceleration} = P \sum_{l=1}^n (a_{z,l} - a_{z,l\ ref})^2$$

$$(23) \quad P = \begin{cases} 1, & t \leq 5 \\ 3, & t > 5 \end{cases}$$

לאחר שלבי הלמידה המפורקת קיבלנו את התוצאות עבור התאוצה הקווית (איור 11) ועבור המהירות הזוויתית (איור 10).

$$J_{tot} = 5.4072 \text{ ערך פונקציית המחיר שהתקבל:}$$

לאחר ביצוע הלמידה של הפרמטרים במקביל התקבלו התוצאות הבאות:

$$J_{tot} = 5.3815$$

$$K = 4.7192 \cdot 10^{-8}$$

$$b = 1.1706 \cdot 10^{-10}$$

התקבל הבדל של 0.48%. עבור התמרון הנוכחי ההבדל הינו זניח וניתן להסתפק בלמידה מפורקת של הפרמטרים.

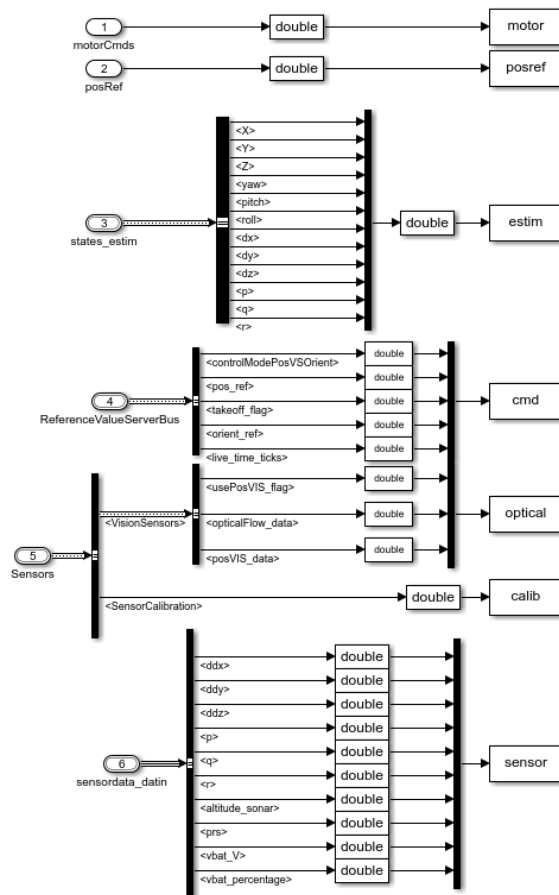


מציאת פרמטרים מרחפן אמיתי נתוני הרחפן

הרחפן עליו נבצע את הלמידה הוא רחפן של חברת Parrot מסוג mini-drone. הרחפן מצויד ב-3 מדידי קצב ו-3 מדידי תאוצה למדידת מהירויות זוויתיות ותאוצות קוויות.

את ניסויי ההטסה של הרחפן נבצע באמצעות Simulink כאשר התקשורת תעשה על ידי קישוריות bluetooth.

באיור הבא ניתן לראות את המידע שהרחפן מקליט בזמן התמרון:



לפרויקט זה נשתמש בתאוצות והמהירויות הקוויות וכן במהירויות הזוויתיות ובזוויות אילר.

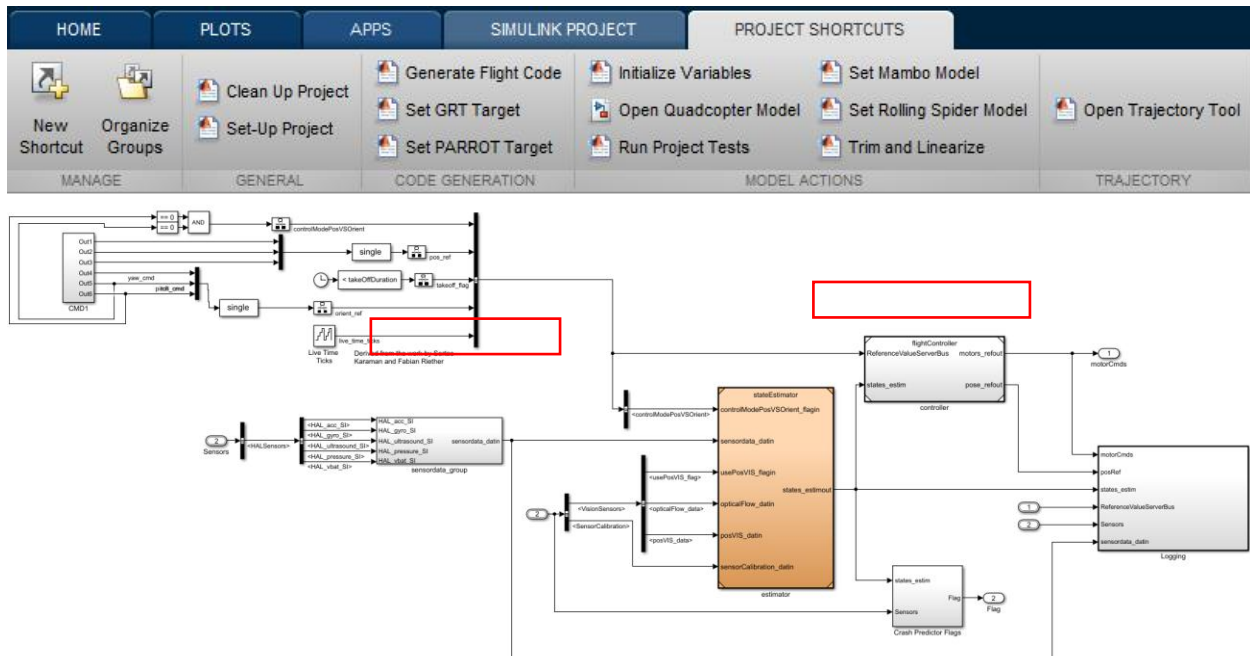


תהליך הטסה

נתאר כעת את אופן חיבור הרחפן ל simulink וצריבת תכנית הטיסה. בשלב הראשון, יש לחבר את הרחפן הרצוי לבלוטות' של המחשב.

בשלב השני, יש להכין את הסימולינק לצריבה: נכניס ל simulink את הבלוקים אותם אנו רוצים לצרוב לרחפן. כלומר ניתן לצרוב גם את בלוק בקרת הטיסה וגם את פקודות הכניסה. בעצם פעולה זו אנו מבטיחים כי בקרת הטיסה של הסימולציה ושל הרחפן הינה זהה. כלומר הנחת העבודה שלנו עבור בקרת טיסה זהה אכן מתקיימת. לאחר מכאן יש להגיד את הרחפן בסימולינק בעזרת הכפתורים והשורות הבאות:

```
>> set_param('flightControlSystem', 'MatFileLogging', 'on')
```

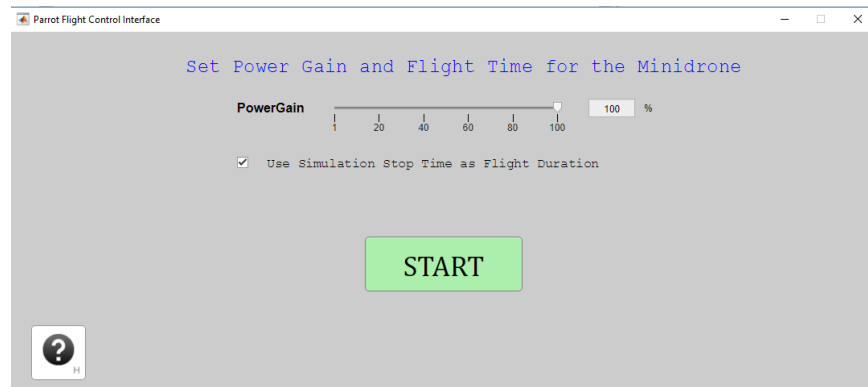


בנוסף יש להגדיר את זמן ההרצה הרצוי בעזרת פקודת *TFinal*. לבסוף יש ללחוץ על כפתור הבניה בתוך הבלוק אותו נרצה לצרוב על הרחפן:

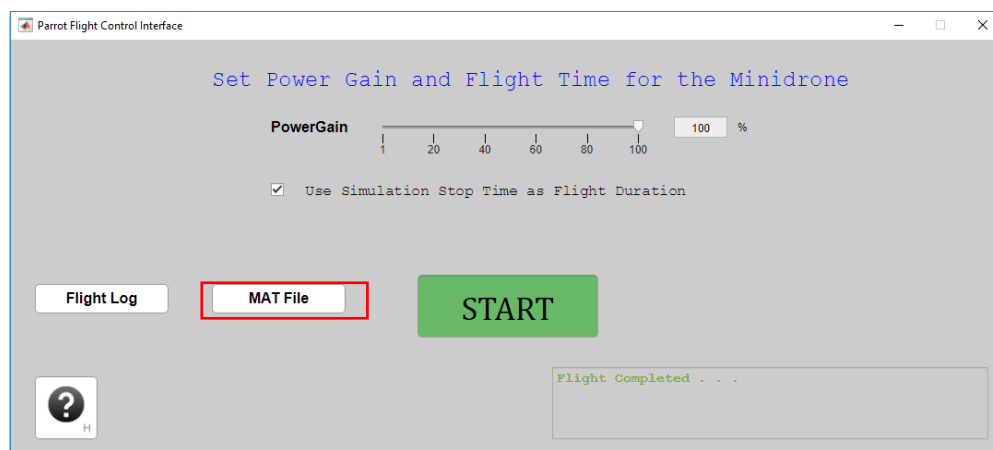




אם הצריבה עברה בהצלחה יפתח החלון הבא:



כדי להשוות את הרחפן לסימולציה המקורבת יש לדאוג כי הרחפן עובד ב-100% עוצמה.
לאחר שהרחפן סיים את התמרון, ניתן לקבל את כל המידע שהוא הקליט בזה התמרון בעזרת לחיצה על MAT
:FILE



קובץ mat יעבור אוטומטית לחלון המתלב. (יש לשים לב שמשנים את שם הקובץ כדי לא לדרוס אותו בריצה הבא)

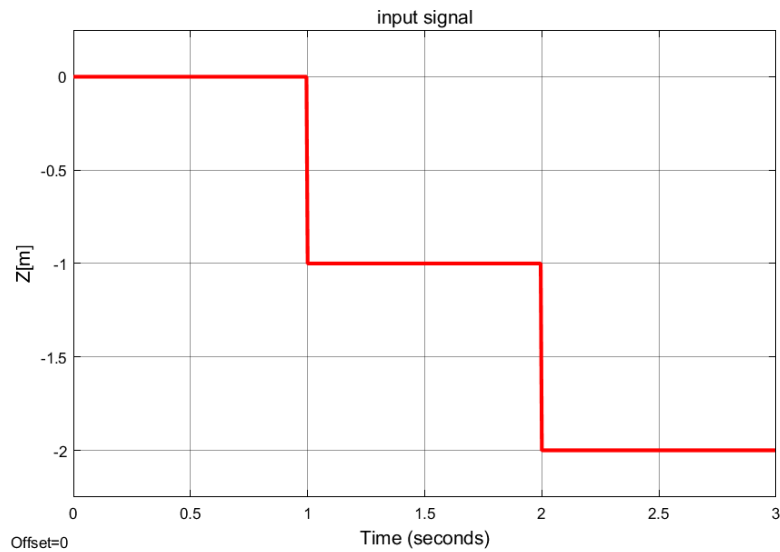


ניסויי טיסה של רחפן mini-drone

בשלב הזה בוצע אותו תהליך של מציאת פרמטרים אך כעת עבור הטסה בפועל של הרחפן.

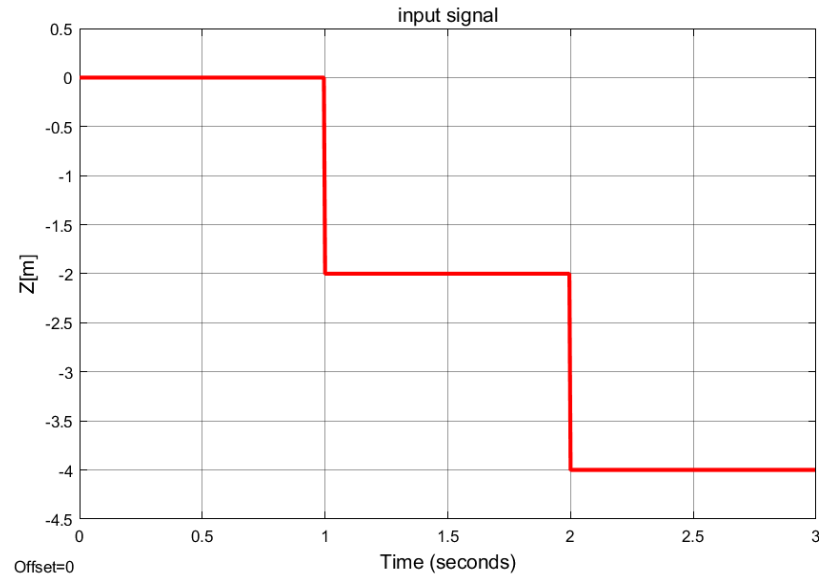
מציאת הפרמטר K

התרחיש הראשון הוא עליה הדרגתית לגובה של 2 מטרים. זמן טיסה כולל של 3 שניות.



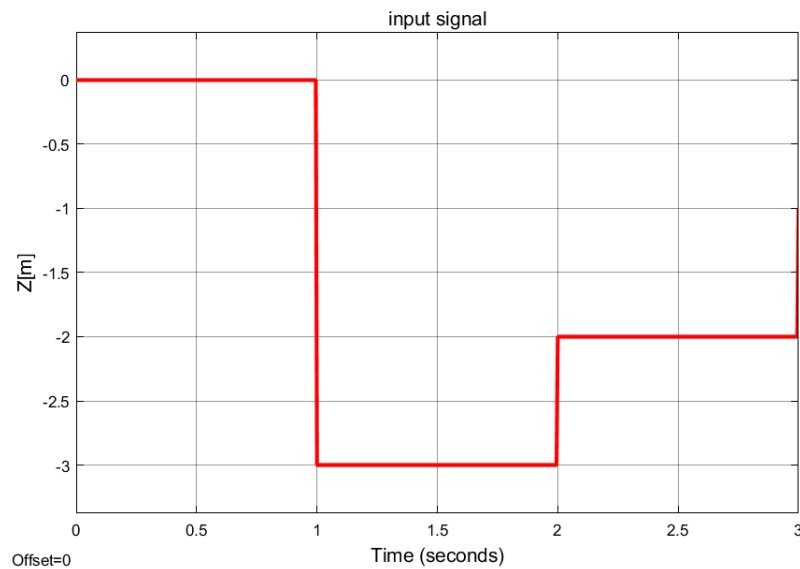
איור 39 – תרחיש ראשון עבור k , למידה מרחפן אמיתי

התרחיש השני דומה לתרחיש הראשון רק שהפעם העלייה ההדרגתית לגובה היא עד 4 מטרים.



איור 40 – תרחיש שני עבור k , למידה מרחפן אמיתי

התרחיש השלישי כולל עליה לגובה של 3 מטרים בזמן $t=1$ sec, לאחר מכן ירידה לגובה 2 מטרים בזמן $t=2$ sec ובזמן $t=3$ ירידה לגובה 1 מטר.



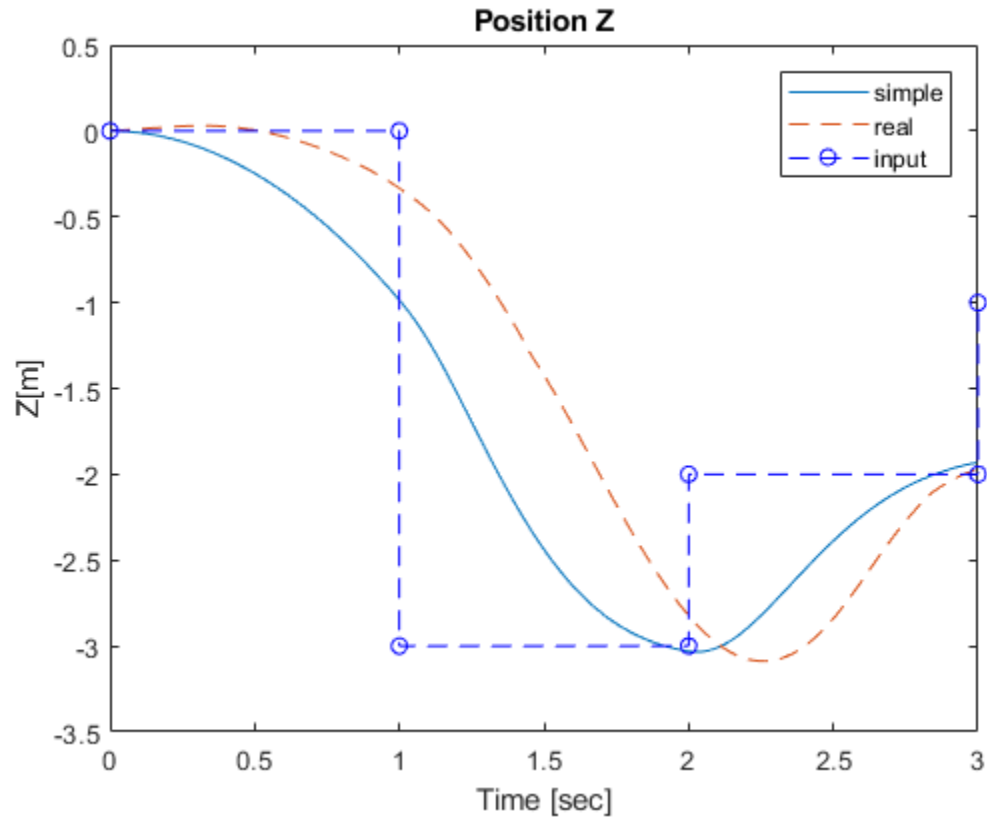
איור 41, תרחיש שלישי עבור k , למידה מרחפן אמיתי

הפרמטר שהתקבל מניסוי הטיסה הוא: $K = 4.4162 \cdot 10^{-8}$

התקבל ערך הקרוב לערך שהתקבל עבור למידת הפרמטר מהסימולציה המלאה - $K = 4.72 \cdot 10^{-8}$.



פקודת כניסה ופקודת הביצוע שהתקבלו עבור התרחיש השלישי:



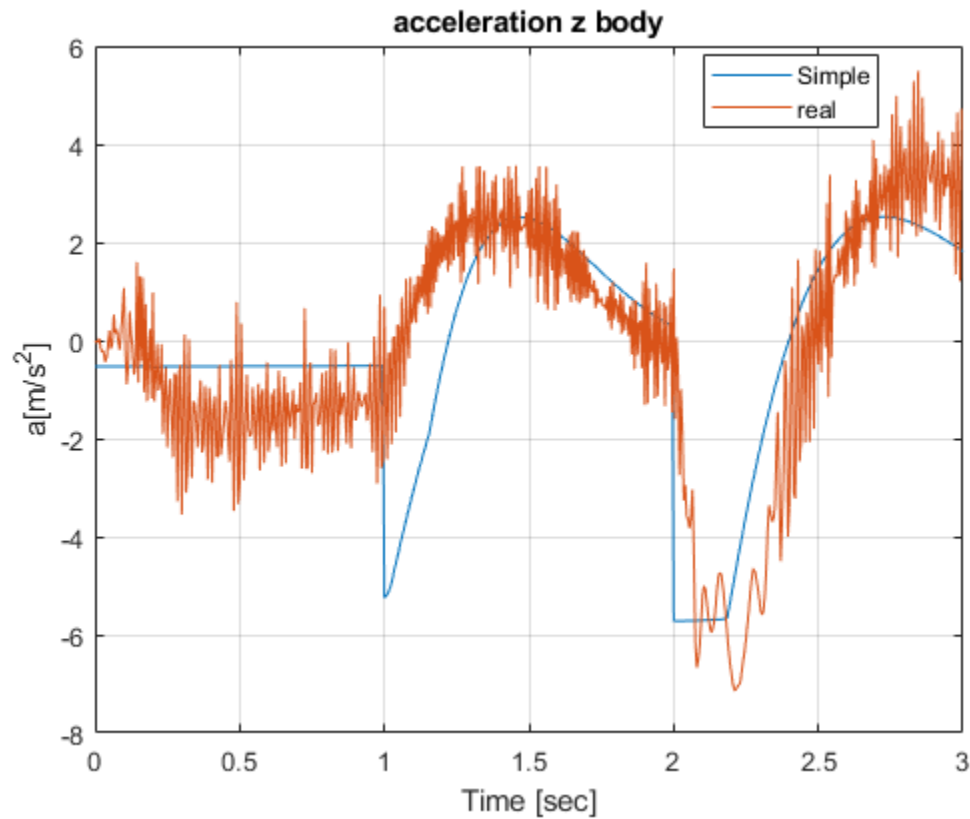
איור 42 – פקודת כניסה וביצוע עבור תרחיש שלישי, למידת k , רחפן אמיתי

ניתן לראות כי המודל המפושט מהיר יותר לעומת הרחפן האמיתי. מכיוון שפקודת הכניסה הייתה מדרגה, ייתכן כי לרחפן קיים מגננון השהיה הגורם לפקודת הכניסה להיות עדינה יותר, ולכן אנו רואים כי התגובה שלו איטית יותר.



נראה את ההתאמה שהתקבלה עבור הפרמטר הנ"ל.

עבור התרחיש הראשון:

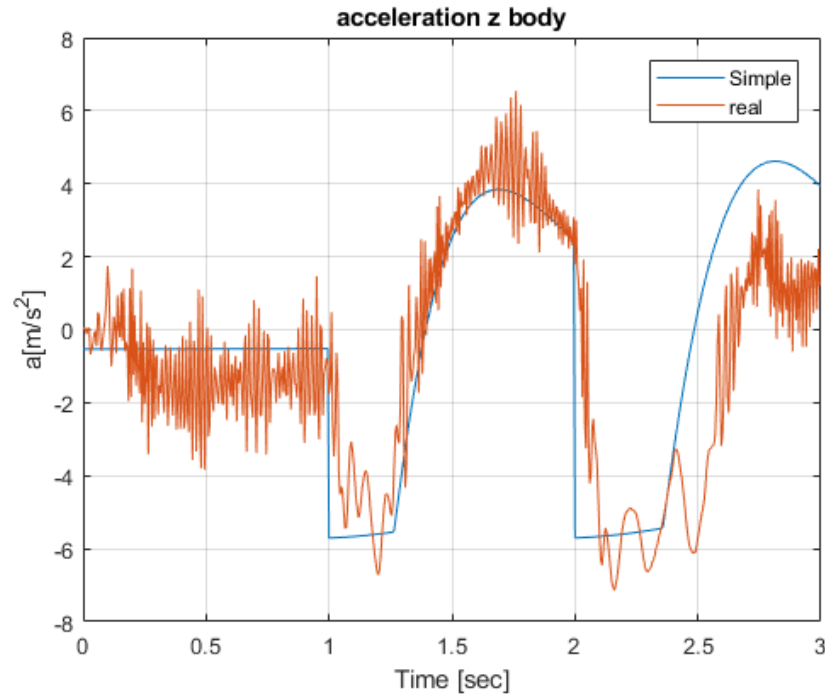


איור 43- התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש ראשון

ניתן לראות כי קיים רעש ברחפן. בנוסף נשים לב כי בזמן $t=1$ יש עליה בתאוצה (בערך מוחלט), הדבר כנראה נובע ממנגנון ההמראה האוטומטי של הרחפן- הסימולציה מתחילה עם תאוצה התחלתית שלא בהכרח זהה לזה שמוגדר ברחפן. עקב כך ייתכן כי הבקר אשר מנסה לסגור את החוג בסימולציה מקבל ערך שונה של מיקום בציר Z בזמן $t=1$ לעומת הבקר של הרחפן האמיתי.



עבור התרחיש השני:



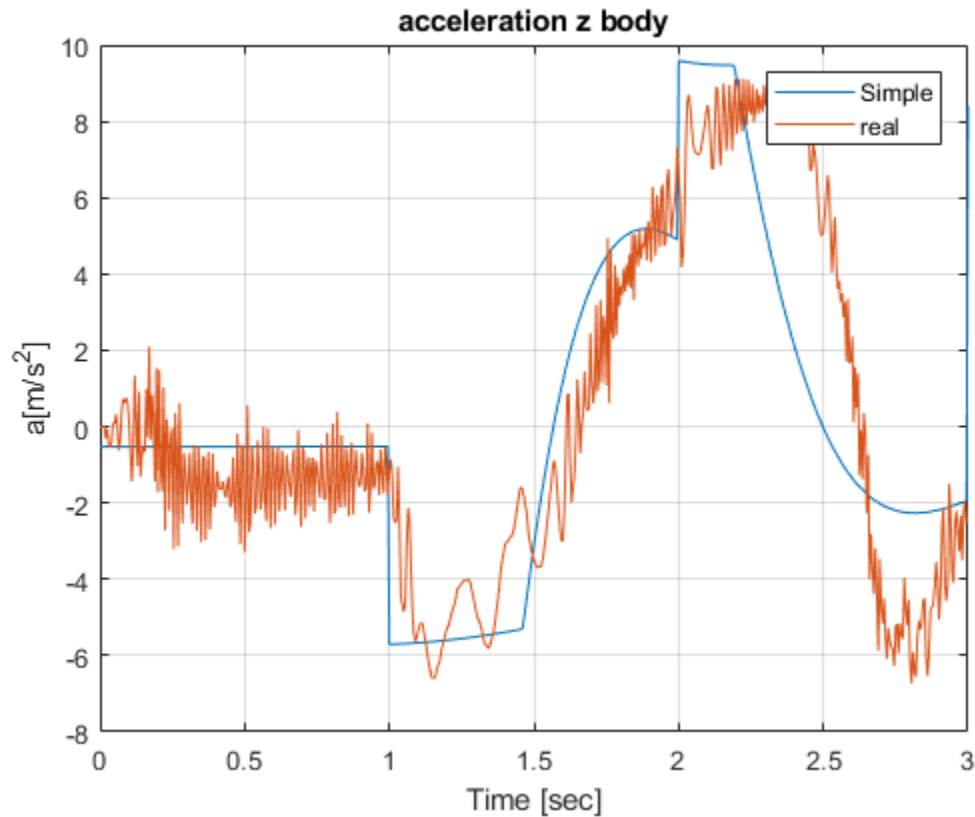
איור 44 - התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש שני

ניתן לראות כי עבור 2 השניות הראשונות מתקבלת התאמה יחסית טובה. לקראת סוף התמרון הרחפן מגיע לערכי תאוצה קטנים יותר מאשר הסימולציה.

-----המשך בעמוד הבא-----



עבור התרחיש השלישי:



איור 45 - התאמת תאוצה קווית של רחפן אמיתי והמודל המפושט, תרחיש שלישי

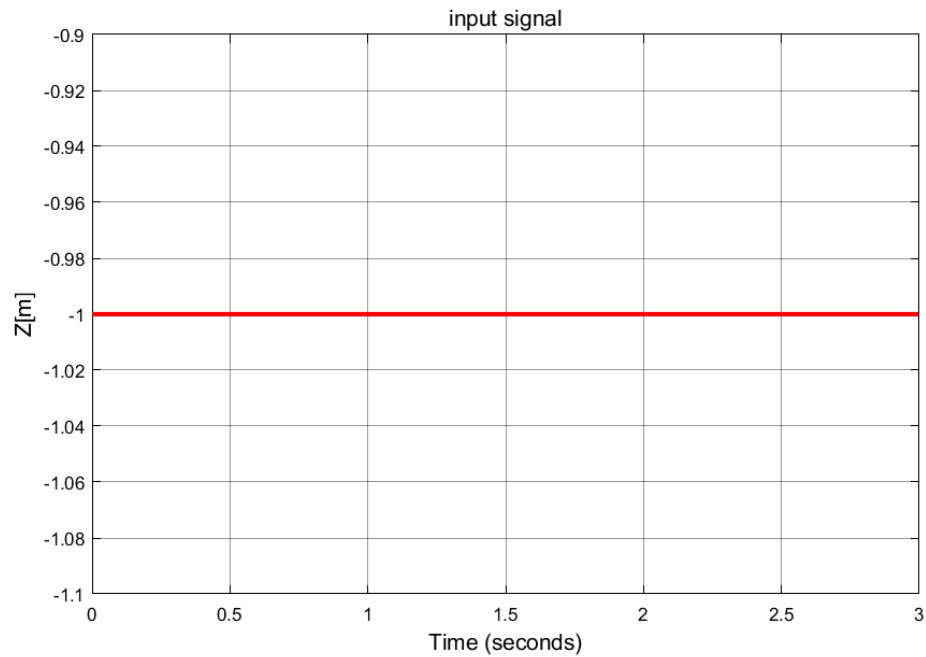
ניתן לראות כי גם כאן התקבלה התאמה טובה יחסית עבור 2 השניות הראשונות. לאחר מכן הסימולציה מגיבה מהר יותר לפקודות מאשר הרחפן, ובנוסף תאוצת הרחפן גדולה יותר בערכה המוחלט לקראת סוף התמרון.

-----המשך בעמוד הבא-----



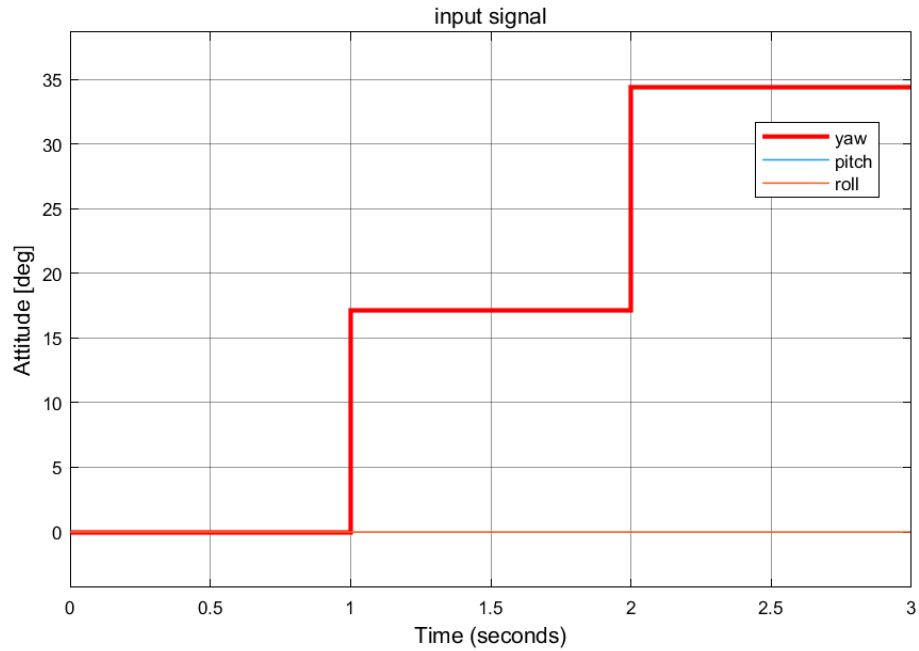
מציאת הפרמטר b

התרחיש הראשון כולל ריחוף בגובה מטר ולאחר מכן תמרון בYAW: סיבוב הדרגתי ב0.3 רדיאן (17.18 מעלות) בכל פעם.



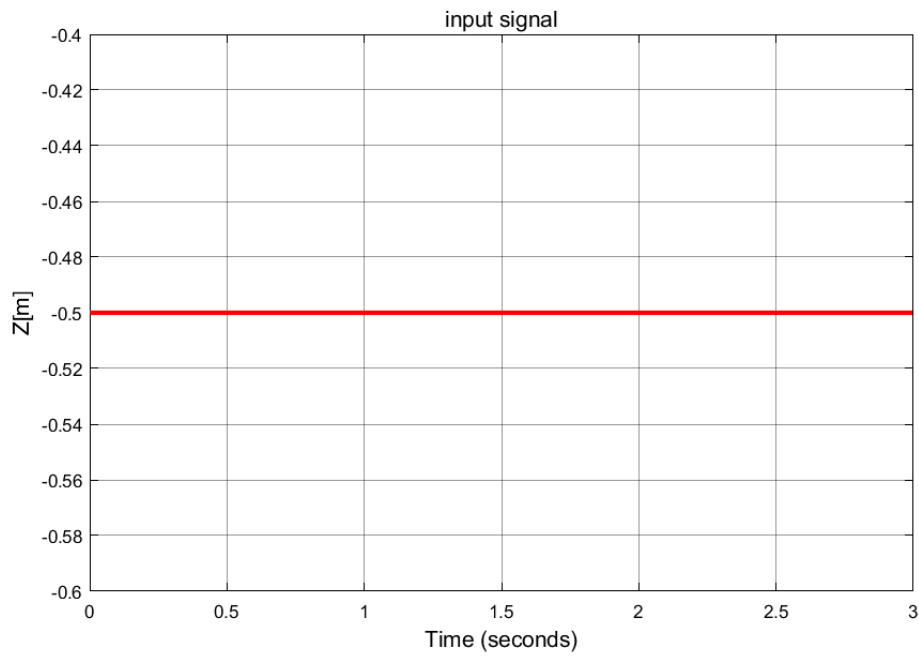
איור 46 – תרחיש ראשון, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b

-----המשך בעמוד הבא-----

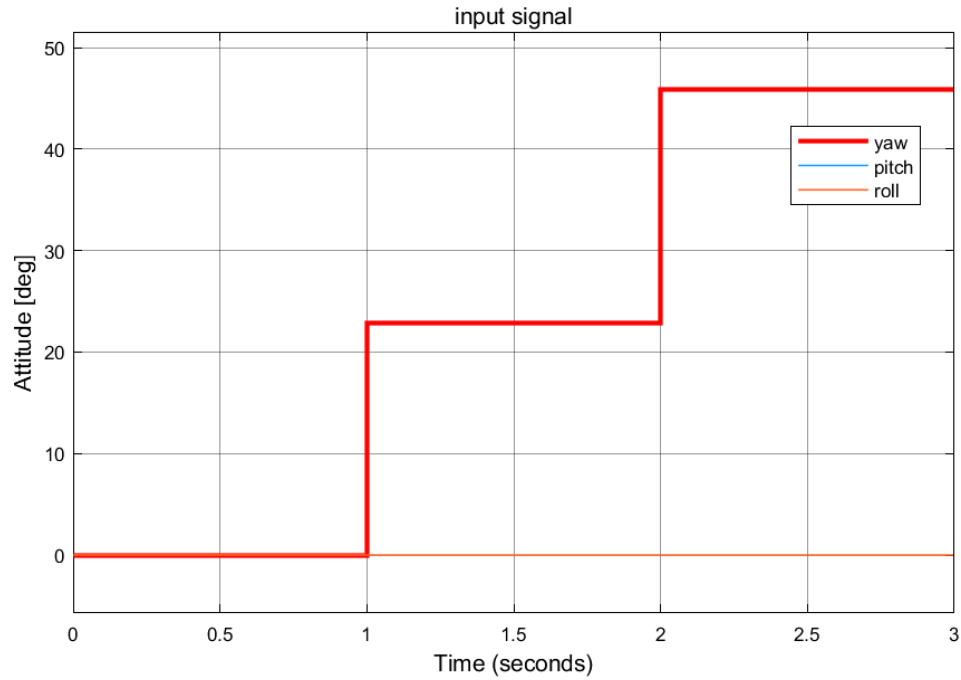


איור 47 - תרחיש ראשון, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b

התרחיש השני דומה לתרחיש הראשון רק שהפעם זווית הסבסוב בכל פעם היא 0.4 רדיאן (22.9 מעלות):

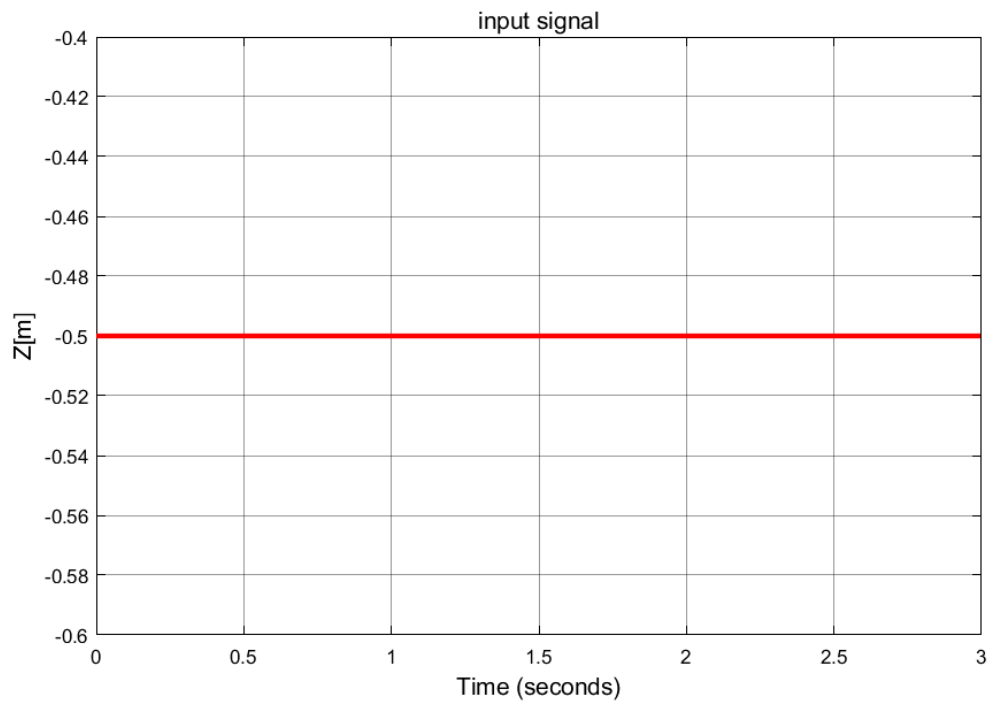


איור 48 - תרחיש שני, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b

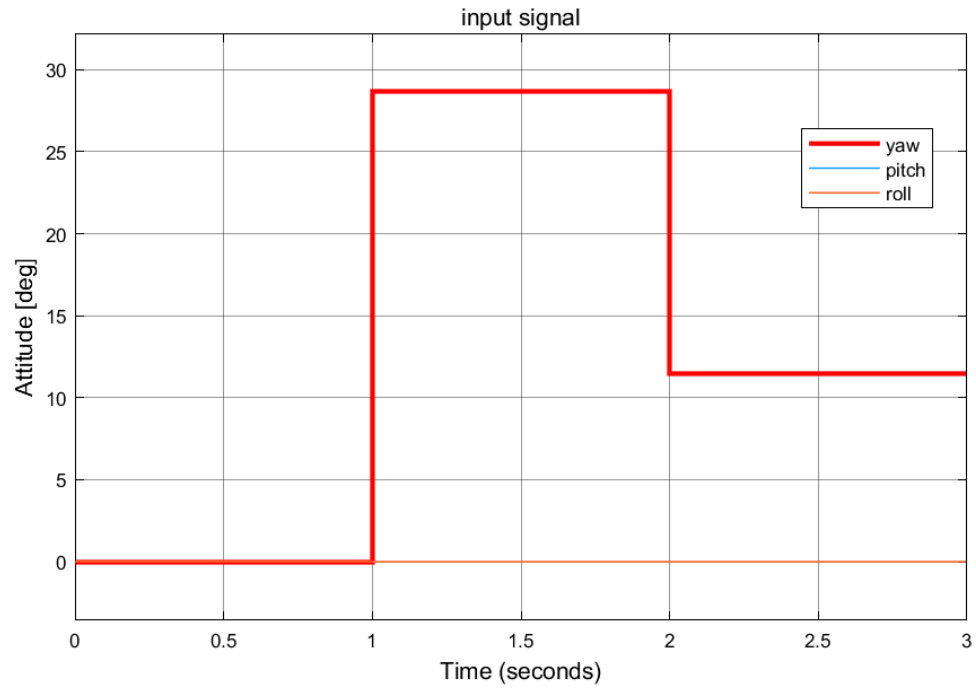


איור 49 - - תרחיש שני, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b

התרחיש השלישי כולל סבסוב חיובי של 0.5 רדיאן (28.64 מעלות) ולאחר מכן סבסוב לזווית 0.2 רדיאן (11.49 מעלות):



איור 50 -- תרחיש שלישי, למידה מרחפן אמיתי, פקודת גובה, מציאת b



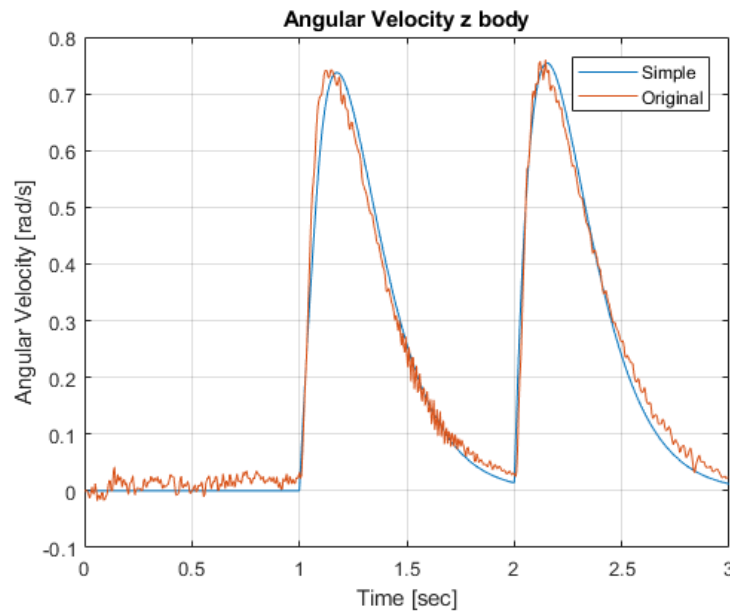
איור 51 - תרחיש שלישי, למידה מרחפן אמיתי, פקודת זווית, מציאת b

הפרמטר שהתקבל: $b = 1.4852 \cdot 10^{-10}$

-----המשך בעמוד הבא-----

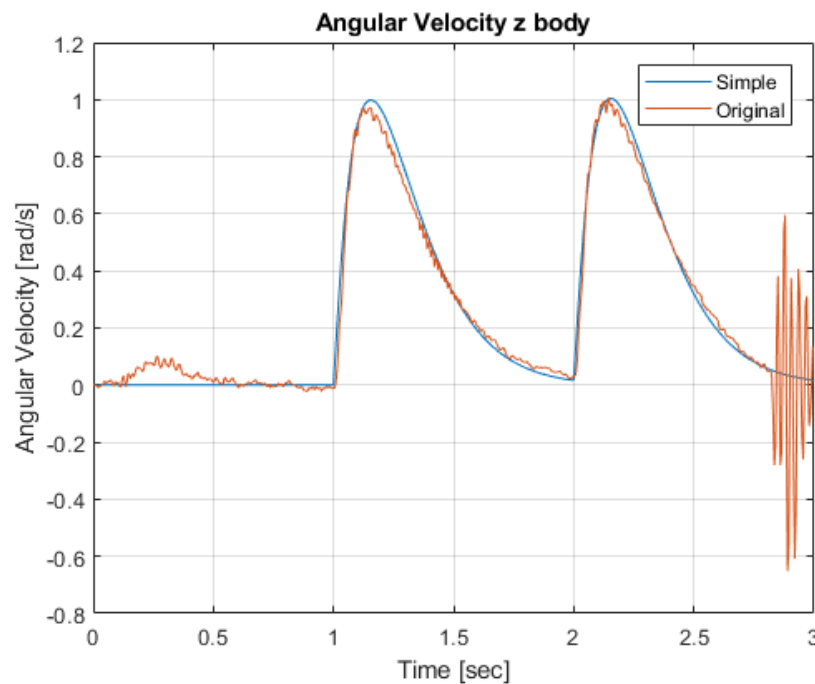


ההתאמה שהתקבלה עבור הפרמטר הנ"ל:



איור 52 – התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש ראשון

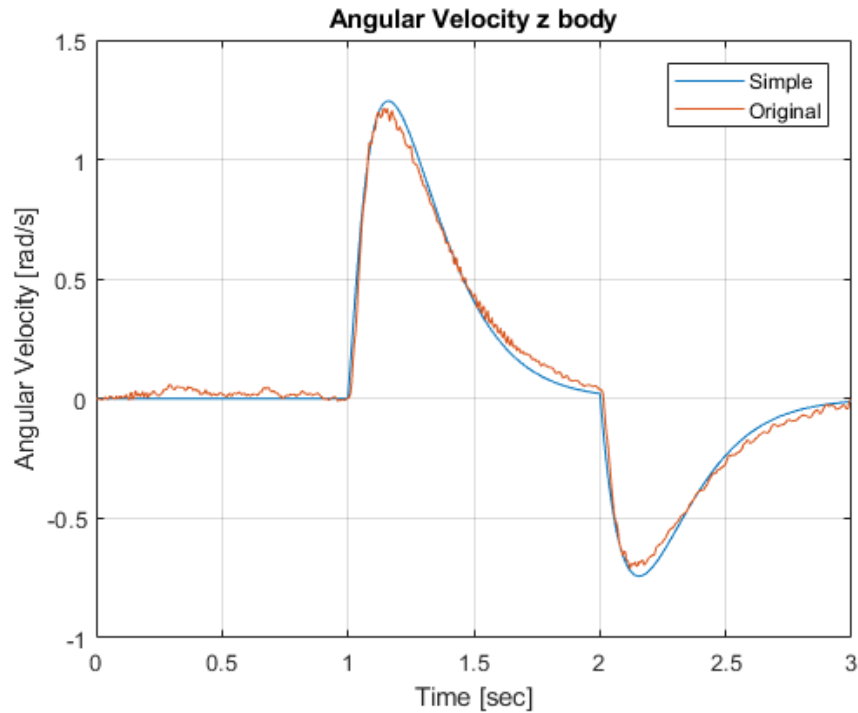
ניתן לראות כי התקבלה התאמה טובה עבור ניסוי הטיסה והמודל המפושט. בנוסף רואים כי המדידה של הרחפן חלקה יותר מאשר המדידה עבור התאוצות.



איור 53 - - התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש שני



התקבלה כאן תנועה לא רצויה לקראת סוף התמרון של הרחפן (ניתן היה לראות זאת במהלך הניסוי).



איור 54 - התאמת מהירות זוויתית עבור המודל המפושט והרחפן האמיתי, תרחיש שלישי

תוצאות תרחישי ואלידציה

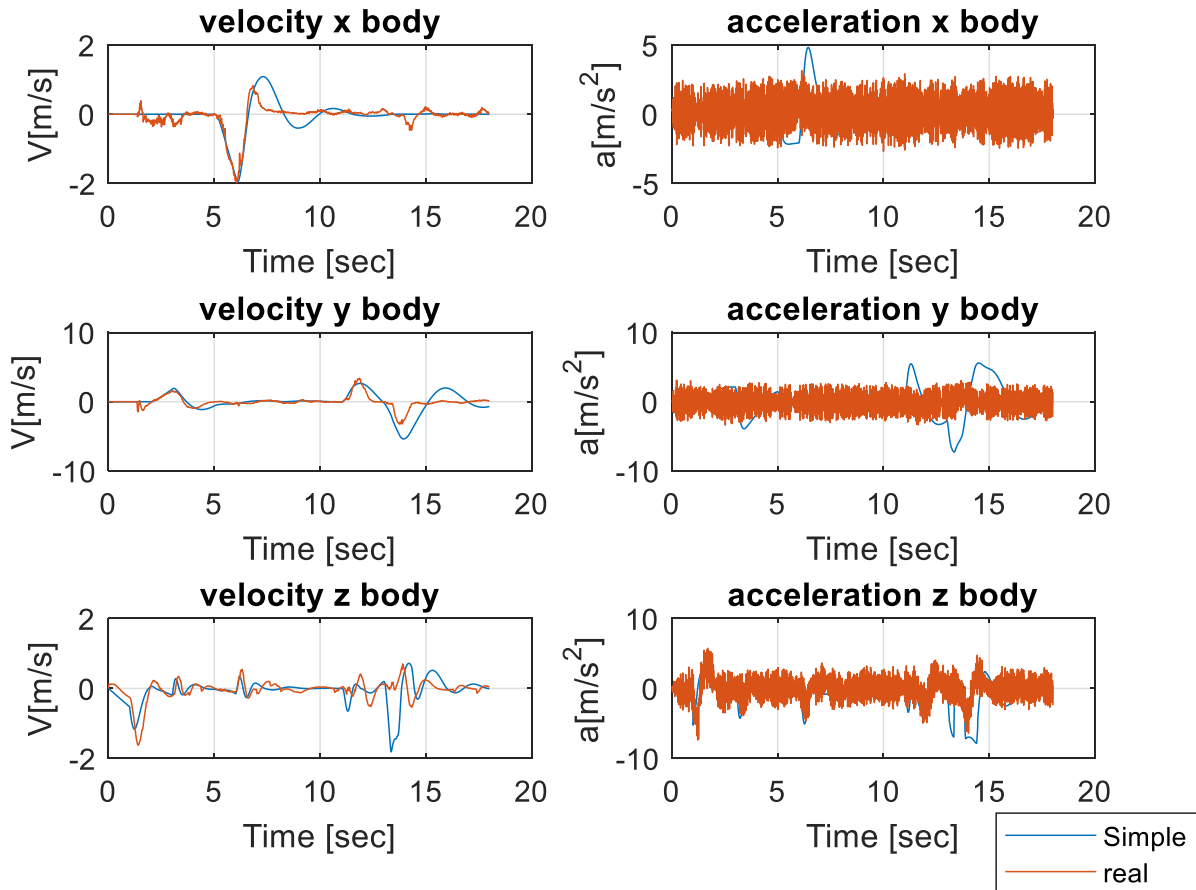
בחלק זה הורצו מספר תרחישים כדי לבדוק את נכונות המודל בתמרונים שונים.

להלן שתי דוגמאות לתרחישים אלו:

תרחיש ראשון:

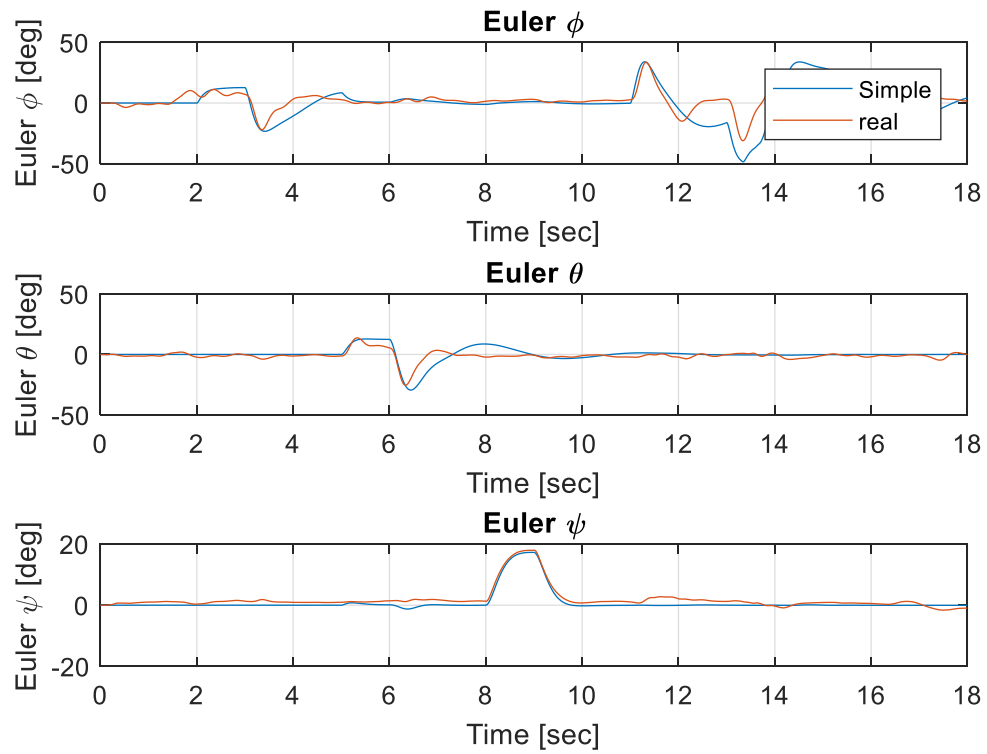
טבלה 1 – מהלך פקודות עבור תרחיש ואלידציה, השוואה מול רחפן אמיתי

זמן (שניות)	פקודה	גודל (rad/meter)
0	מיקום Z	-1 (כיוון חיובי מוגדר מטה)
2	גלגול	0.2
3	גלגול	-0.2
5	עלרוד	0.2
6	עלרוד	-0.2
8	סבסוב	0.3
9	סבסוב	-0.3
11	מיקום Y	2
13	מיקום Y	-2



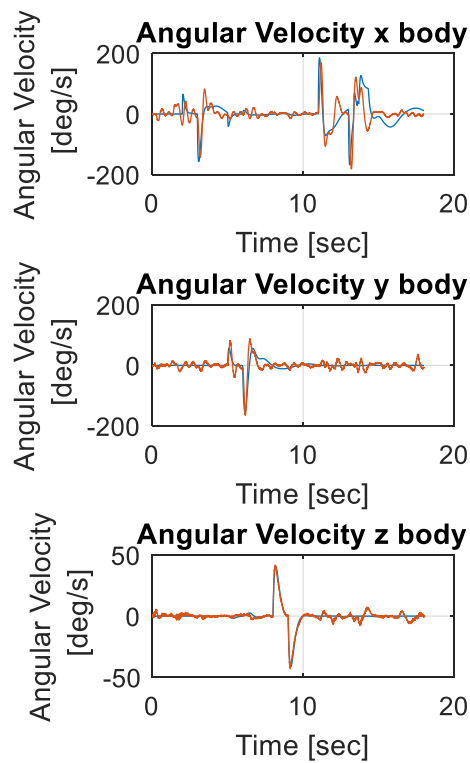
איור 55 – תוצאות מהירויות ותאוצות קוויות עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט

עקב רעש מדידה בתאוצות הקוויות לא ניתן לראות בבירור את ההתאמה שהתקבלה. ניתן לראות כי בציר Z קיימת התאמה טובה יחסית עבור המהירות הקוויות.



איור 56 - תוצאות זוויות אוילר עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט

ניתן לראות כי התוצאות עבור התנועות הזוויתיות טובות יחסית. בזווית הגלגול ϕ התקבלה חוסר התאמה לקראת סוף התמרון.



איור 57 - תוצאות מהירויות זוויתיות עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט

גם כאן קיימת התאמה כללית טובה בין הגרפים.

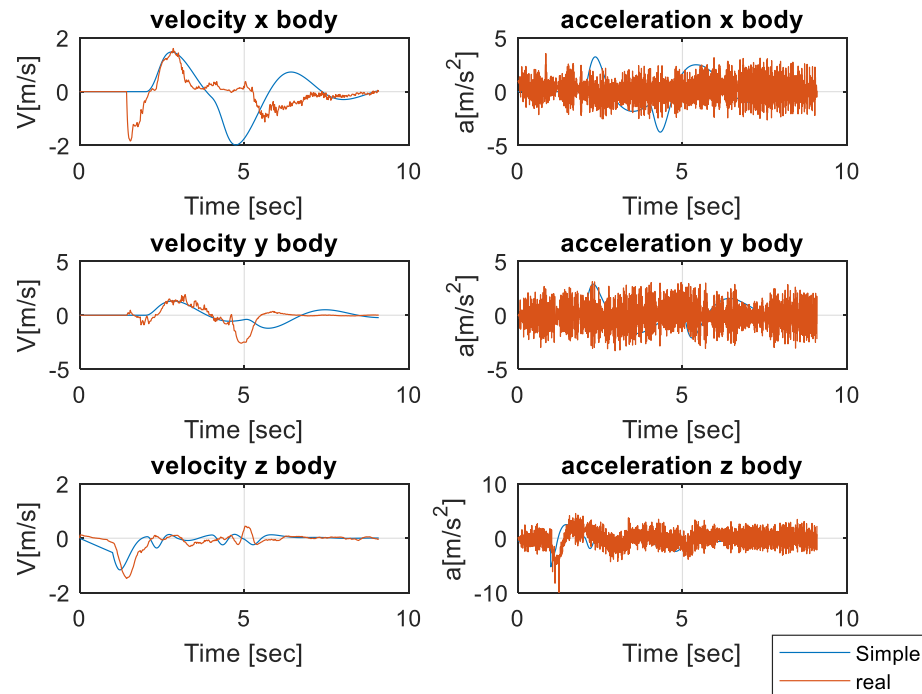
תרחיש שני:

טבלה 2 – מהלך פקודות עבור תרחיש ואלידיציה שני

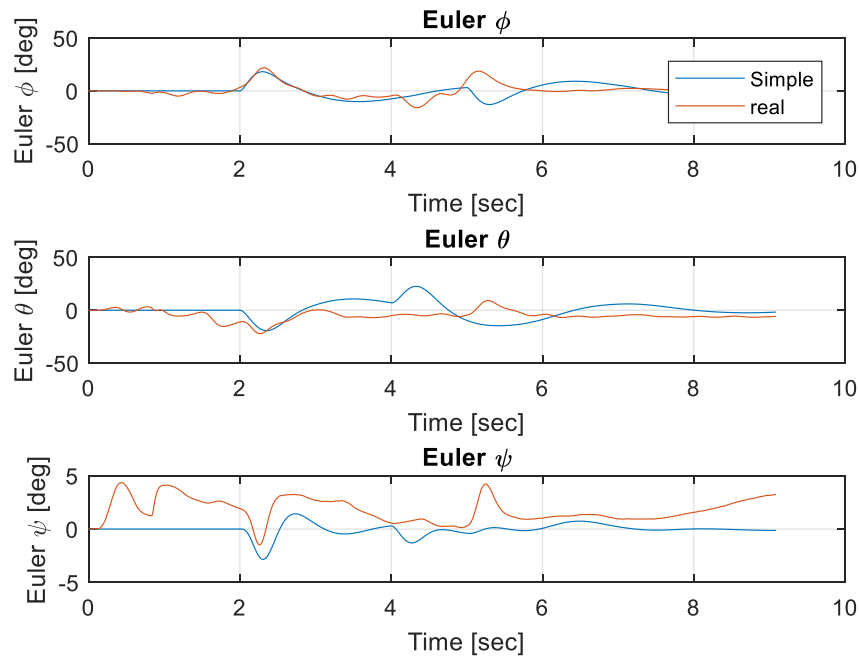
זמן (שניות)	פקודה	גודל (rad/meter)
0	מיקום Z	-1 (כיוון חיובי מוגדר מטה)
2	מיקום Y	1
2	מיקום X	1
4	מיקום Y	-1
5	מיקום X	-1



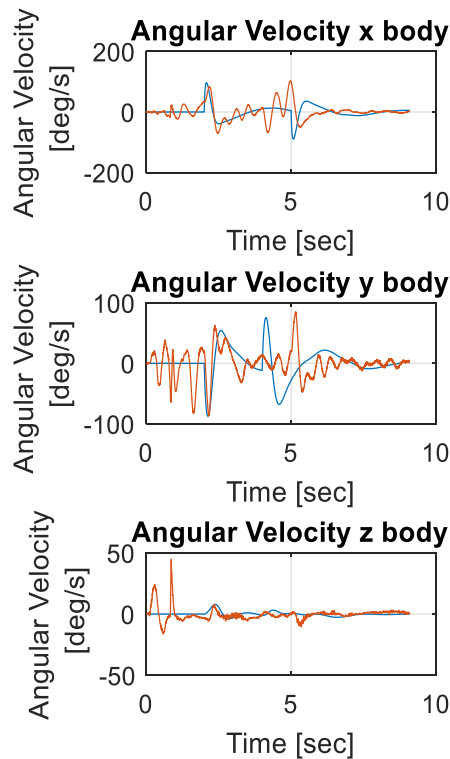
להלן התוצאות שקיבלנו:



איור 58 – תוצאות תאוצות ומהירויות קוויות, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט



איור 59 - תוצאות זוויות אويلר, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט



איור 60 - תוצאות מהירויות זוויתיות, תרחיש ואלידציה שני עבור הרחפן האמיתי והמודל המפושט

בתרחיש 2 ניתן לראות כי ישנה התאמה טובה יחסית בין גרף ההטסה לסימולציה. בגרפים הקווים ניתן לראות כי בציר X ההתאמה אינה טובה לעומת שאר הצירים. בולטת העובדה כי הרחפן ביצע תנודתיות גם כאשר לא היתה פקודה לתנועה. למשל בגרף המהירות הזוויתית בציר Y ניתן לראות כי בתחילת התנועה קיימת מהירות זוויתית למרות שלא היתה פקודה למהירות כזאת. ייתכן כי קיימות הפרעות שהרחפן ניסה לייצב ודבר זה השפיע על התוצאות.

המשך עבודה

המשך העבודה בנושא יכול לכלול את האפשרויות הבאות:

- חקירת חוג הבקרה של הרחפן והחלפתו בחוג בקרה שנלמד קודם לכן.
- שינוי פרמטרים של הרחפן והתאמת הסימולציה לרחפן מסוג אחר. דבר זה מצריך יכולת להקליט את האות שיוצא ממערכת הבקרה על מנת שיהיה אפשר לבדוד את ה-PLANT מהחוג.
- למידת פרמטרים נוספים לקבלת תוצאות מדויקות יותר (עבור רחפן מסוג אחר).
- מידול מדויק יותר של ה-PLANT על ידי הוספת פרמטר חיכוך ומציאתו על ידי ניסוי של טיסה לאורך קטע מסוים (טיסה ישרה ואופקית).



סיכום ומסקנות

במהלך העבודה נחשפנו לסימולציה מערכתית מורכבת. לאחר העבודה עלו המסקנות הבאות:

- עבור תמרוני טיסה 'עדינים' ניתן לומר כי ה-PLANT המפושט שהוא מודל ליניארי המסתמך על מספר קטן יחסית של פרמטרים מדמה בקירוב טוב את המודל האמיתי.
- החוג הסגור של הסימולציה התנהג באופן יחסית דומה לחוג הסגור של הרחפן. דבר זה מעיד על כך שמערכת הבקרה הממודלת בסימולציה דומה למערכת הבקרה של הרחפן. (תהליך הצריבה הבטיח זאת).
- ההנחה בפיתוח המודל התאורטי של ה-PLANT הניחה כי מהירות הרחפן קטנה מאוד (כלומר הוא קרוב למצב ריחוף) אך בפועל בדקנו תרחישים הכוללים תמרונים. התוצאות שקיבלנו הראו כי גם עבור מצב שאינו ריחוף מתקבלת התאמה יחסית טובה.
- תהליך מציאת הפרמטרים שתואר בפרויקט יכול להתאים למציאת פרמטרים נוספים (כגון מומנט אינרציה) ולכן ניתן לקבל התאמת מודל עבור רחפן מסוגים שונים.

References

andrew.gibiansky. (n.d.). *Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control*.

Cunha, F. S. (2013). *Momentum Theory in Hover*.

Paul Pounds, R. M. (2006). *Modelling and Control of a Quad-Rotor Robot*. Canberra: Australian National University.