

פרויקט מחקר 1- 085851

חקירה של קליע עם מנוע מגח מוצק

נועה חנינה 316217702

מנחה:

פרופסור אלון גני



הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הטכניון- מכון טכנולוגי לישראל

מאי 2023

תוכן עניינים

3	טבלת איורים
6	תקציר
6	מנוע מגח
7	מגח מוצק
7	תרמוכימיה
9	משימות
9	משימה 1- כונס מלא
9	$Cd = 0.3$ (1.1)
16	$Cd = 0.5$ (1.2)
22	משימה 2- חצי כונס
22	$Cd = 0.3$ (2.1)
28	$Cd = 0.5$ (2.2)
34	משימה 3- שלישי כונס
34	$Cd = 0.3$ (3.1)
40	$Cd = 0.5$ (3.2)
46	גלישה
46	גלישה- חלק 1
47	כונס מלא- $Cd = 0.3$, $LD = 2$
48	כונס מלא- $Cd = 0.5$, $LD = 2$
49	חצי כונס- $Cd = 0.3$, $LD = 2$
51	חצי כונס- $Cd = 0.5$, $LD = 2$
53	שלישי כונס- $Cd = 0.3$, $LD = 2$
54	שלישי כונס- $Cd = 0.5$, $LD = 2$
56	גלישה- חלק 2
57	כונס מלא- $Cd = 0.3$
58	כונס מלא- $Cd = 0.5$
60	חצי כונס- $Cd = 0.3$
61	חצי כונס- $Cd = 0.5$
63	שלישי כונס- $Cd = 0.3$
64	שלישי כונס- $Cd = 0.5$
66	ביבליוגרפיה

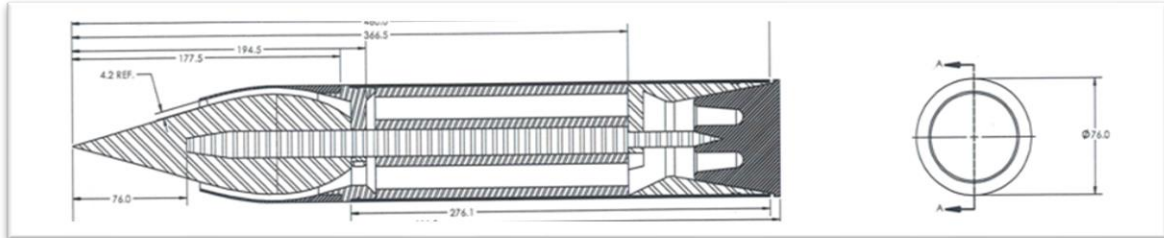
טבלת איורים

איור 1:	תיאור סכמטי של הקליע המקורי	6
איור 2:	תיאור סכמטי של מנוע מגח מוצק בסיסי	7
איור 3:	מהירות הפליטה u_e כתלות ביחס האקוויוולנטי ϕ (יחס דלק-אוויר חלקי יחס דלק-אוויר סטוכיומטרי)	7
איור 4:	מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	10
איור 5:	גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	10
איור 6:	מהירות הקליע כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	11
איור 7:	מהירות הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	11
איור 8:	השתנות ספיקת הדלק בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	12
איור 9:	השתנות מסת הקליע בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	12
איור 10:	השתנות היחס האקוויוולנטי בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	13
איור 11:	השתנות קצב הבעירה בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	14
איור 12:	דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	14
איור 13:	ספיקה מסית של האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3	15
איור 14:	מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	16
איור 15:	גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	17
איור 16:	מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	17
איור 17:	מהירות הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	18
איור 18:	השתנות ספיקת הדלק בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	18
איור 19:	השתנות מסת הקליע בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	19
איור 20:	השתנות היחס האקוויוולנטי בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	19
איור 21:	השתנות קצב הבעירה בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	20
איור 22:	דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	20
איור 23:	השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5	21
איור 24:	מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	22
איור 25:	גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	22
איור 26:	מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	23
איור 27:	מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	23
איור 28:	השתנות ספיקת הדלק כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	24
איור 29:	השתנות מסת הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	24
איור 30:	השתנות היחס האקוויוולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	25
איור 31:	השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	25
איור 32:	דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	26
איור 33:	השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3	26
איור 34:	מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	28
איור 35:	גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	28
איור 36:	מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	29
איור 37:	מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	29
איור 38:	השתנות ספיקת הדלק כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	30
איור 39:	השתנות מסת הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	30
איור 40:	השתנות היחס האקוויוולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	31
איור 41:	השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	31
איור 42:	דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	32
איור 43:	השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5	32

איור 80: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex	54
איור 81: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly	55
איור 82: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB	55
איור 83: תיאור סכמטי של תהליך בניית הגרף	56
איור 84: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex	57
איור 85: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly	57
איור 86: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB	58
איור 87: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex	58
איור 88: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly	59
איור 89: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB	59
איור 90: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex	60
איור 91: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly	60
איור 92: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB	61
איור 93: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex	61
איור 94: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly	62
איור 95: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB	62
איור 96: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex	63
איור 97: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly	63
איור 98: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB	64
איור 99: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex	64
איור 100: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly	65
איור 101: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB	65

תקציר

בפרויקט זה בוצעה חקירה של ביצועי מנוע מגח בקליע 76 מ"מ תחת תנאים שונים. קובץ זה מהווה המשך ישיר של מחקר שנעשה על ידי סטודנט אחר תוך התמקדות בקונפיגורציה מסוימת עליה נעשו שינויים ושיפורים נוספים. הגיאומטריה של הקליע המקורי מוצגת באיור 1. במחקר הנוכחי נעשה שימוש בתא שריפה דומה, אך ללא הפין וגליל הדלק המרכזיים (כלומר, הדלק היה רק בהיקף).



איור 1: תיאור סכמטי של הקליע המקורי

נקודות שעלו במהלך המחקר:

- ❖ התמקדות במצב טיסה של דחף= גרר למנוע בעל דלק גלילי בלבד וללא גוף פנימי.
 - זווית השיגור לאורך החישובים שונתה מטווח של 1-20 מעלות ונקבעה להיות 45 מעלות.
 - מסת הקליע עודכנה בחישובים:
- $$m_{full} = 6.2 [kg] \quad m_{Ramjet}(t) = 6.2 - V_f(t) \cdot \rho_f [kg]$$
- כאשר $V_f(t)$ הוא נפח הדלק המוצק כתלות בזמן ו- ρ_f צפיפות הדלק.
- נבדקו אפשרויות להקטנת שטח חתך הכונס לחצי ושליש משטחו המקורי.
 - נעשה שימוש במקדם גרר קבוע לאורך מסלול הקליע, ונבדקו שני ערכים שונים לכל משימה- 0.3, 0.5.
 - לחץ תא השריפה עודכן ל-12 [atm] עקב הנחת הפסדים בכונס ותא השריפה של כ-50% יחד. כלומר, נעשו חישובים תרמוכימיים חדשים (CEA) עבור הלחץ המעודכן ועדכון נתוני ה- output בחישובים.
 - נבחנה אופציית גלישה מנקודה מסוימת במסלול להגדלת טווח הקליע.
 - נבחנו אופציות גלישה שונות מנוקדת שיא הגובה של המסלול.
- תוצאות החישובים מראות שהכונס המקורי נותן ספיקות אוויר גדולות מדי (ספיקה התחלתית 2.9 ק"ג/שנ). עדיף להשתמש בכונס בעל חצי החתך (ספיקה התחלתית 1.45 ק"ג/שנ). אם משתמשים בכונס קטן יותר (שליש החתך ההתחלתי), לא ניתן להשיג דחף = גרר במקרה שמקדם הגרר גדול מהנומינלי (0.5 לעומת 0.3).
- עבור כונס בעל חצי הגודל המקורי ניתן להגדיל את טווח הקליע בירי ב-45 מעלות מ-16 ק"מ (ללא מגח) לכ-25 ק"מ עבור מגח עם דלק HTPB ול-22.5 ק"מ עבור מגח עם פלקסיגלס או פוליאסטר עבור דחף=גרר בזמן פעולת המגח, ומקדם גרר 0.3. מקדם גרר גבוה (0.5) מקטין את הטווחים.
- תוספת גלישה (כנף) בשיא הגובה יכולה להכפיל (פי 2) את הטווח עבור יחס גלישה $L/D=3$, ולהגדיל אותו פי 5 (יותר מ-100 ק"מ) עבור יחס גלישה $L/D=10$ לעומת קליע מגח ללא גלישה. השוואה לקליע ללא מגח מראה שקליע מגח עם תוספת גלישה ביחס $L/D=3$ מכפילה את הטווח כמעט פי 3, ועבור $L/D=10$ הטווח גדל פי 7.

מנוע מגח

מנוע מגח הינו מנוע נושם אוויר והוא הפשוט מבין כל המנועים נושמי אוויר מאחר והוא חסר חלקים נעים ולכן השחיקה בו נמוכה. פעולת הדחיסה של האוויר הנכנס מתבצעת על ידי תנועתו של המנוע במהירות גבוהה, לעיתים קיים גם גוף פנימי בכונס שתורם לנצילות הפעולה. פעולת מנוע המגח אופטימלית בטווח מספרי מאך של 2 עד 5, ועל כן יש להקנות מהירות התחלתית למנוע (על ידי שיגור מתותח או שילוב של בוסטר) על מנת שנוכל "להנות" מתופעת המגח. יש לציין כי המנוע משייט במהירויות על קוליות אך הבעירה בחלל המנוע מתרחשת במהירויות תת קוליות, זאת בניגוד למנוע על מגח שם גם השריפה היא על קוליות. היתרון העיקרי של מגח על פני מנועים נושמי אוויר

אחרים כפי שנאמר הוא הפשטות והשחיקה הנמוכה כך שניתן להגיע למהירויות גבוהות מאוד, ולעומת מנוע רקטי היתרון העיקרי הוא התקיפה הסגולית הגבוהה יותר המתקבלת במגח עקב כך שהמחמצן שלנו- האוויר- מתקבל ב"חינם".

מגח מוצק

מנוע מגח עם דלק מוצק ניחן בגיאומטריה פשוטה במיוחד, שכן הוא למעשה מעטפת גלילית המכילה גליל דלק בתוכה המאפשר מעבר של אוויר לחמצון הדלק וקיום הבעירה ועל ידי גזי הפליטה נקבל דחף. אחד הדגשים העיקריים שנרצה לשים אליהם לב בתכנון מנוע מגח מוצק הוא גובה מדרגת הכניסה, כלומר ההפרש בין קוטר הכניסה לבין הקוטר הפנימי של גליל הדלק, על מנת שנוכל לקבל סירקולציה שתאפשר אחזקת בעירה.



איור 2: תיאור סכמטי של מנוע מגח מוצק בסיסי

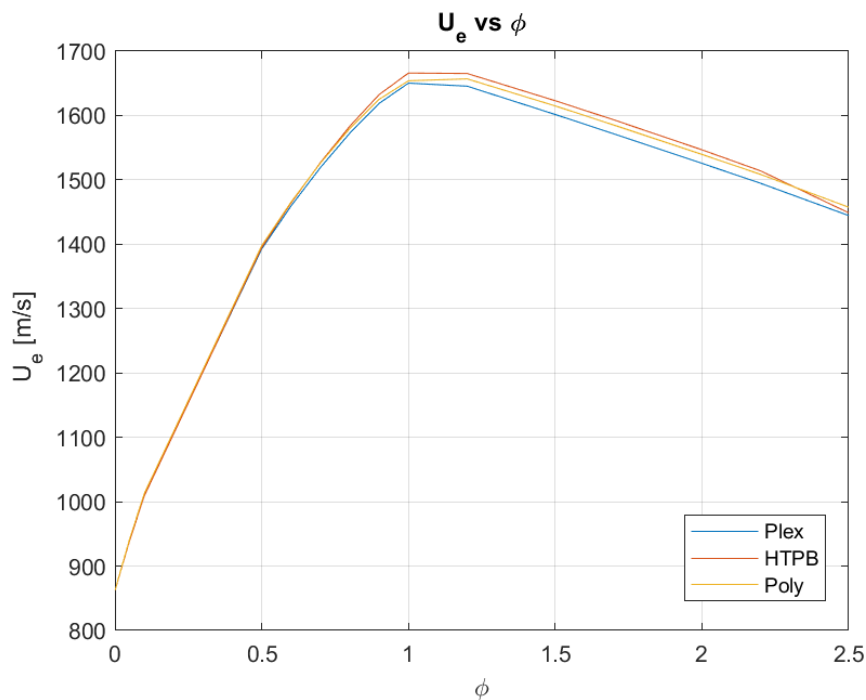
תרמוכימיה

בעזרת תוכנת CEA, חושבה התקיפה הסגולית כתלות ב ϕ עבור לחץ תא השריפה של 12 [atm] עקב הנחת הפסדים

בכונס ותא השריפה של 50% יחד. כאשר $\phi = \frac{\frac{F}{\dot{O}}}{\left(\frac{F}{\dot{O}}\right)_{st}}$. היחסים הסטוכיומטריים עבור כל דלק:

$$f_{st}(Plex) = 0.1207, \quad f_{st}(HTPB) = 0.072, \quad f_{st}(Poly) = 0.139$$

Plex=Plexiglas (PMMA), Poly=Polyester, HTPB=Hydroxyl-Terminated Polybutadiene



איור 3: מהירות הפליטה u_e כתלות ביחס האקוויולנטי ϕ (יחס דלק-אוויר/חלקי יחס דלק-אוויר סטוכיומטרי)

תוכנת CEA מחשבת את התקיפה הסגולית I_{sp} , בהנחה שמדובר במנוע רקטי, כאשר מהירות הפליטה u_e . הקשר בין מהירות הפליטה לתקיפה הסגולית (נחיר מתואם):

$$u_e = I_{sp} g_0$$

לכן, מתוך I_{sp} המתקבל מהתוכנה ניתן לקבל את מהירות הפליטה u_e על ידי הכפלה ב- g . (יש גרסאות של CEA, בהן התקיפה הסגולית מופיעה ב-m/s, כלומר, למעשה לפי הערך של u_e).
נוכל לחשב את מהירות הפליטה u_e עבור כל ϕ ובכך נוכל לחשב גם את הדחף על פי המשוואה הבאה:

$$F = \dot{m}_a((1+f)u_e - u_a)$$

כאשר מניחים נחיר מתואם, ו- u_a היא מהירות הטיסה.

בנוסף אנו מתמקדים במצב שבו דחף = גרר לכן בעזרת הקשר הזה נוכל למצוא את ספיקת הדלק:

$$F = D$$

$$\dot{m}_a[(1+f)u_e - u_a] = \frac{1}{2} \rho u_a^2 S C_D$$

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_f)u_e - \dot{m}_a u_a = \frac{1}{2} \rho u_a^2 S C_D$$

$$\dot{m}_f = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 S C_D + \dot{m}_a (u_a - u_e)}{u_e}$$

נזכיר כי u_e היא מהירות יציאת הגזים, נקבעת על סמך החישובים התרמוכימיים כתלות ביחס האקווילנטי ϕ . מהירות בניסת האוויר ההתחלתית למנוע (מהירות הטיסה) ידועה $u_a = 930 \frac{m}{s}$ וספיקת האוויר מחושבת על ידי $\dot{m}_a = \rho V S \left[\frac{kg}{s} \right]$, כך ששטח הכונס S משתנה בהתאם למשימות (כונס מלא/חצי/שליש). מהירות הקול בגובה פני הים $a = 340 \left[\frac{m}{s} \right]$ ולכן מספר המאך של הקליע ביציאה מהקנה הוא $M = \frac{u}{a} = 2.73$. בעזרת מספר המאך נוכל גם למצוא את טמפרטורת ולחץ הסטגנציה של האוויר הנכנס:

$$P_{0a} = P_a \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 24.4 \text{ atm}, \quad T_{0a} = T_a \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) = 742.2 \text{ K}$$

כאשר $\gamma = 1.4, T_a = 298 [K]$.

עקב הפסדי לחץ בכונס ובתא השריפה, ההנחה היא שלחץ הסטגנציה בתא השריפה הוא $P_{01} = 12 \text{ atm}$.

משימות

בחלק זה של הפרויקט נבצע חלוקה ראשית לשלוש משימות על פי גודל הכונס וכל משימה תתחלק לשתי תתי משימות על פי מקדם הגרר באופן הבא:

1. משימה 1- כונס מלא
 - מקדם גרר 0.3
 - מקדם גרר 0.5
2. משימה 2- חצי כונס
 - מקדם גרר 0.3
 - מקדם גרר 0.5
3. משימה 3- שלישי כונס
 - מקדם גרר 0.3
 - מקדם גרר 0.5

עבור כל אחד מהמקרים (6 סה"כ) נקבל את:

- ❖ מסלול הקליע
- ❖ גובה הקליע כתלות בזמן
- ❖ מהירות הקליע כתלות בגובה
- ❖ מהירות הקליע כתלות בזמן
- ❖ השתנות ספיקת הדלק כתלות בזמן
- ❖ השתנות מסת הקליע בזמן
- ❖ השתנות היחס האקוויולנטי בזמן
- ❖ השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן
- ❖ גודל הגרר כתלות בזמן
- ❖ השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן
- ❖ חישוב שטף מסי של האוויר בתחילת ובסוף פעולת המנוע

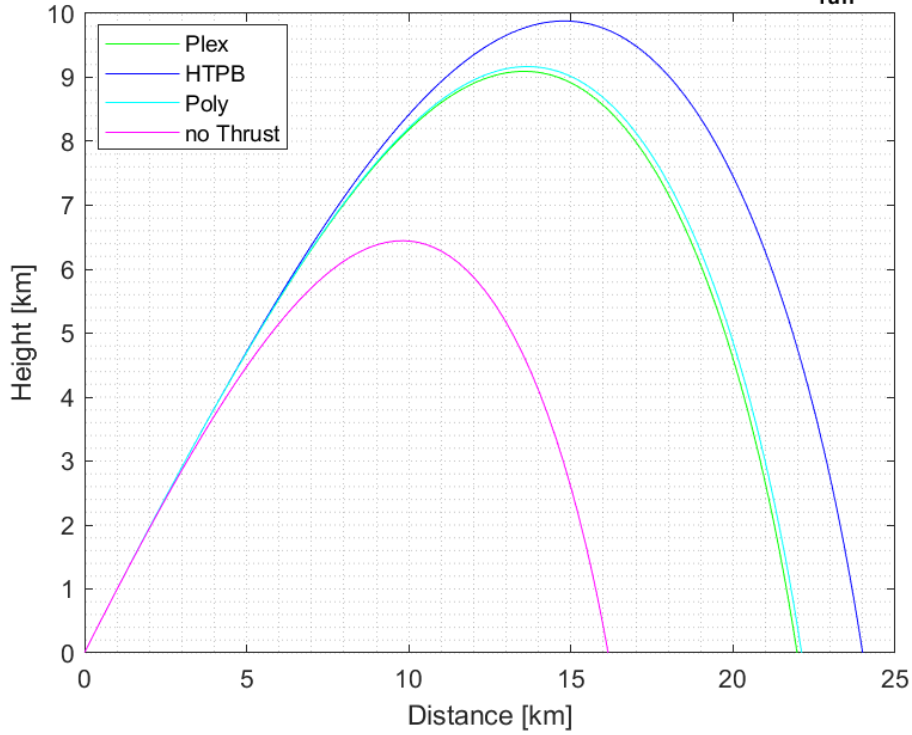
כל הגרפים והחישובים שנעשו בפרק זה, משווים בין ביצועים של שלושה סוגי דלקים: Plexiglass, Polyester, HTPB בנוסף, בחלק מן הגרפים מבוצעת השוואה עבור מצב של קליע ללא מנוע (מסה קבועה לכל אורך המסלול).

משימה 1- כונס מלא

$$C_d = 0.3 \quad (1.1)$$

מסלול הקליע:

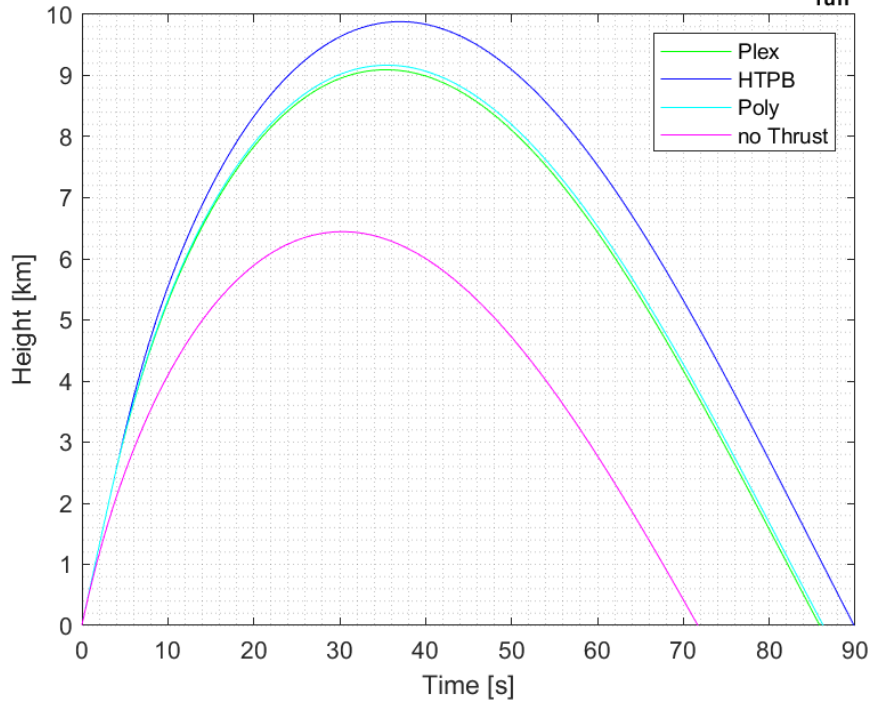
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 4: מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

גובה כחלות בזמן:

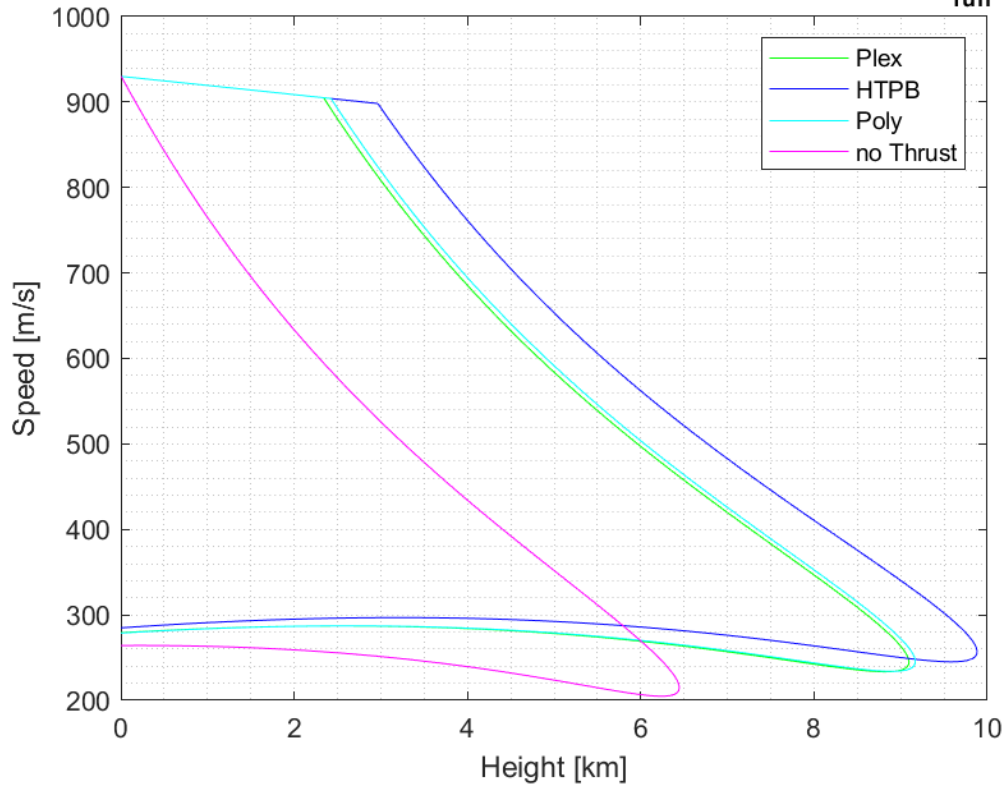
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 5: גובה הקליע כחלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

מהירות כתלות בגובה:

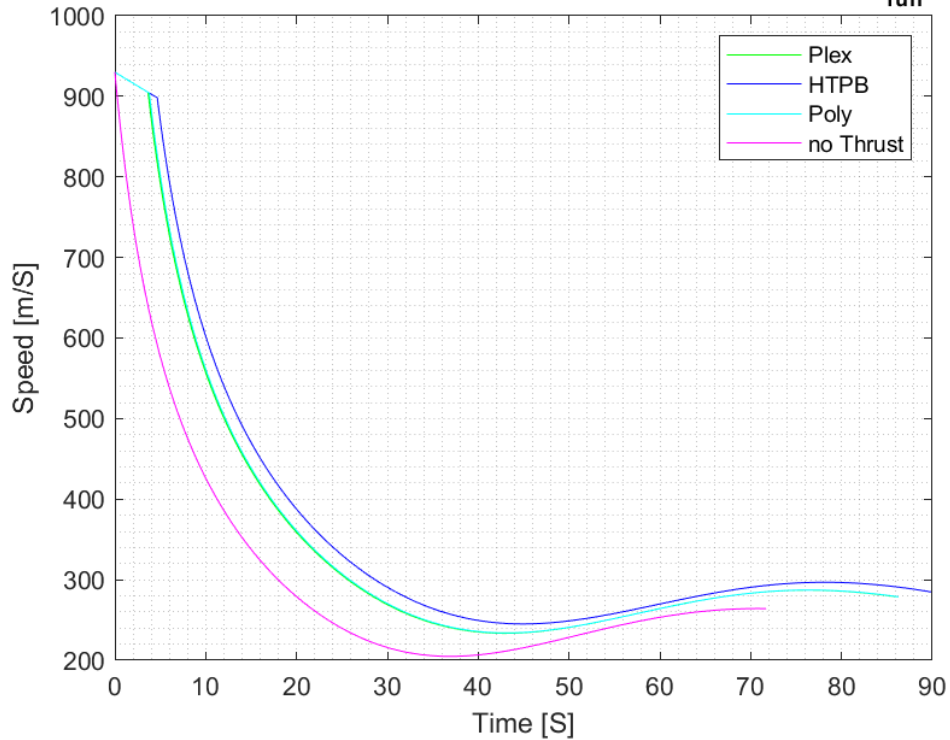
Height VS Speed- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 6: מהירות הקליע כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

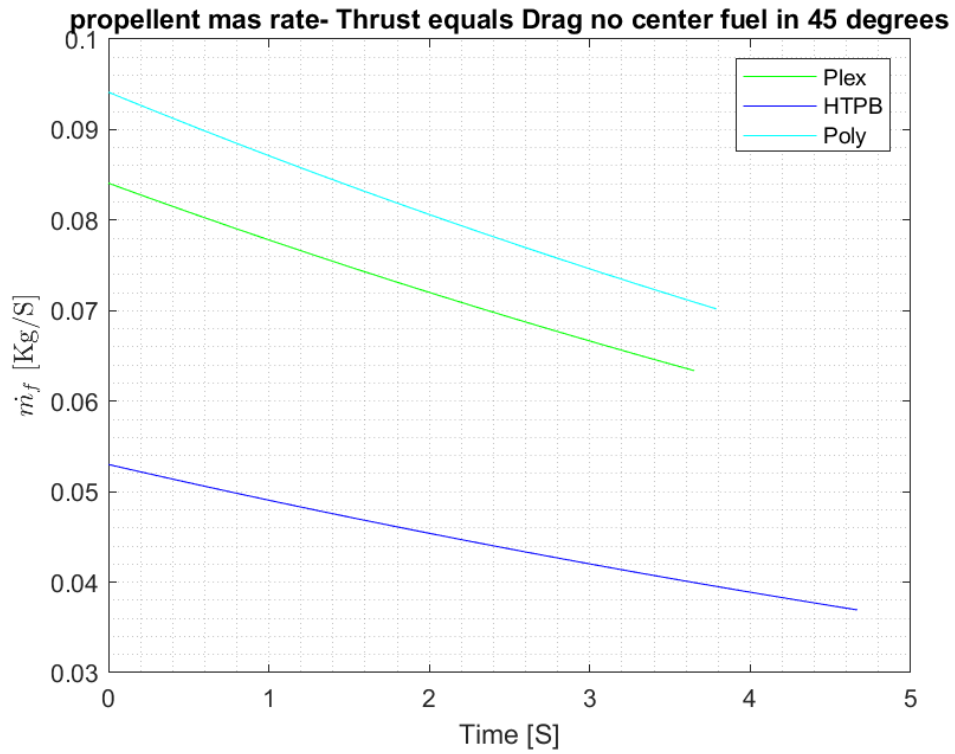
מהירות כתלות בזמן:

Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



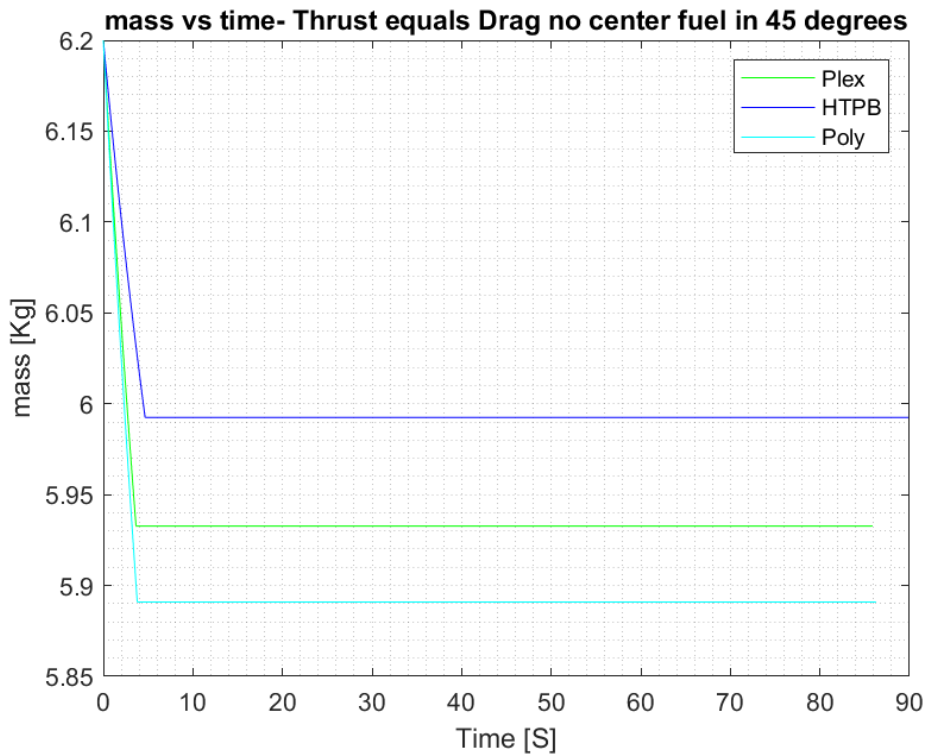
איור 7: מהירות הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

השתנות ספיקת הדלק בזמן:



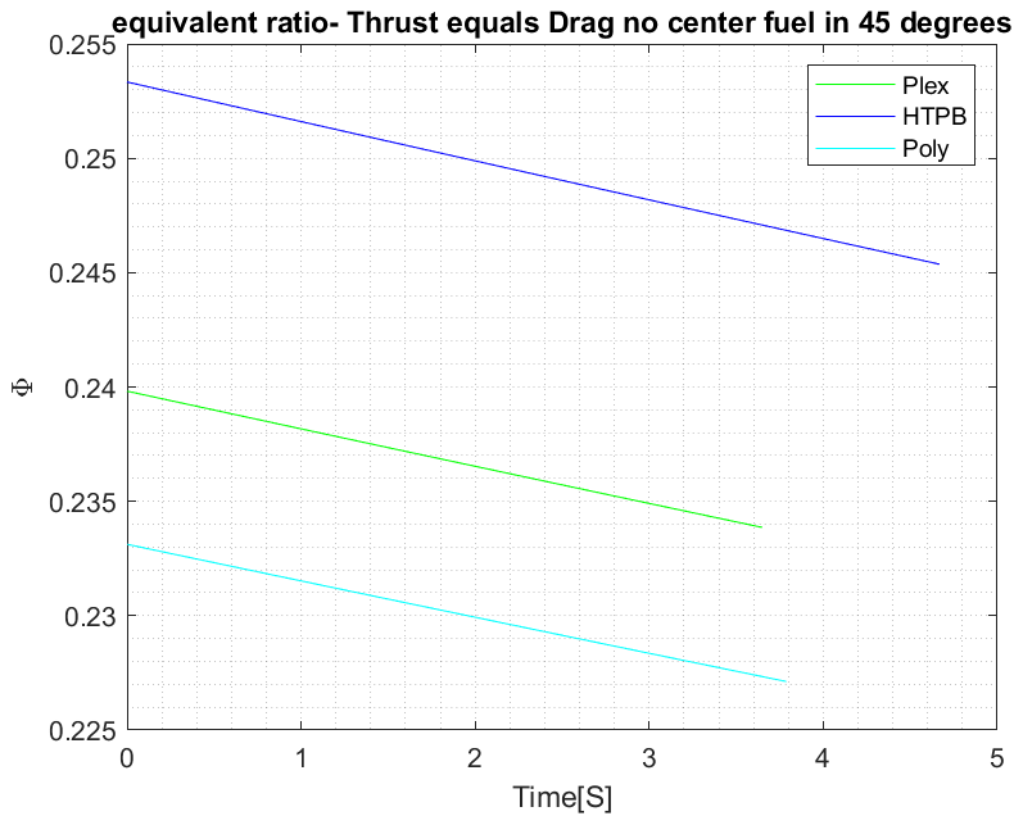
איור 8: השתנות ספיקת הדלק בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

השתנות מסת הקליע בזמן:



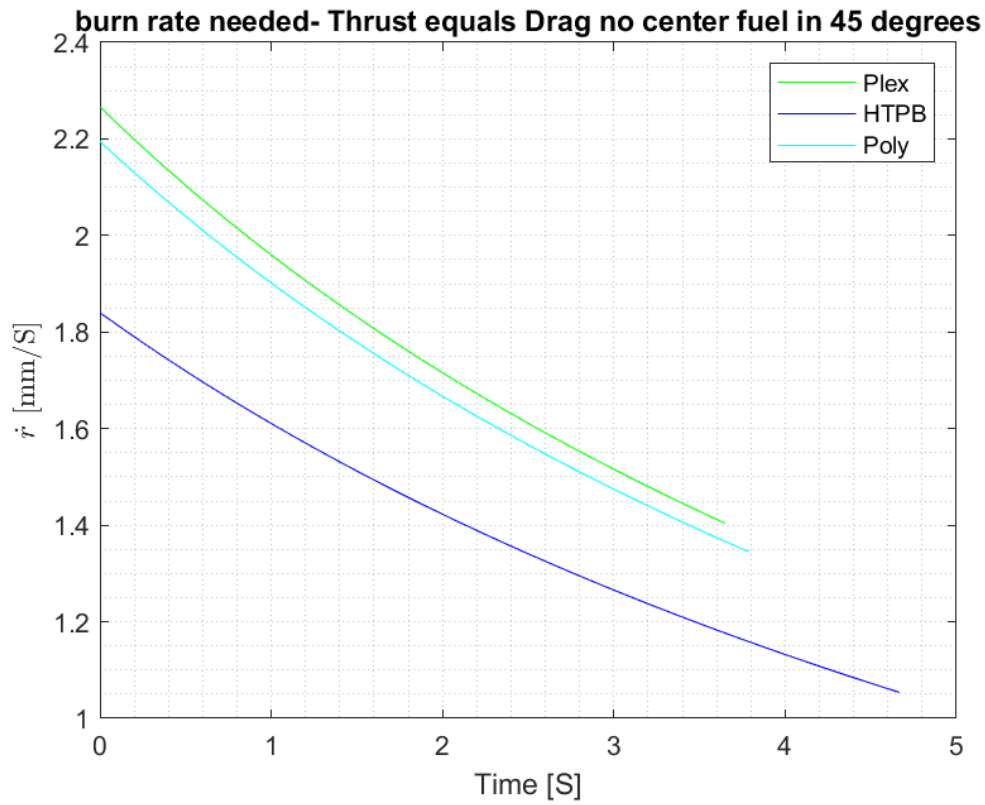
איור 9: השתנות מסת הקליע בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

יחס אקוויוולנטי בזמן:



איור 10: השתנות היחס האקוויוולנטי בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

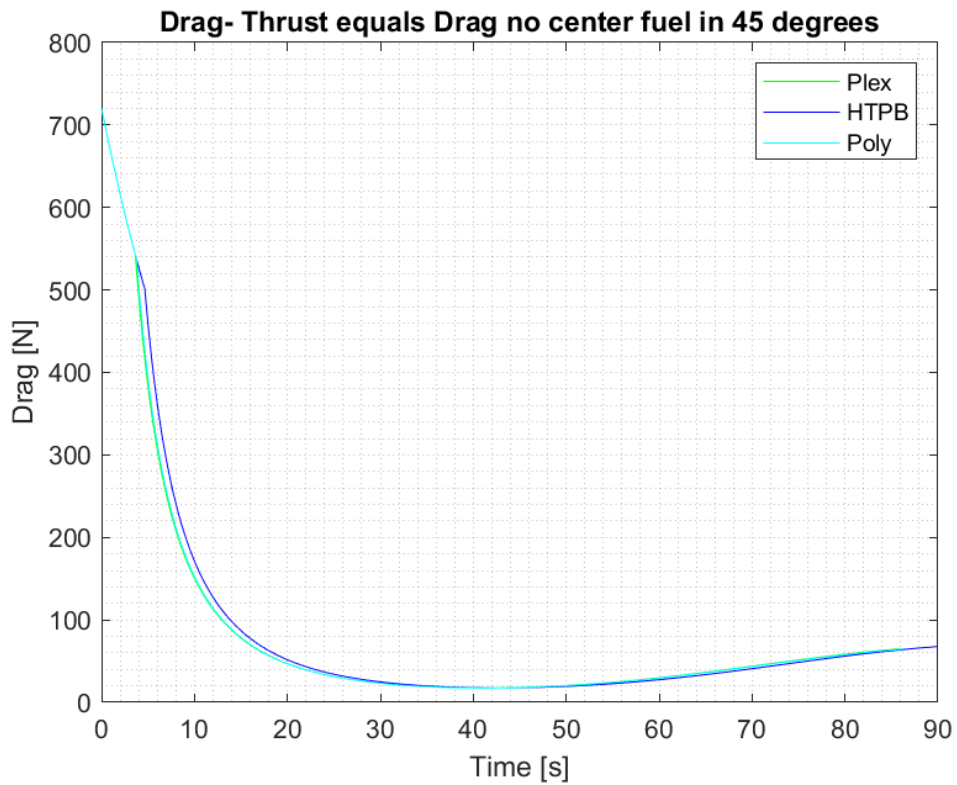
השתנות קצב הבעירה בזמן:



איור 11: השתנות קצב הבעירה בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

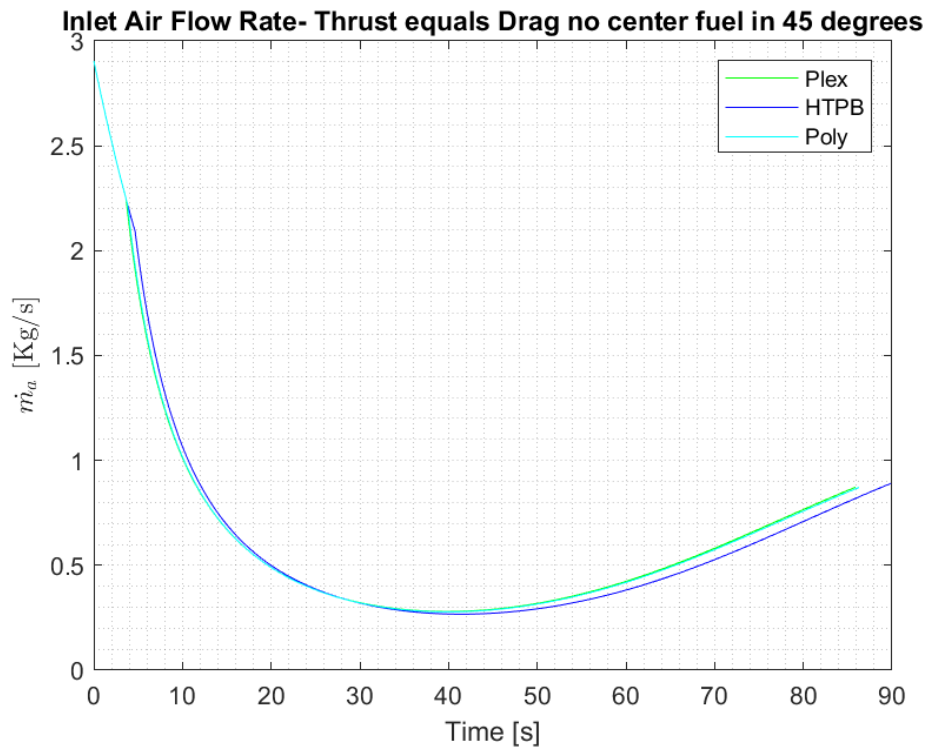
דחף=גרר:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 s C_D$$



איור 12: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

ספיקה מסית של האוויר:



איור 13: ספיקה מסית של האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.3

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 1027.7 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

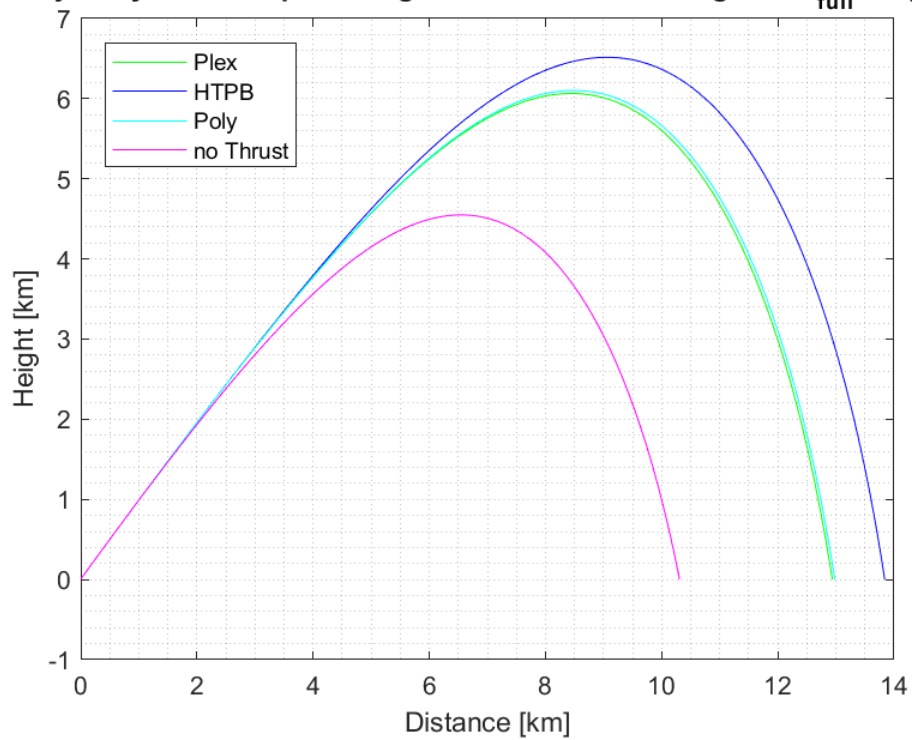
$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 208.4 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 212.7 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 208.2 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$C_d = 0.5$ (1.2)
מסלול הקליע:

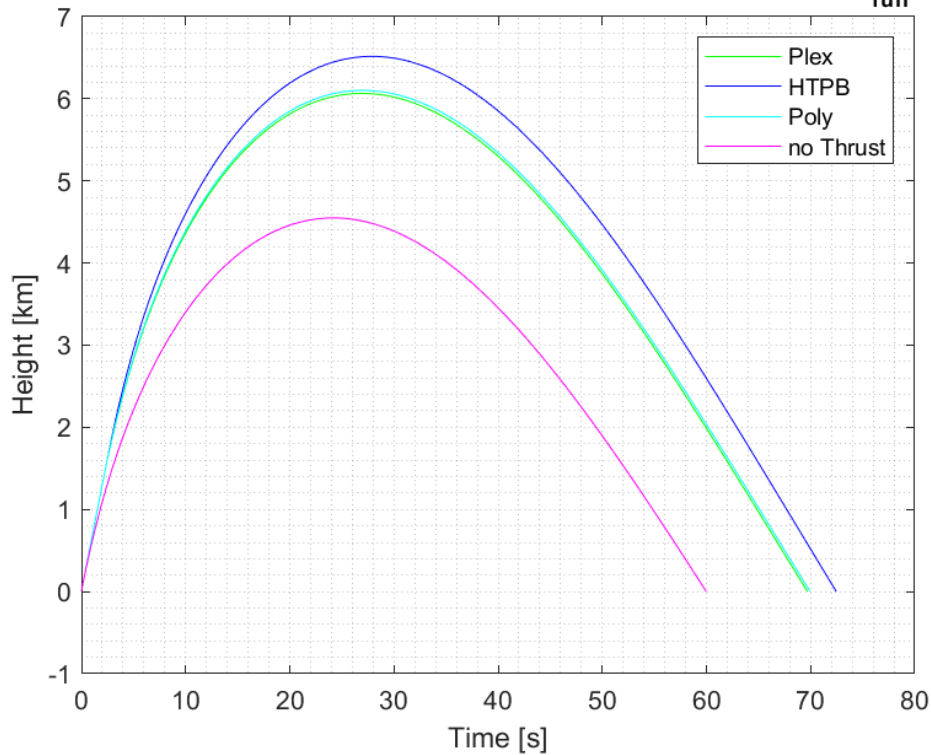
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full} = 6.2$ [kg]



איור 14: מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

גובה כתלות בזמן:

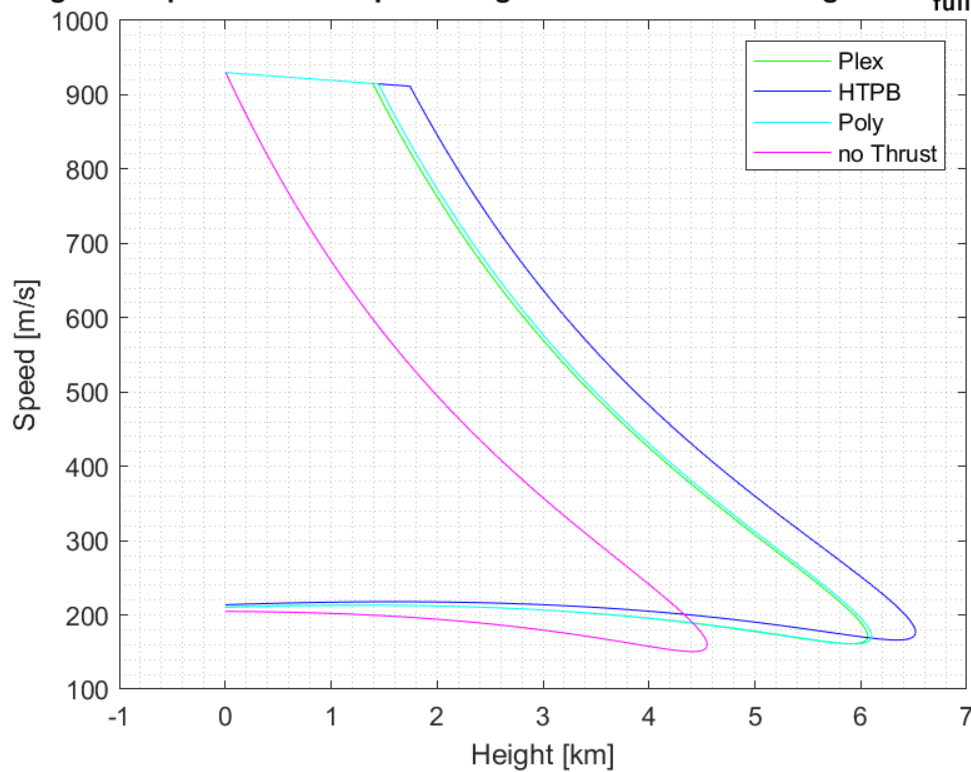
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 15: גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

מהירות כתלות בגובה:

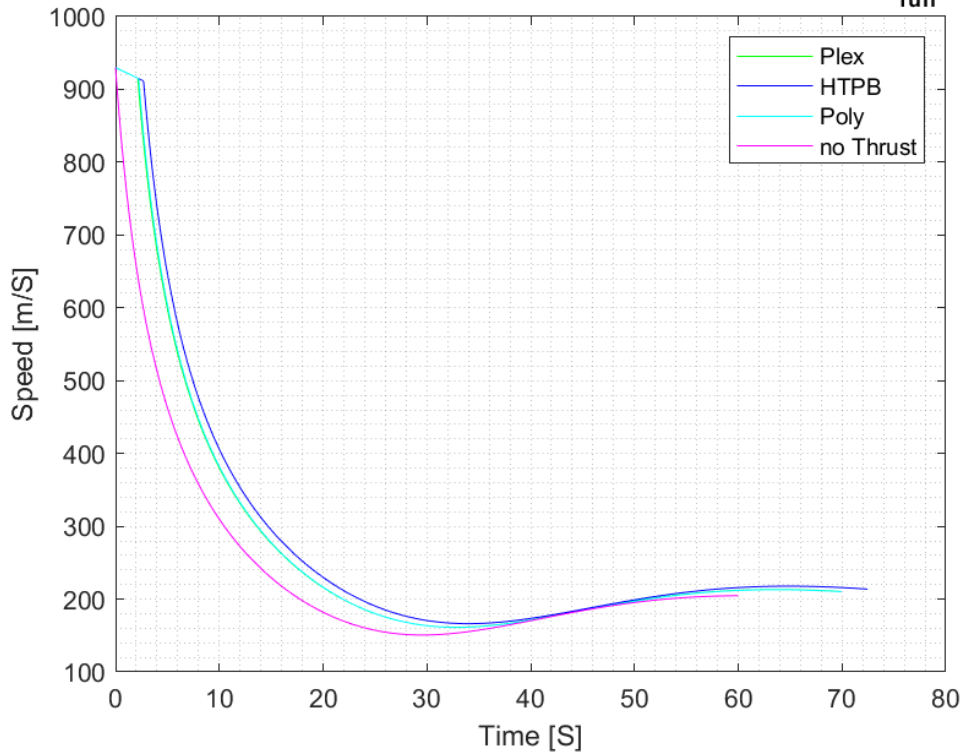
Height VS Speed- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 16: מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

מהירות כתלות בזמן:

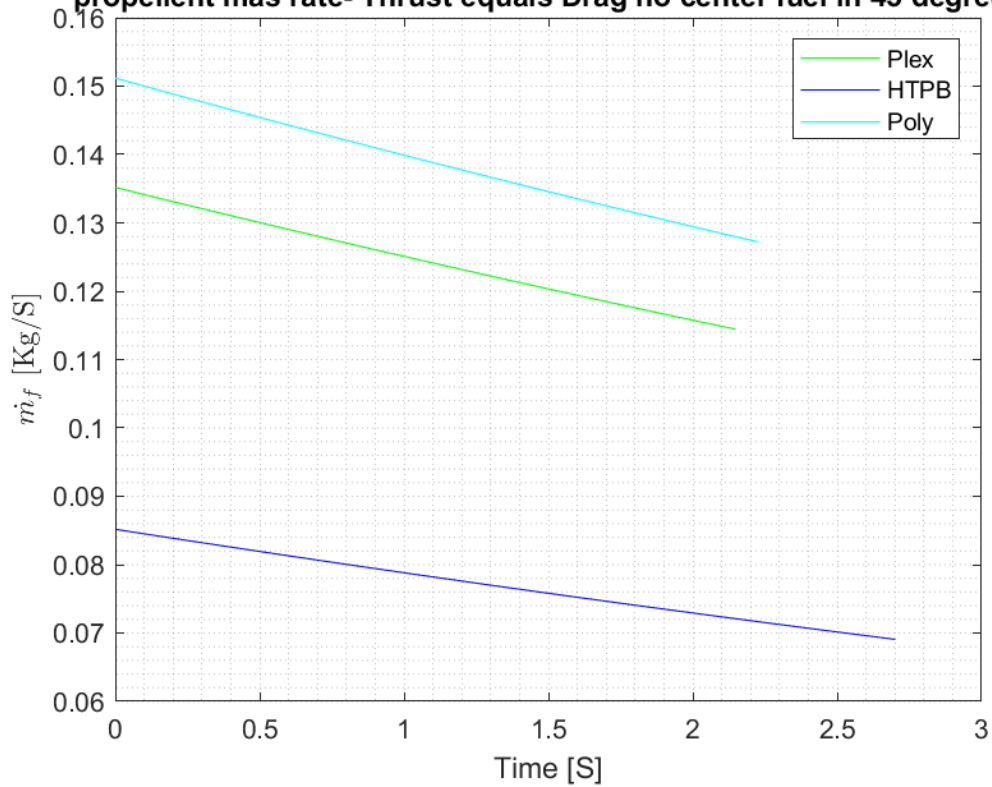
Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full} = 6.2[\text{kg}]$



איור 17: מהירות הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

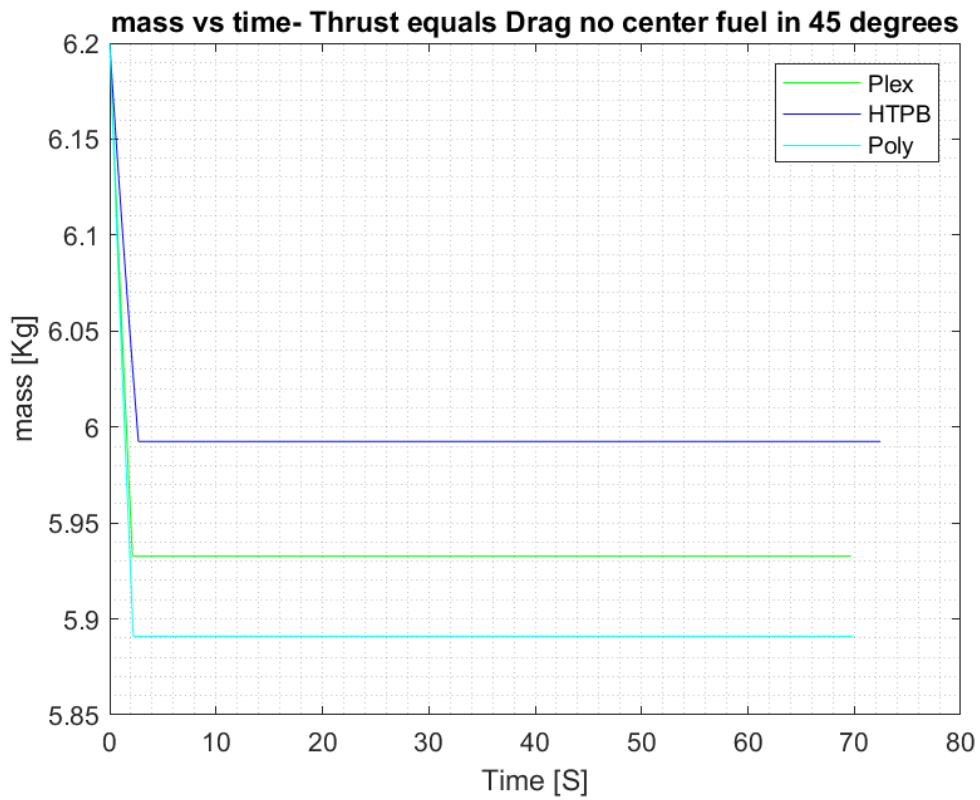
השתנות ספיקת הדלק בזמן:

propellent mas rate- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees



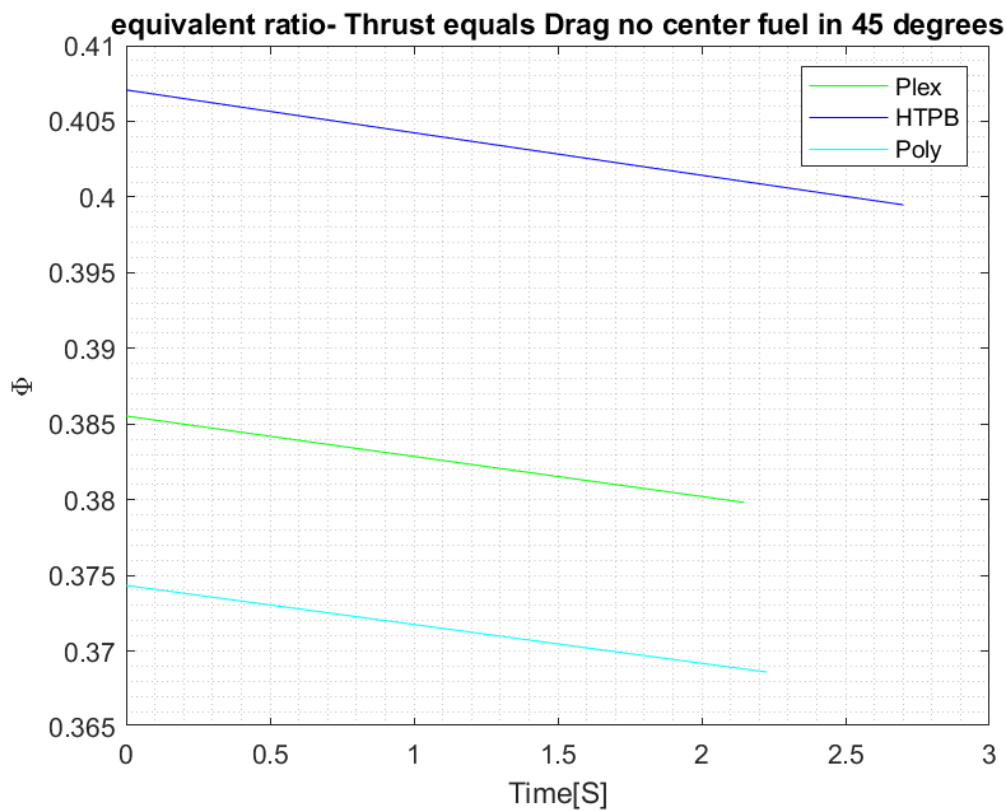
איור 18: השתנות ספיקת הדלק בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

השתנות מסת הקליע בזמן:



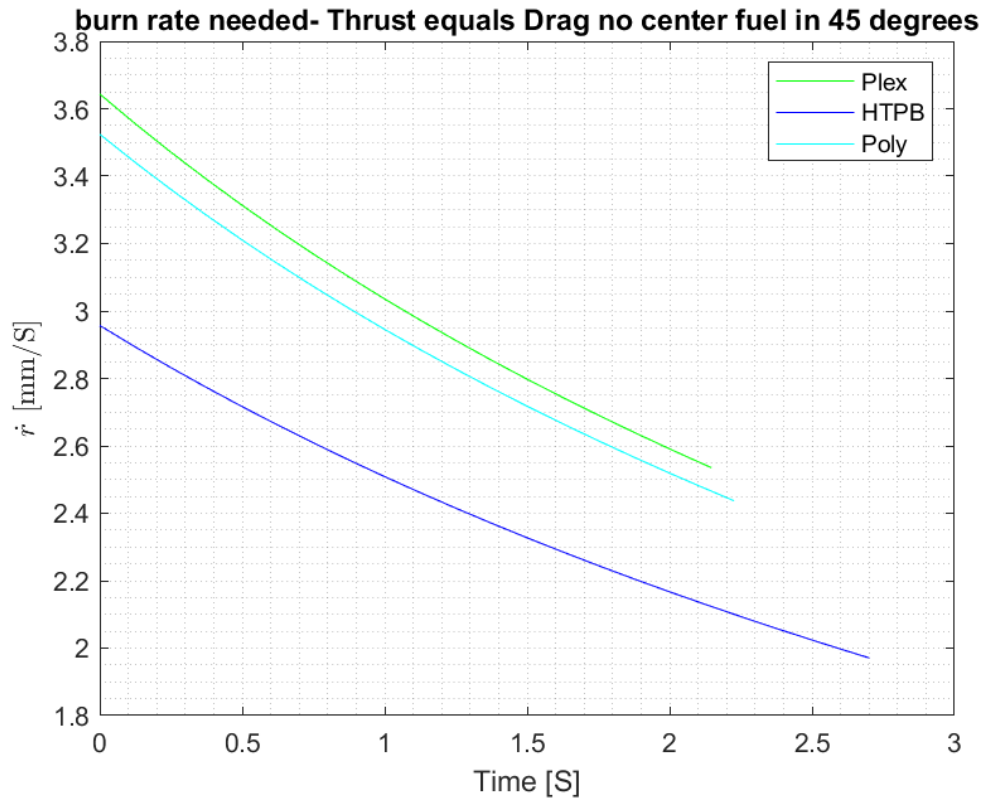
איור 19: השתנות מסת הקליע בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

יחס אקוויולנטי בזמן:



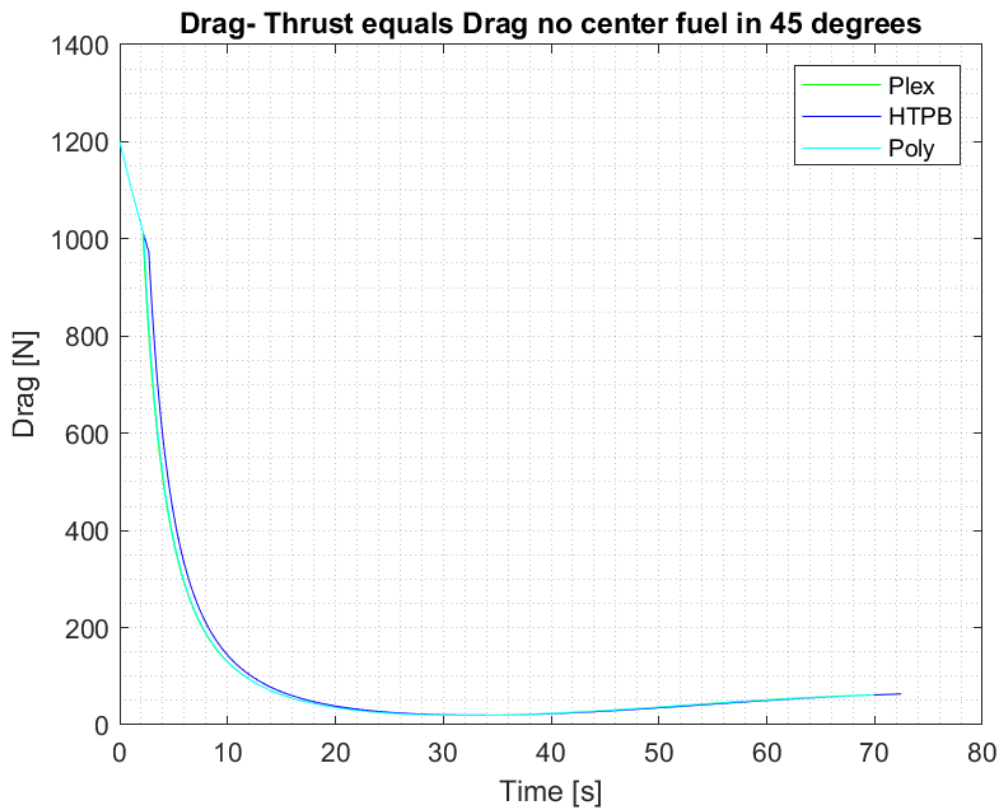
איור 20: השתנות היחס האקוויולנטי בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

השתנות קצב הבעירה בזמן:

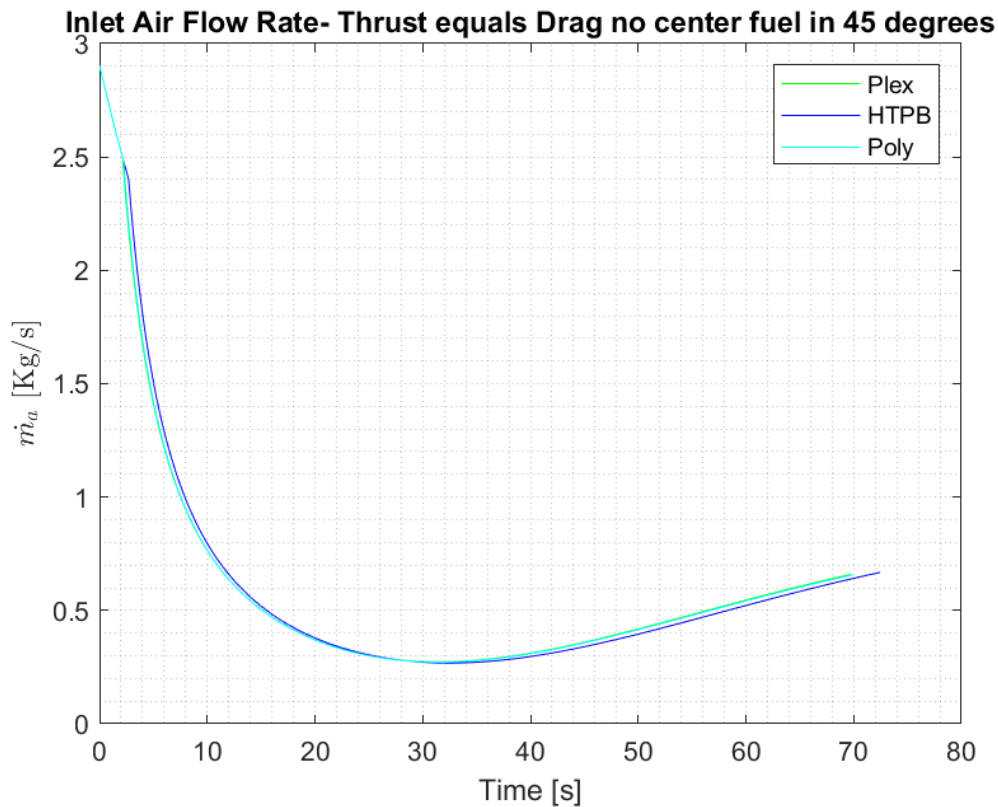


איור 21: השתנות קצב הבעירה בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

דחף=גרר:



איור 22: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5



איור 23: השתנות ספיקת האוויר בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור כונס מלא ומקדם גרר 0.5

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 1027.7 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 157.3 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 159.6 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

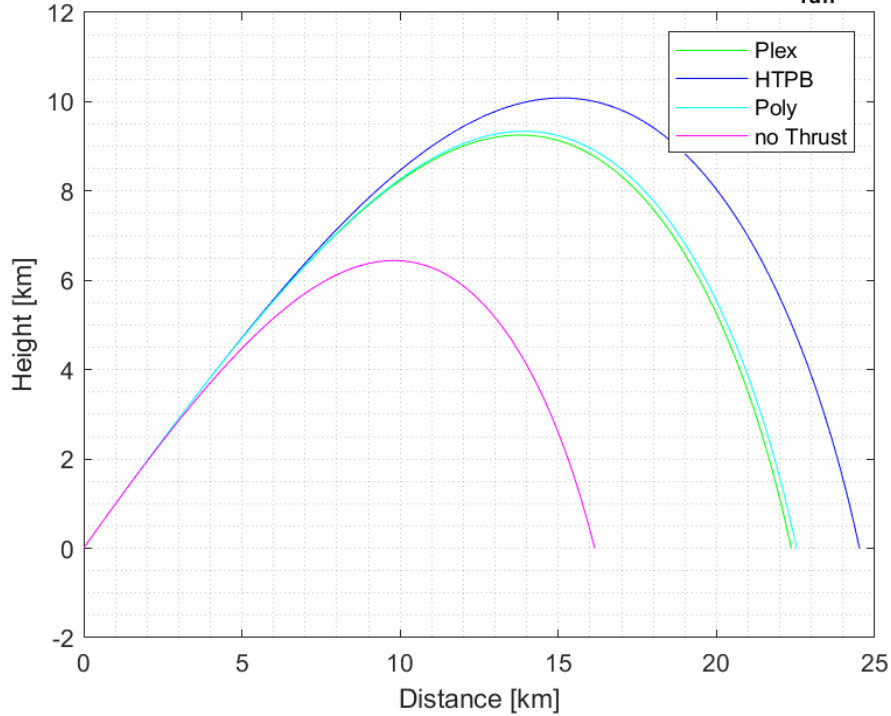
$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 157 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

משימה 2- חצי כונס

$$C_d = 0.3 \quad (2.1)$$

מסלול הקליע:

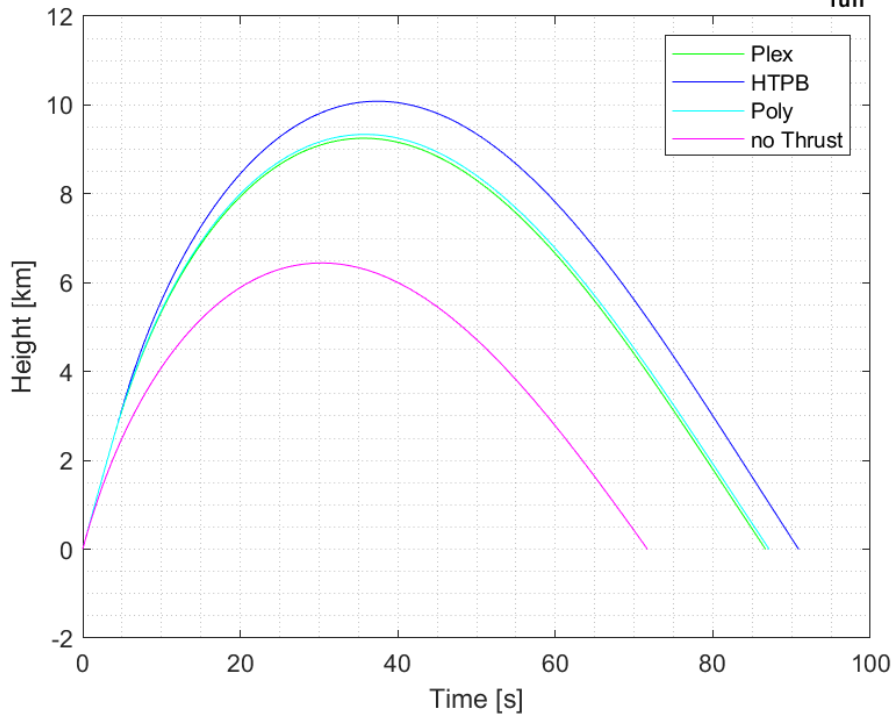
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 24: מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

גובה כתלות בזמן:

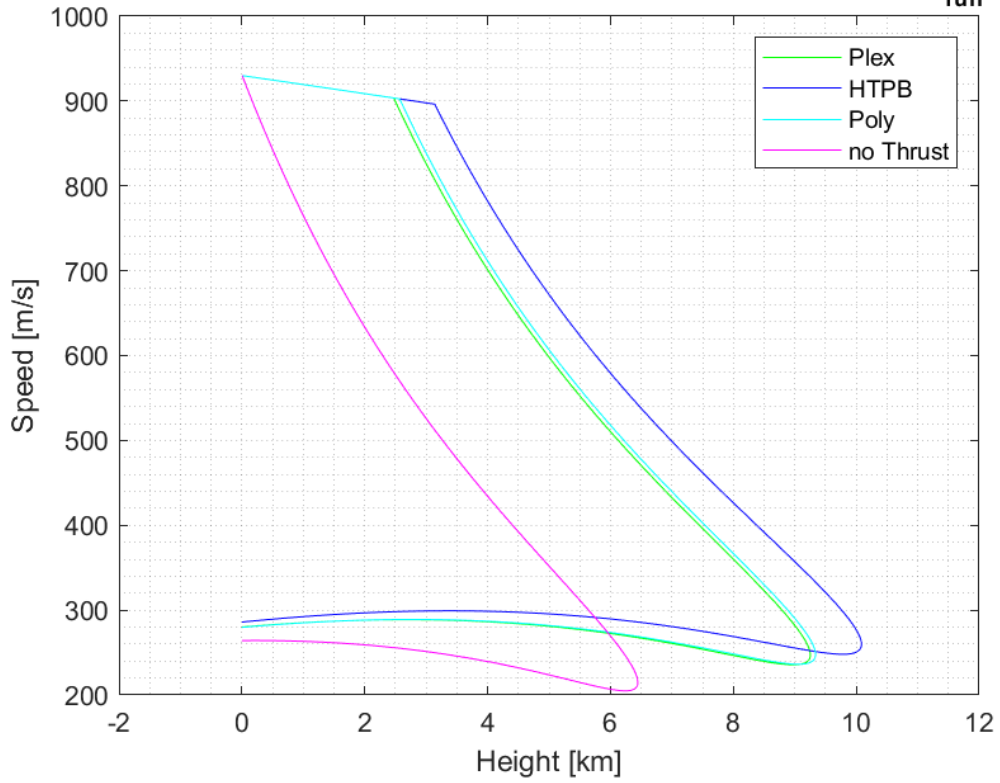
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 25: גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

מהירות כתלות בגובה:

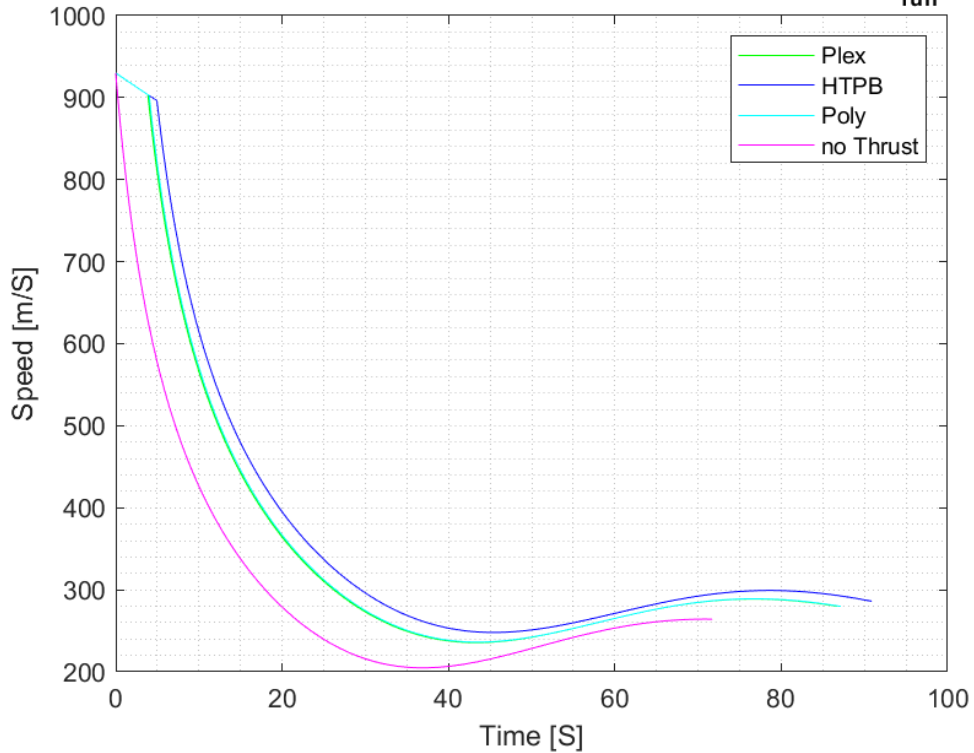
Height VS Speed- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 26: מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

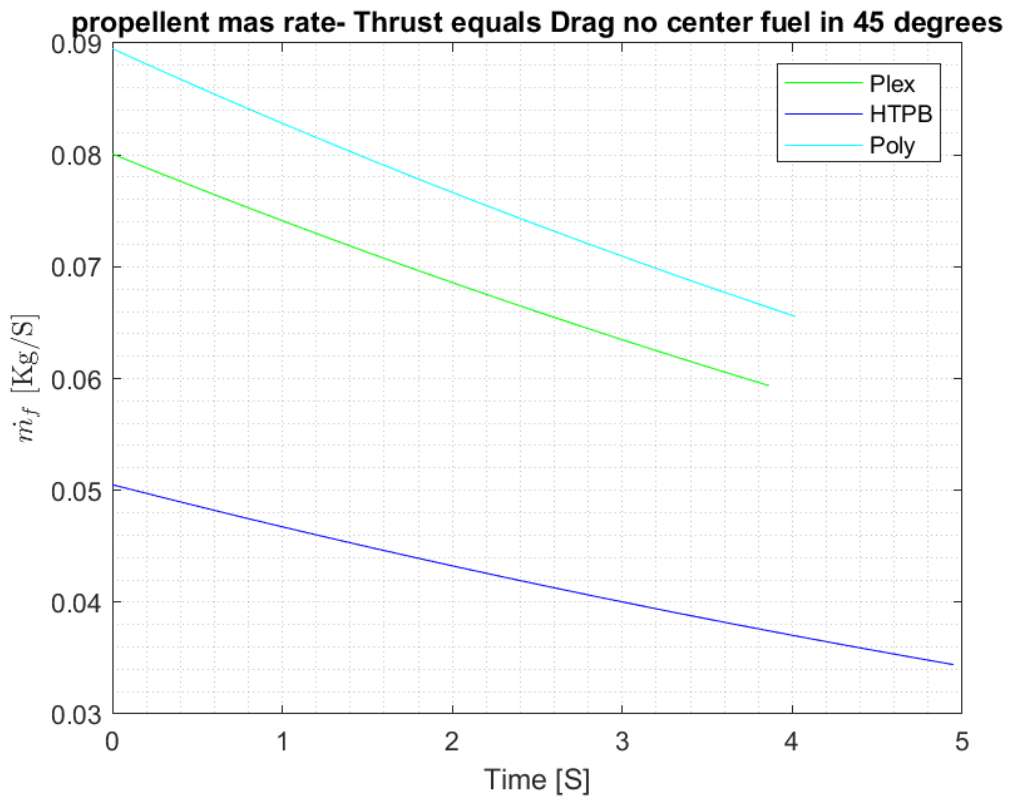
מהירות כתלות בזמן:

Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



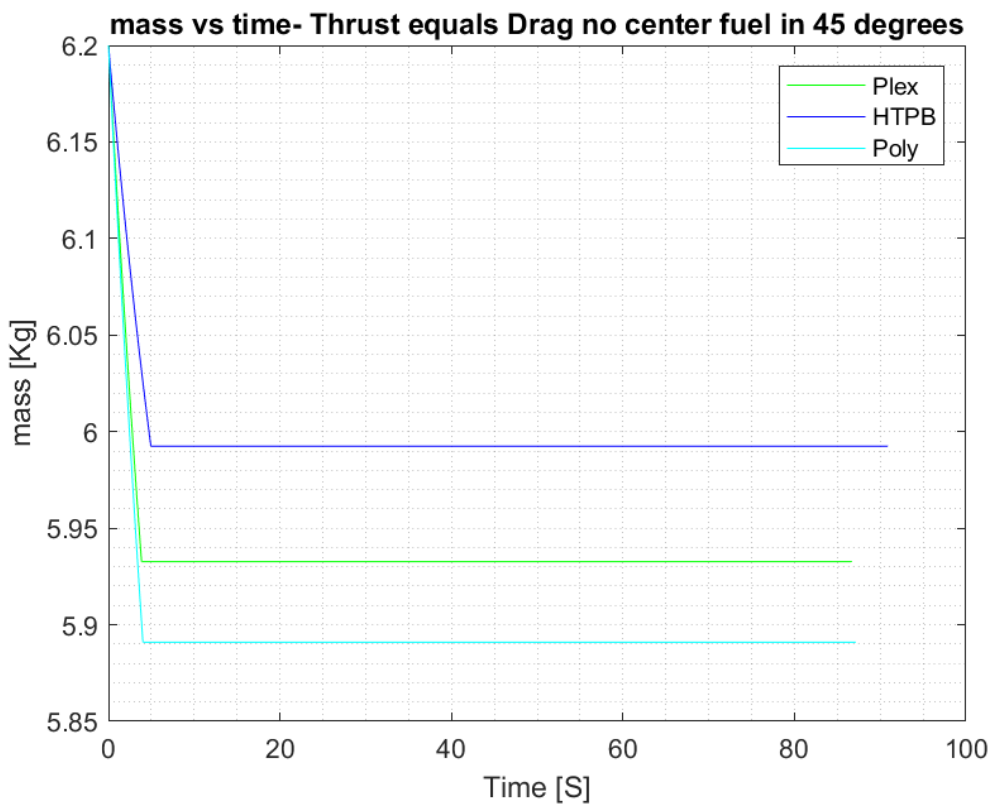
איור 27: מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

השתנות ספיקת הדלק בזמן:



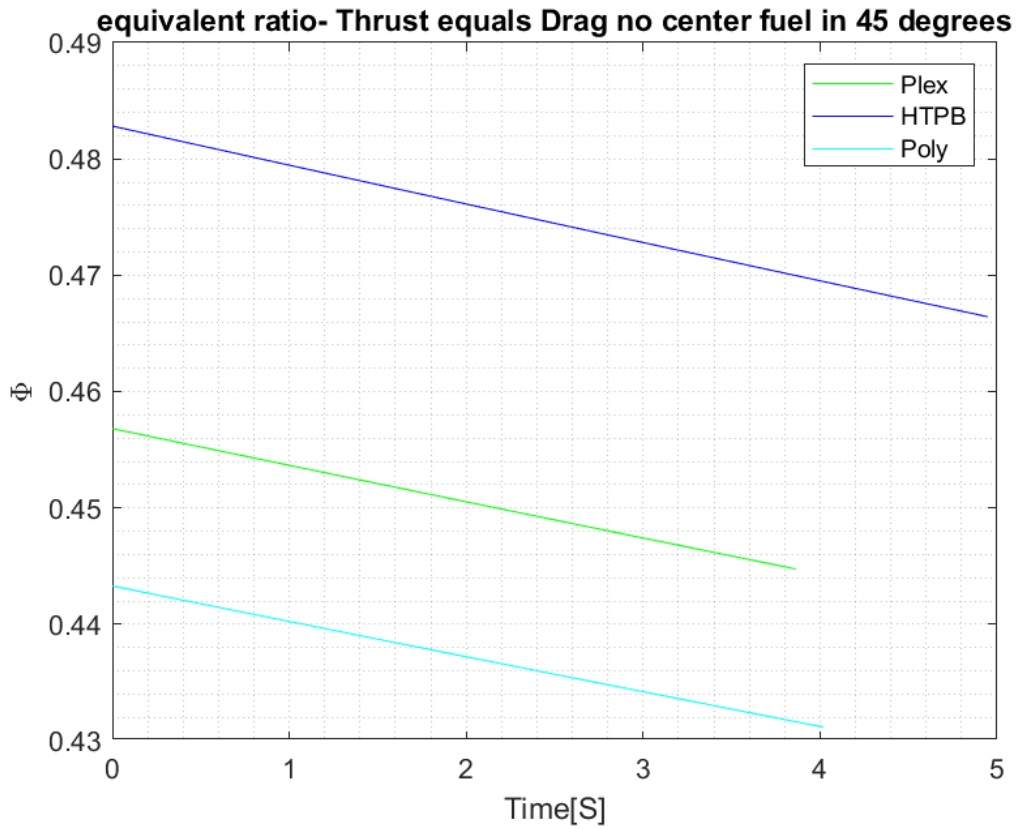
איור 28: השתנות ספיקת הדלק בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

השתנות מסת הקליע בזמן:



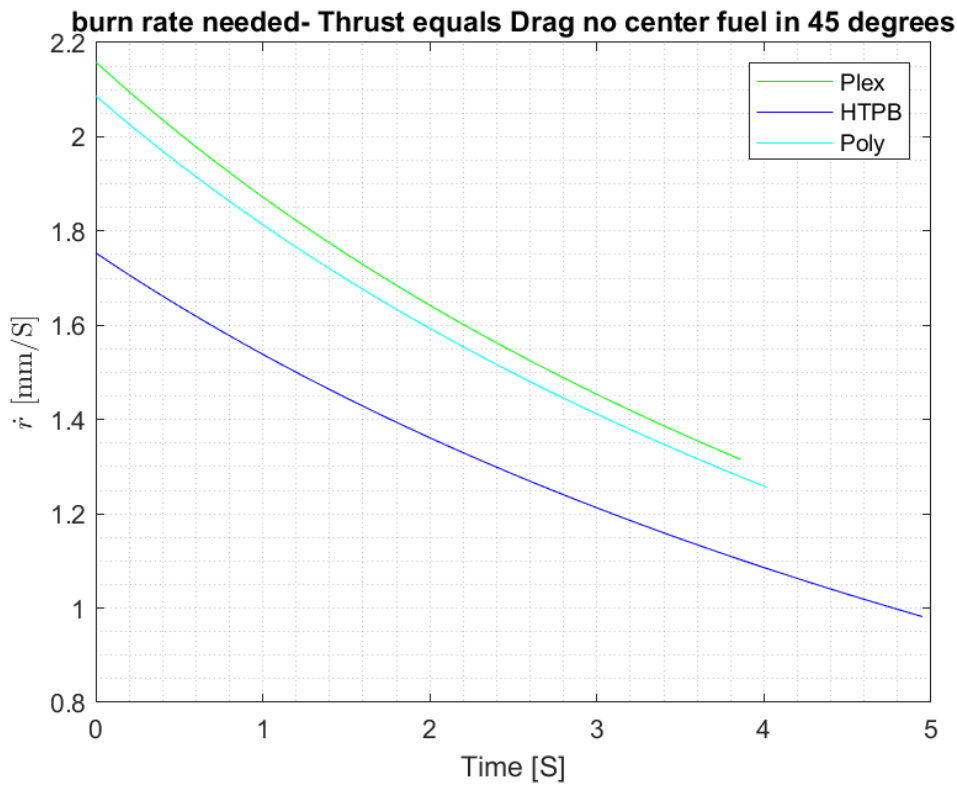
איור 29: השתנות מסת הקליע בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

יחס אקוויולנטי בזמן:

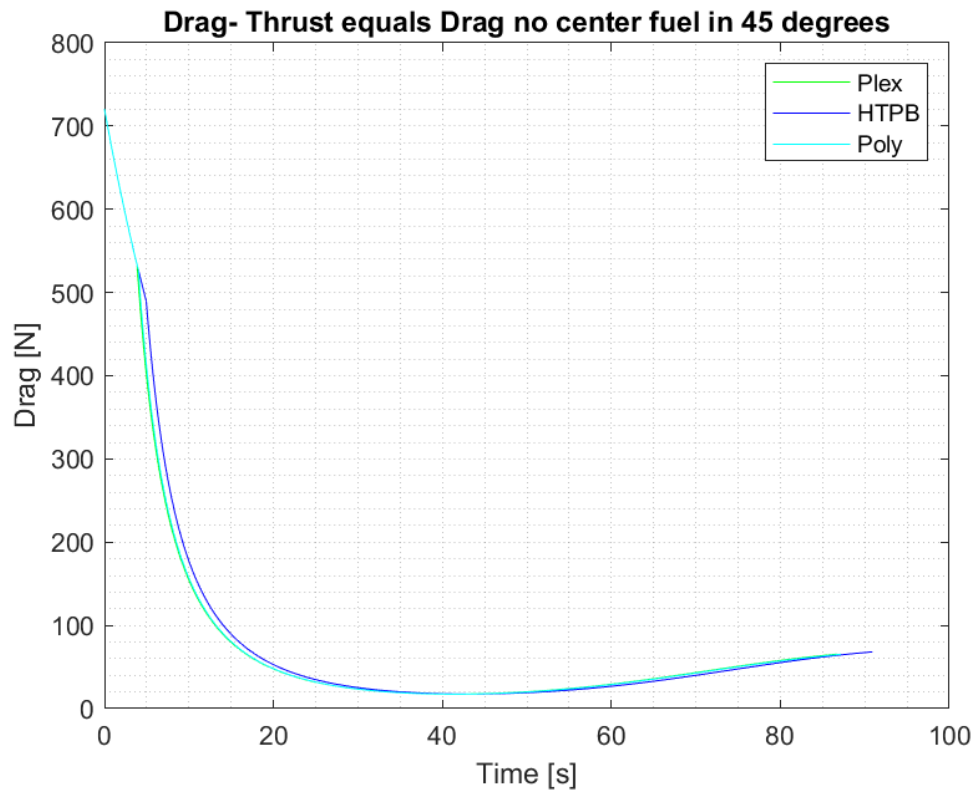


איור 30: התשנות היחס האקוויולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

השתנות קצב הבעירה בזמן:

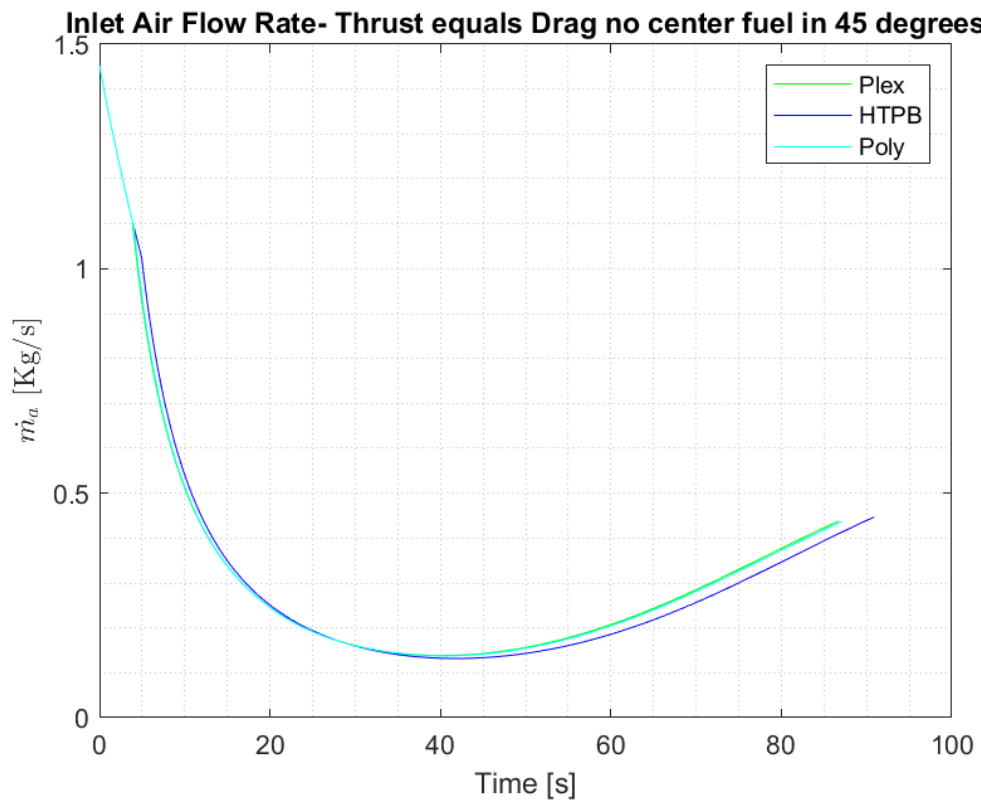


איור 31: השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3



איור 32: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

ספיקה מסית של האוויר:



איור 33: השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.3

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 513.8 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 104.6 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

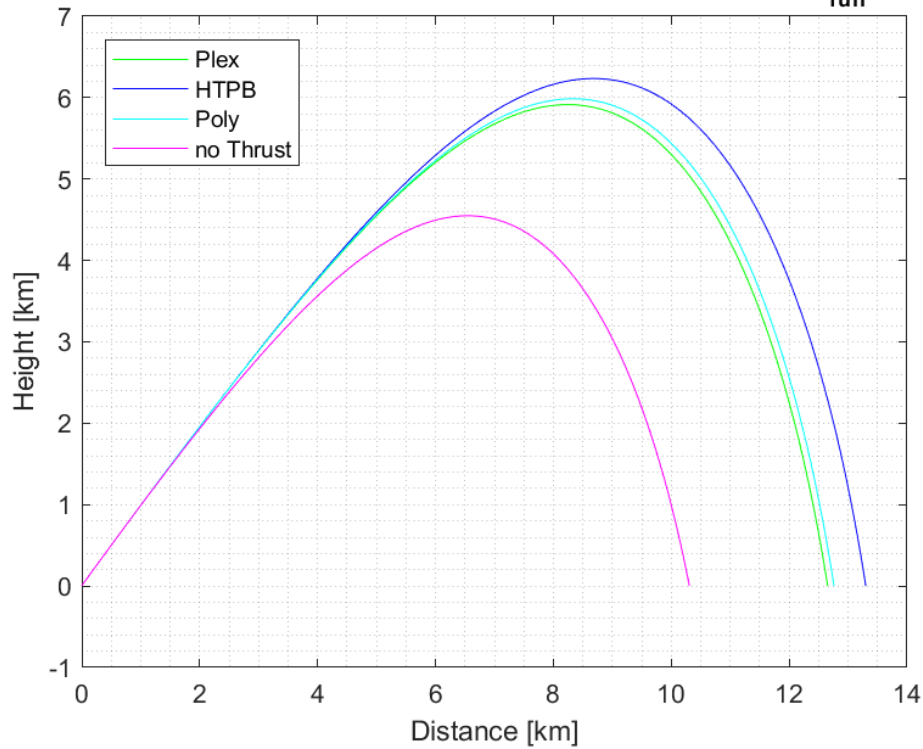
$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 106.8 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 104.5 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$C_d = 0.5 \text{ (2.2)}$$

מסלול הקליע:

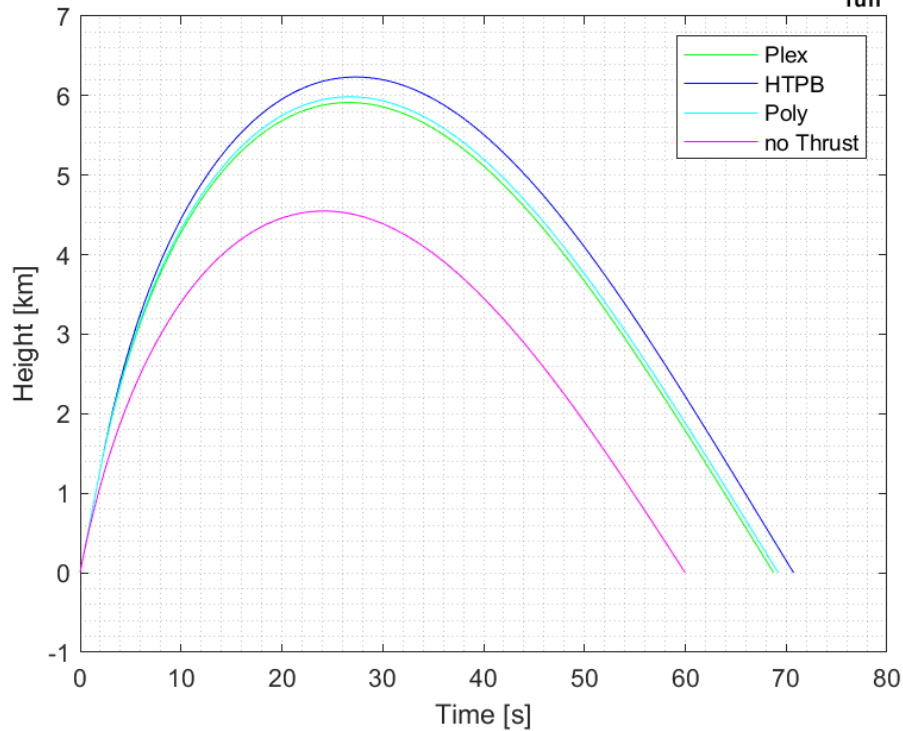
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2[\text{kg}]$



איור 34: מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

גובה כתלות בזמן:

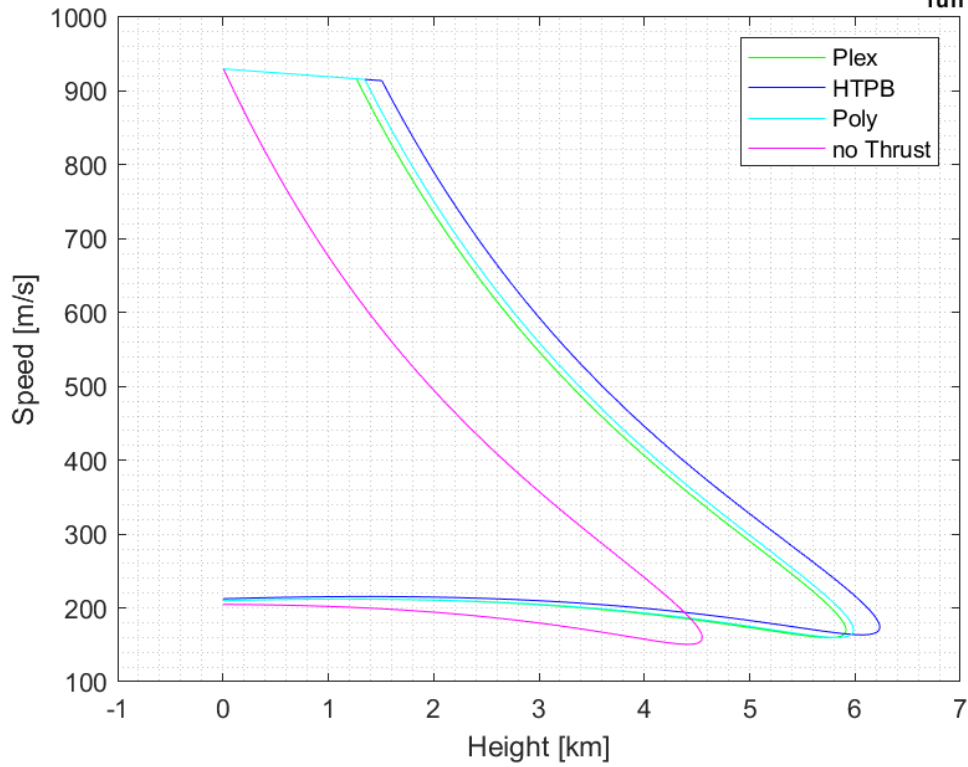
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2[\text{kg}]$



איור 35: גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

מהירות כתלות בגובה:

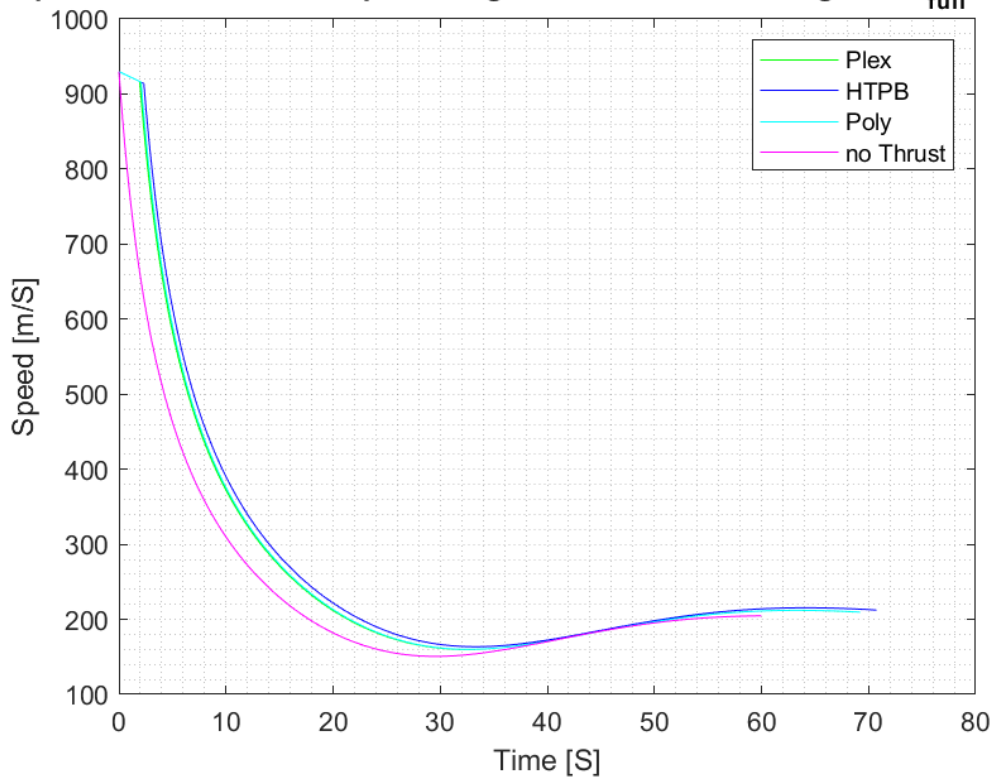
Height VS Speed- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 36: מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור חצי בונס ומקדם גרר 0.5

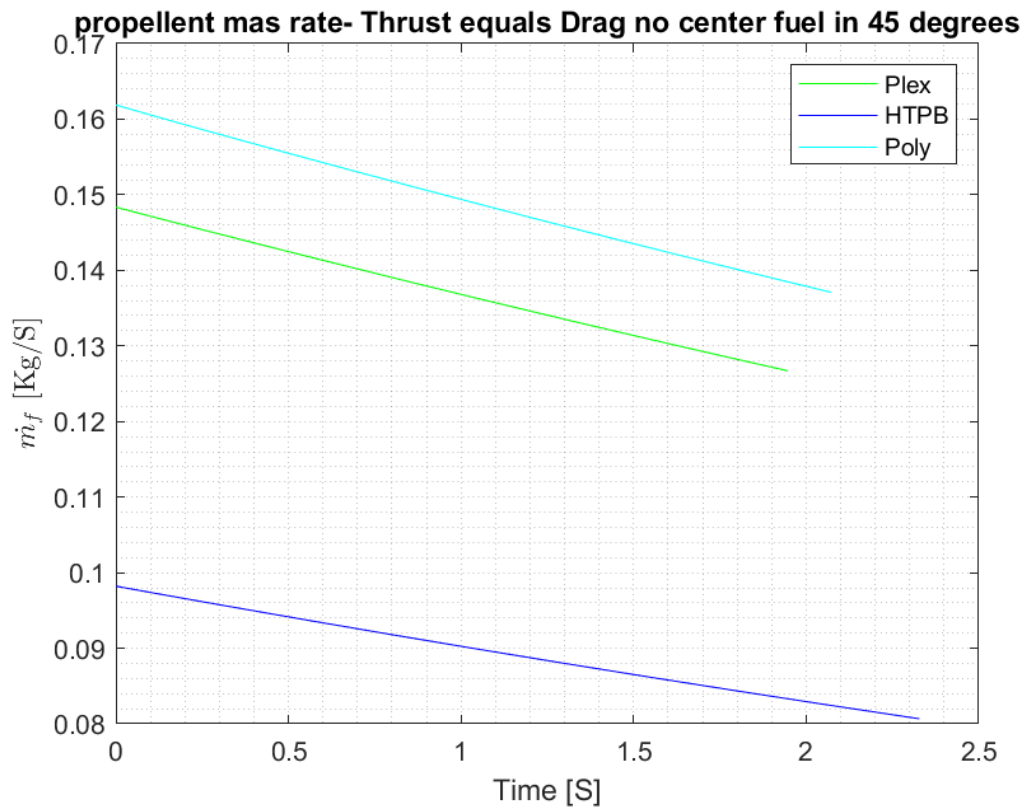
מהירות כתלות בזמן:

Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



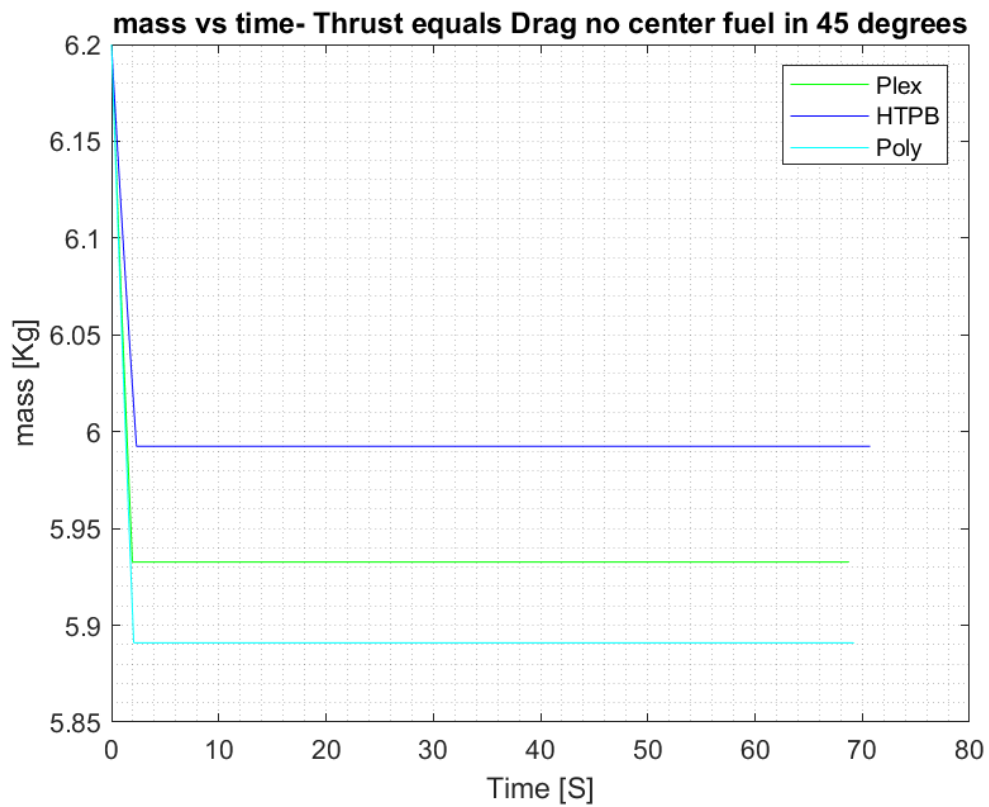
איור 37: מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי בונס ומקדם גרר 0.5

השתנות ספיקת הדלק בזמן:



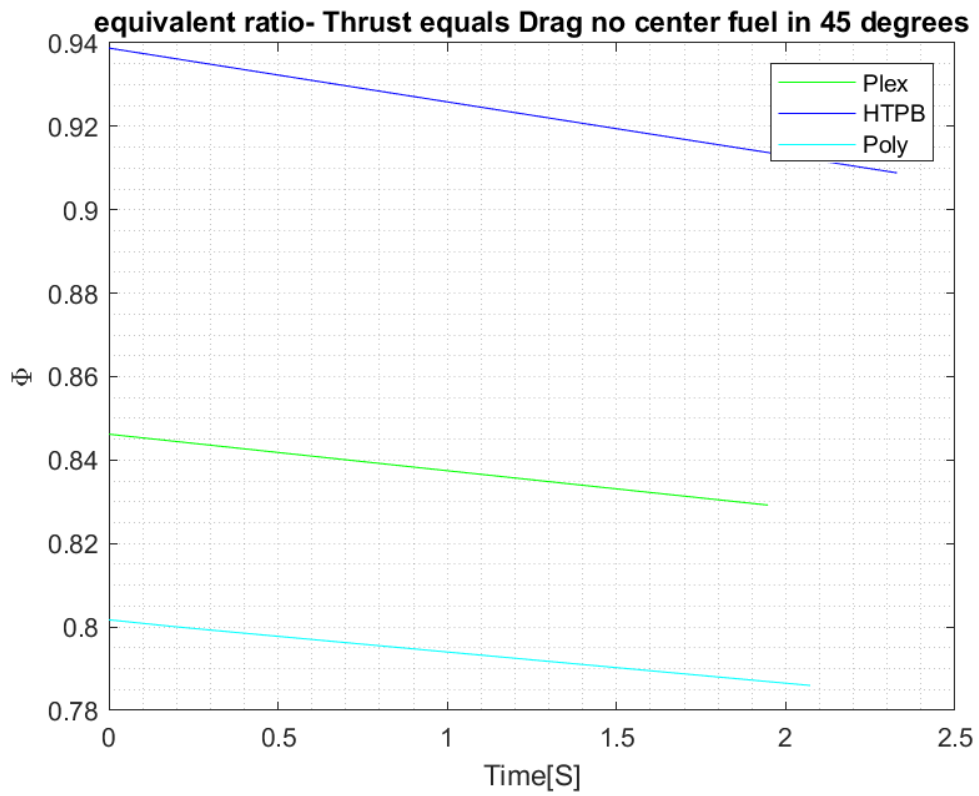
איור 38: השתנות ספיקת הדלק בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

השתנות מסת הקליע בזמן:



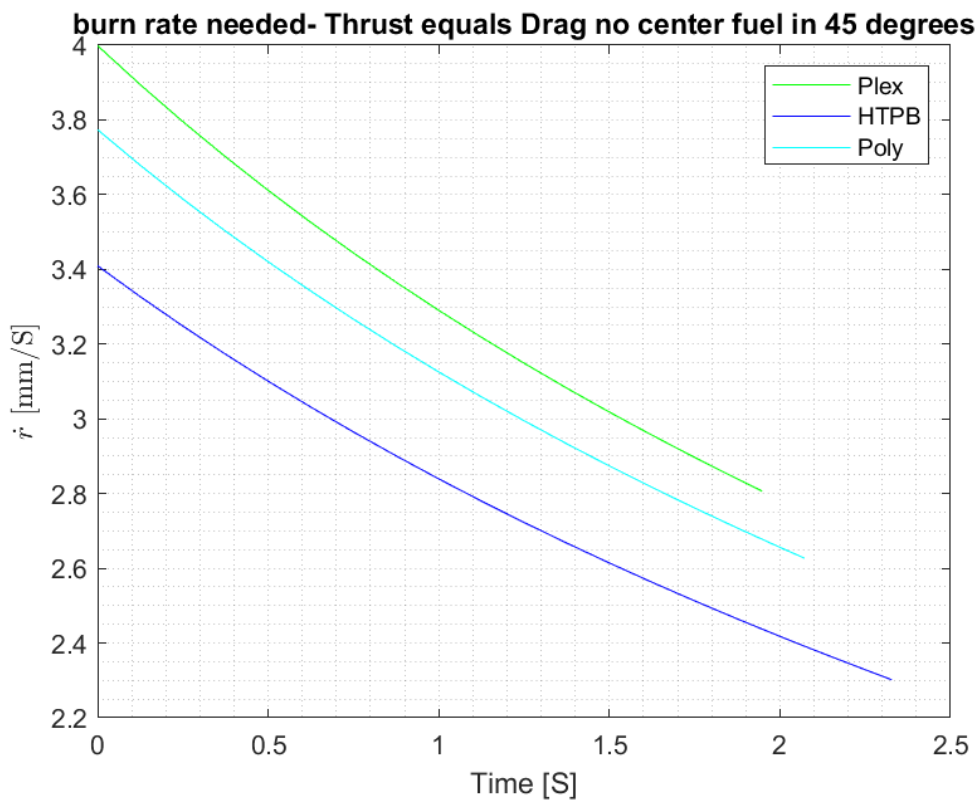
איור 39: השתנות מסת הקליע בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

יחס אקוויוולנטי בזמן:

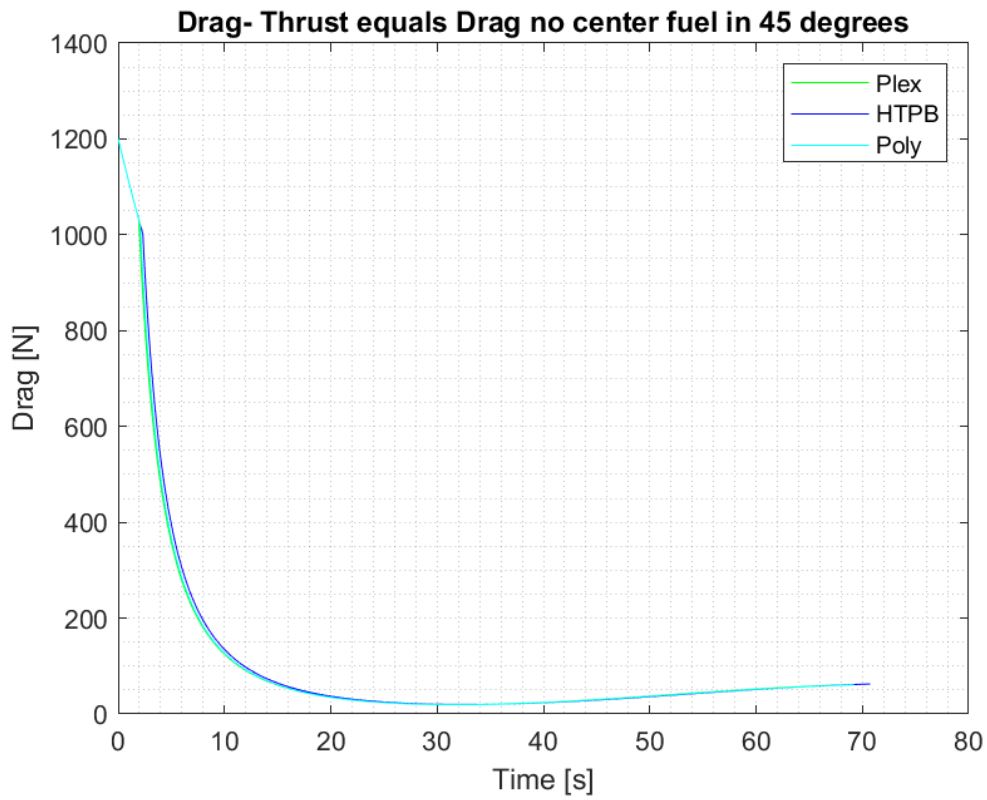


איור 40: השתנות היחס האקוויוולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

השתנות קצב הבעירה בזמן:

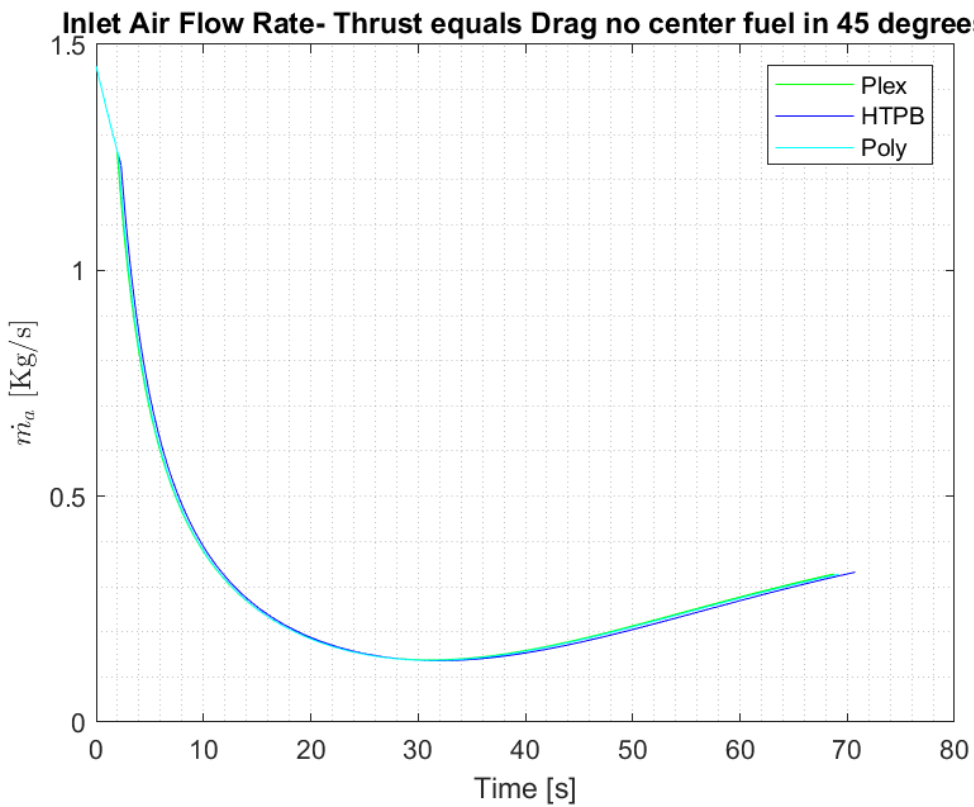


איור 41: השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5



איור 42: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

ספיקה מסית של האוויר:



איור 43: השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור חצי כונס ומקדם גרר 0.5

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 513.8 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 78.37 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 79.3 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

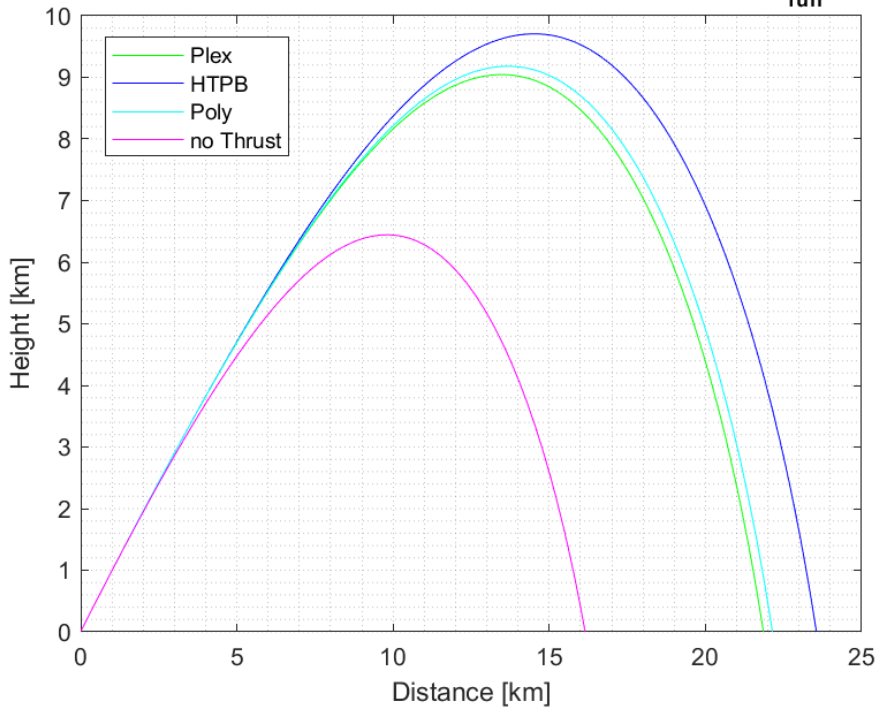
$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 78.27 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

משימה 3- שלישי כונס

$C_d = 0.3$ (3.1)

מסלול הקליע:

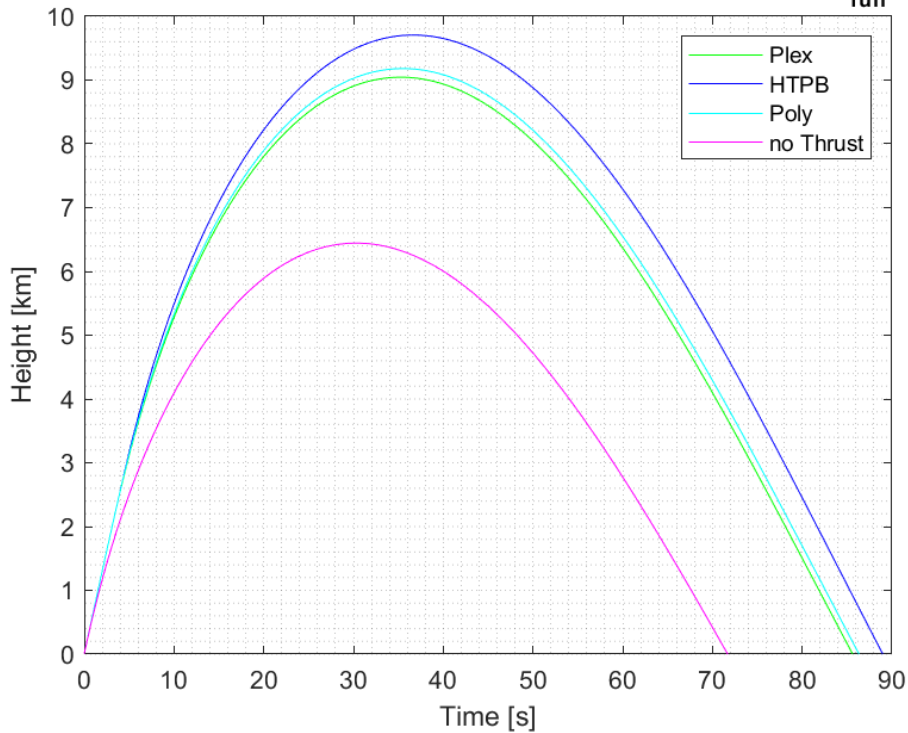
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 44: מסלול הקליע בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

גובה כתלות בזמן:

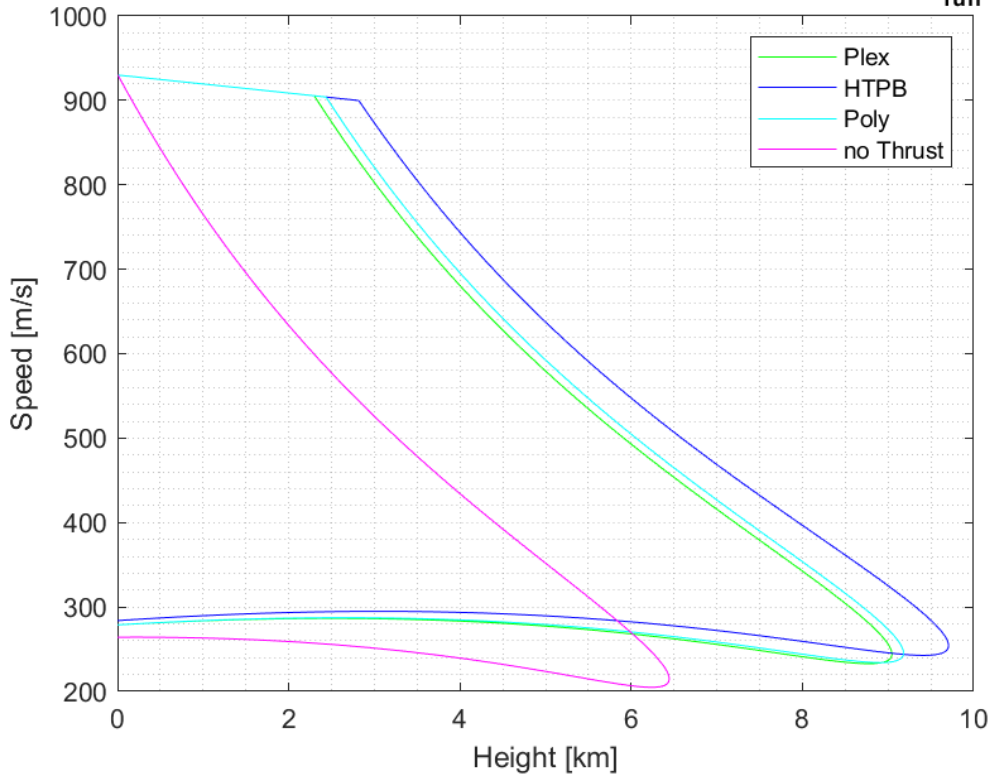
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 45: גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

מהירות כתלות בגובה:

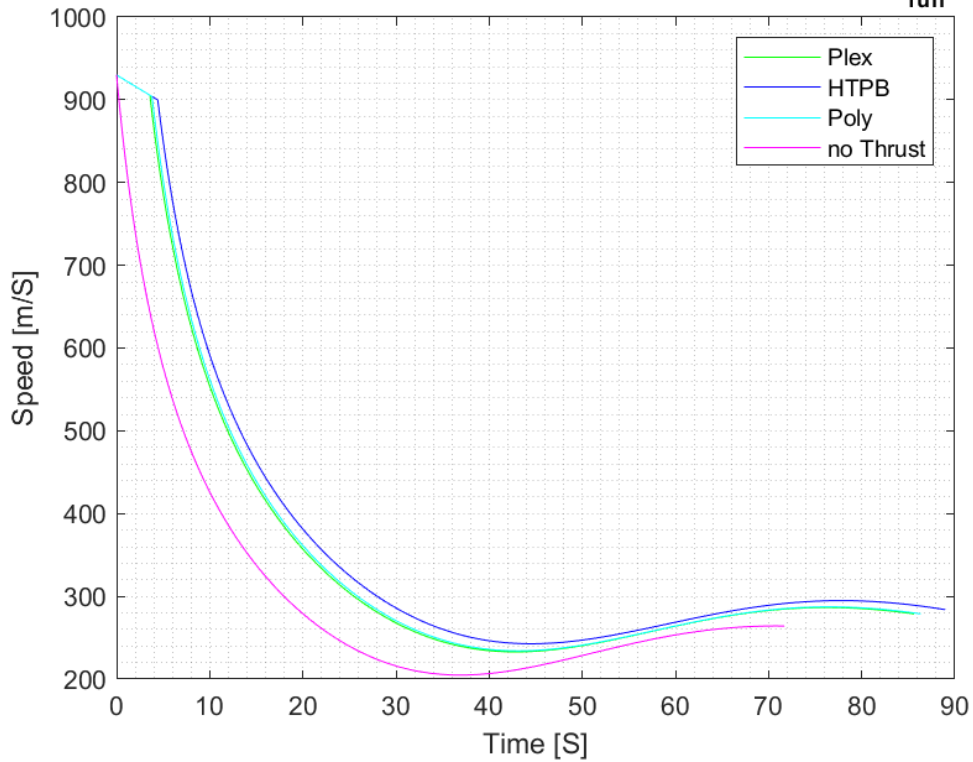
Speed VS Height - Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 46: מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

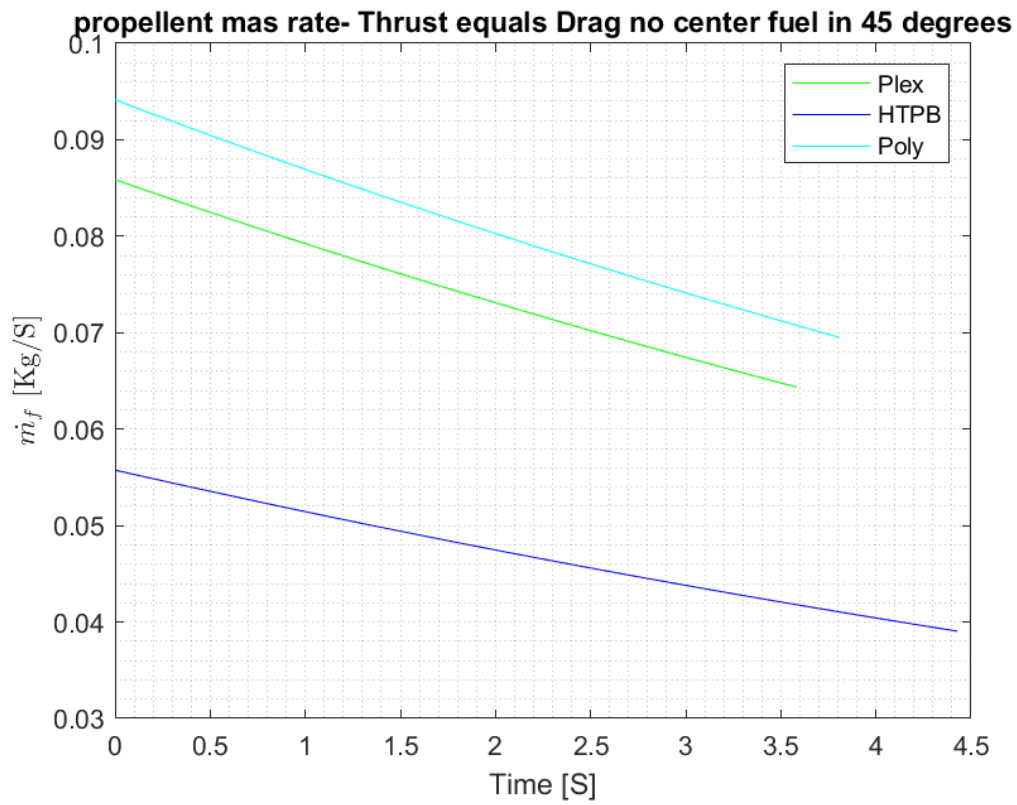
מהירות כתלות בזמן:

Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



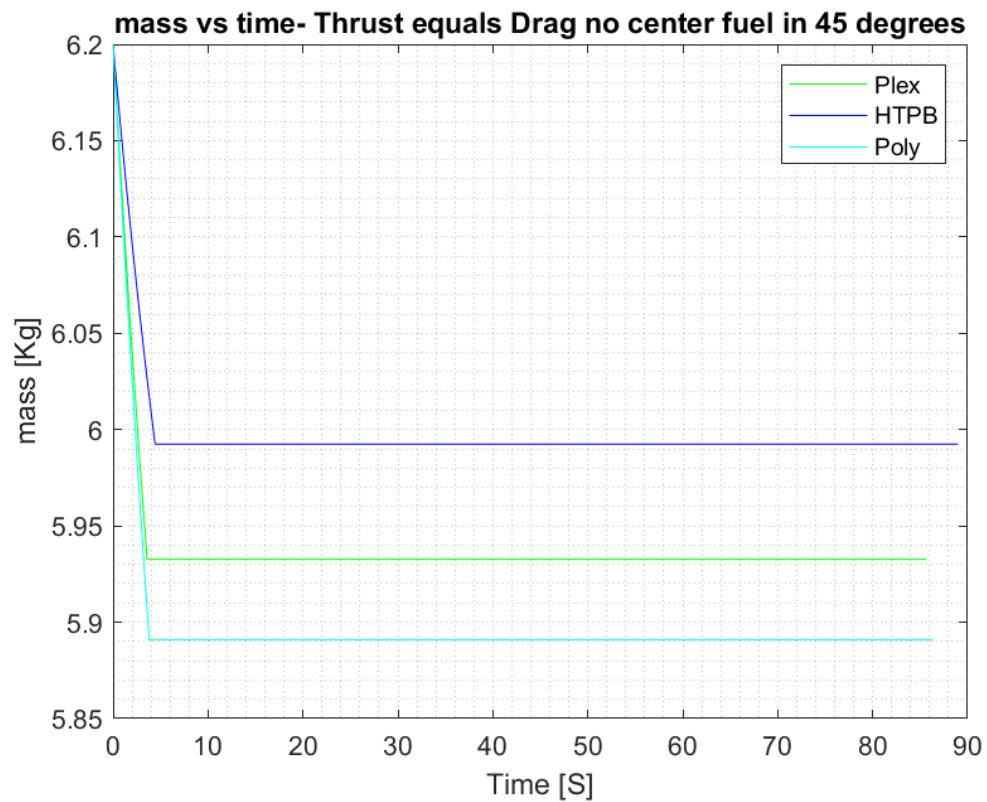
איור 47: מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

השתנות ספיקת הדלק בזמן:

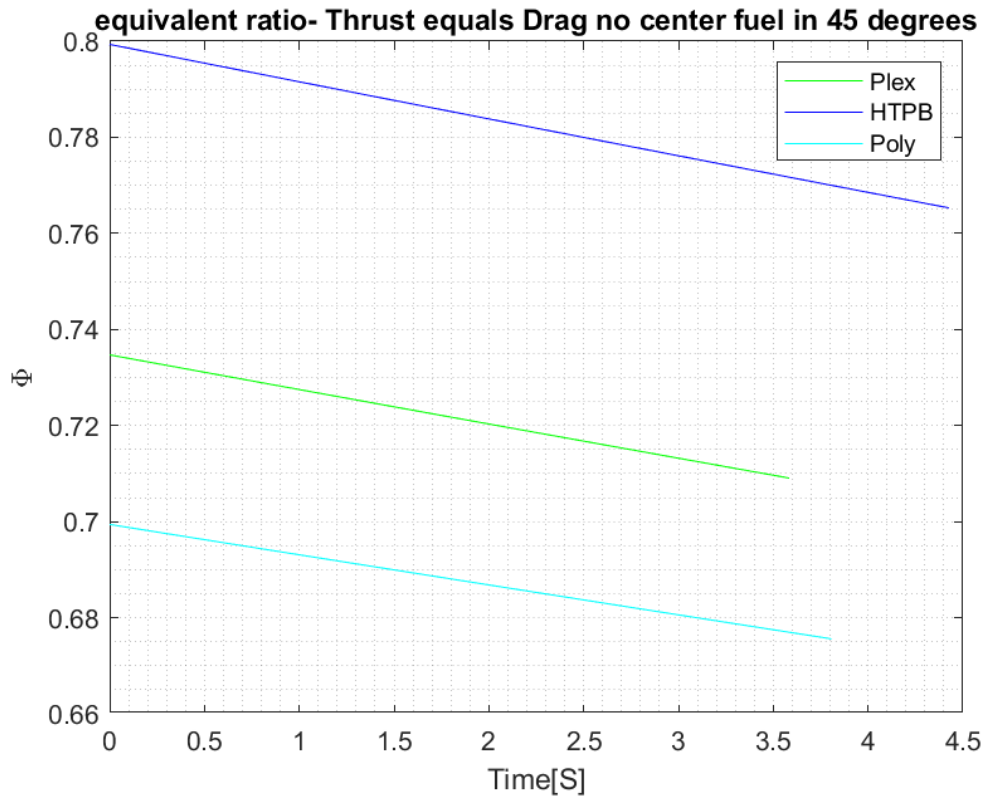


איור 48: השתנות ספיקת הדלק בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי בונס ומקדם גרר 0.3

השתנות מסת הקליע בזמן:

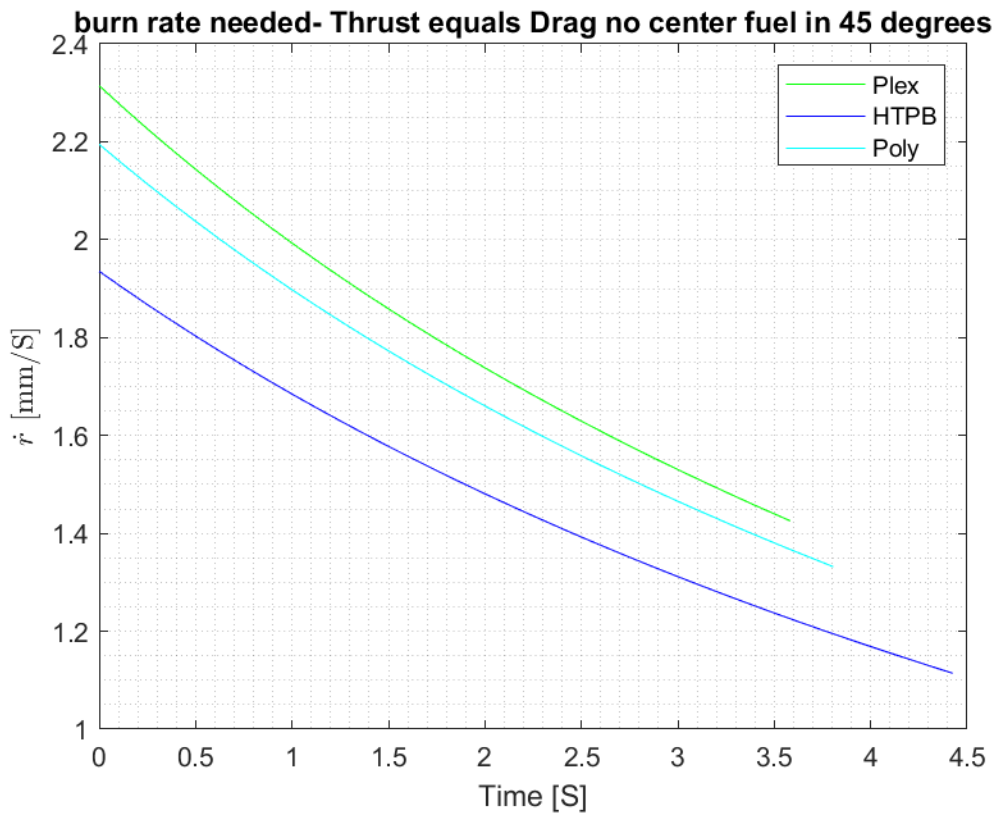


איור 49: השתנות מסת הקליע בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי בונס ומקדם גרר 0.3

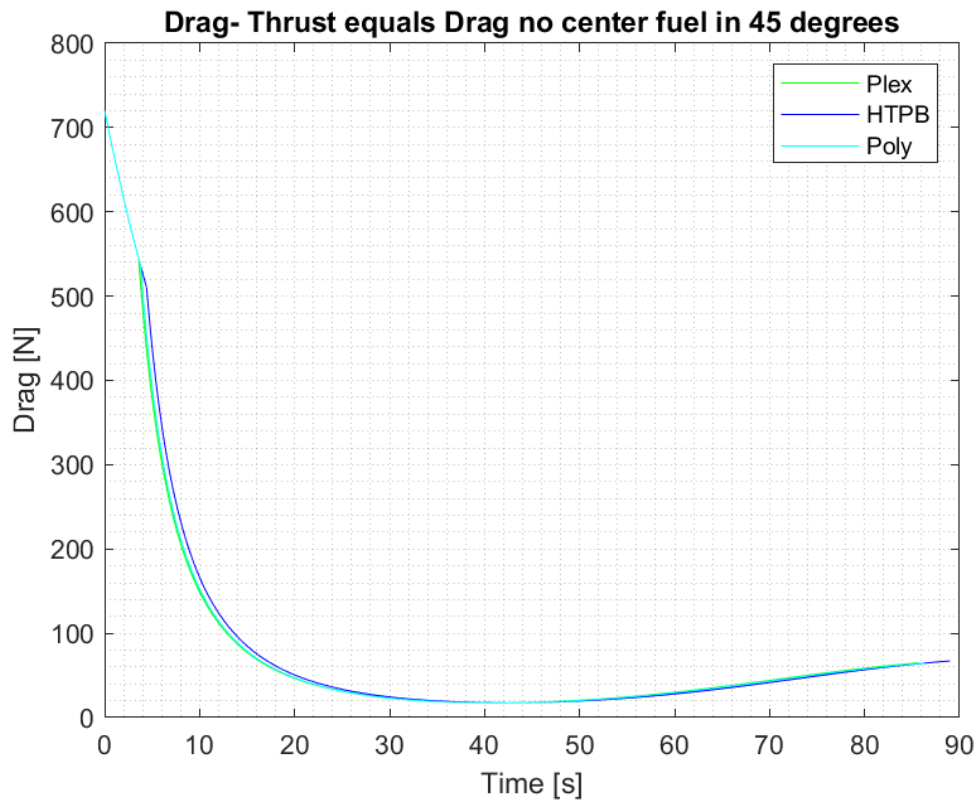


איור 50: השתנות היחס האקוויולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שליש כונס ומקדם גר 0.3

השתנות קצב הבעירה בזמן:

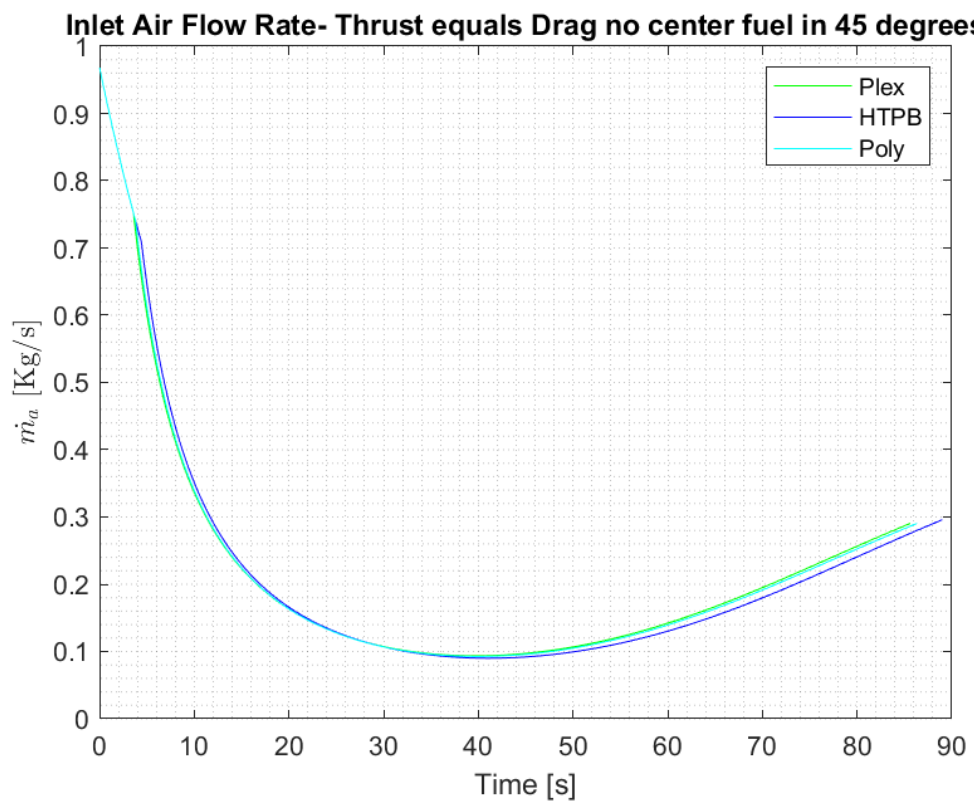


איור 51: השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שליש כונס ומקדם גר 0.3



איור 52: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

ספיקה מסית של האוויר:



איור 53: השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.3

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 342.56 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 69.4 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

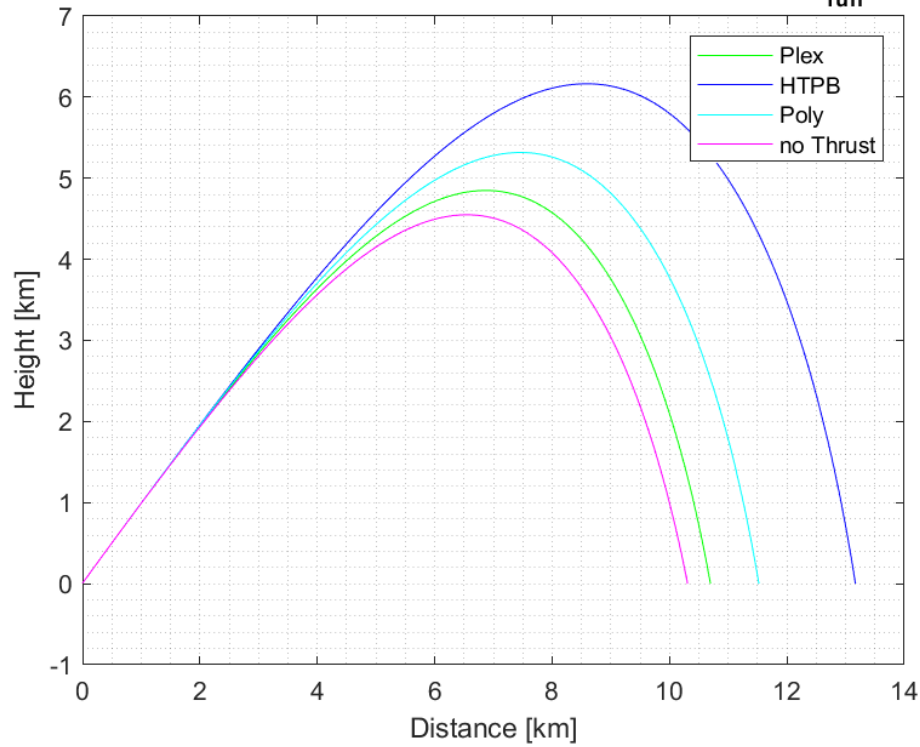
$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 70.7 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 69.4 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$C_d = 0.5 \quad (3.2)$$

מסלול הקליע:

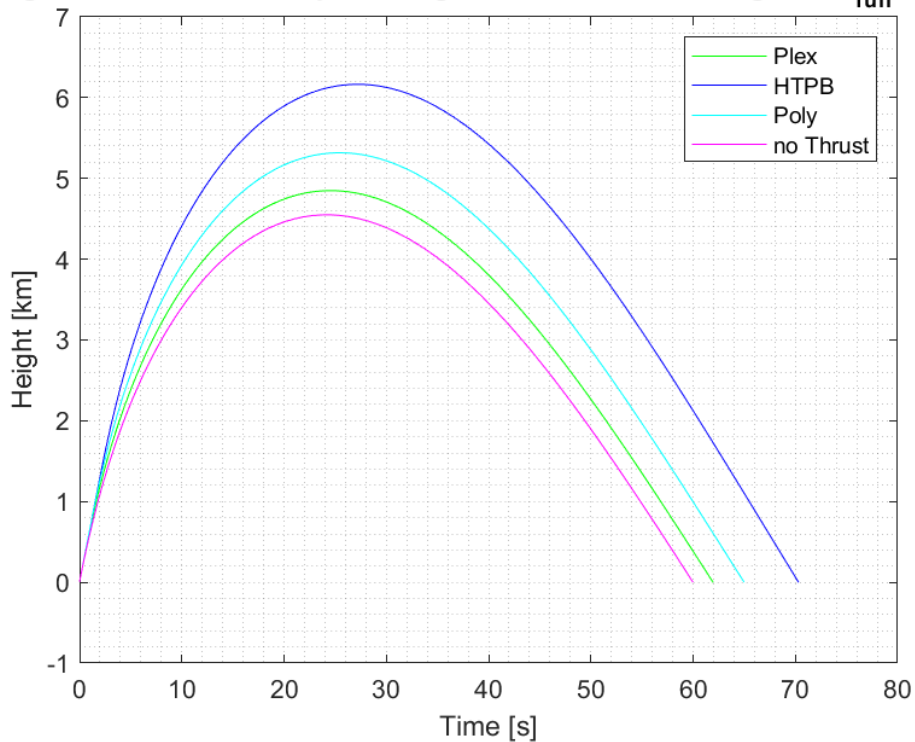
Trajectory- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 54: מסלול הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

גובה כתלות בזמן:

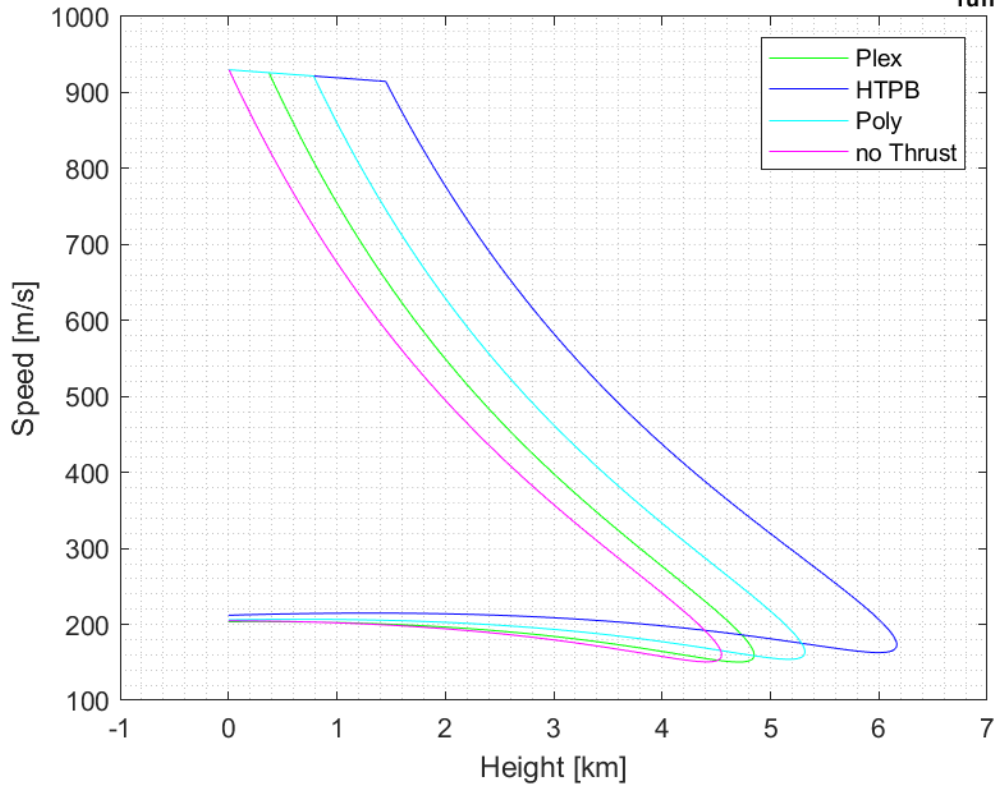
Height VS Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2$ [kg]



איור 55: גובה הקליע כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

מהירות כתלות בגובה:

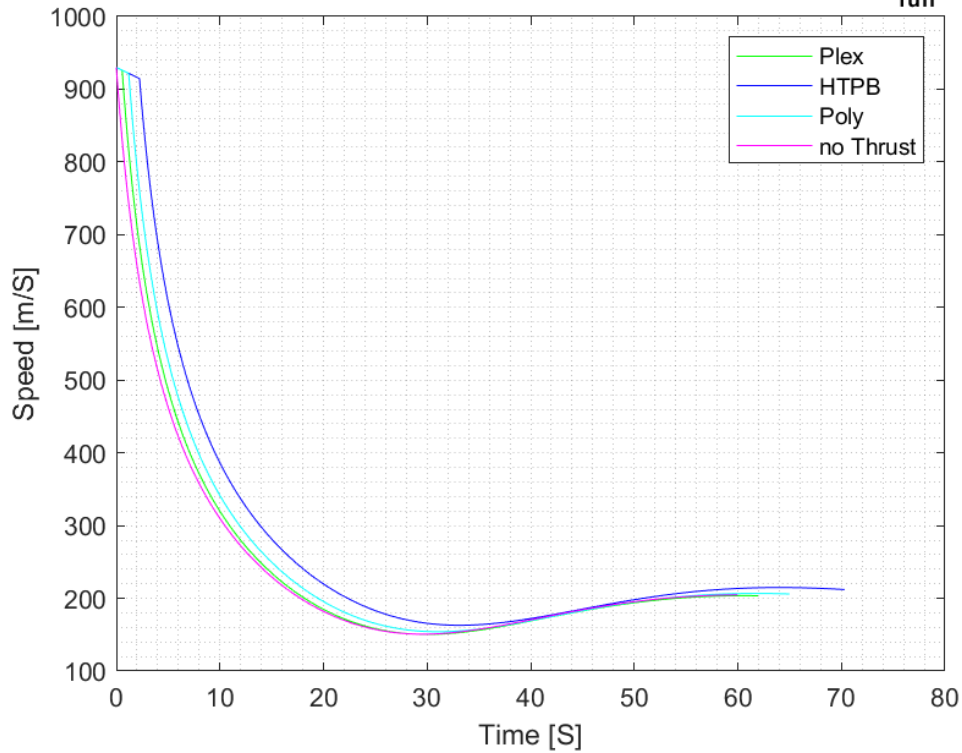
Speed VS Height - Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2[kg]$



איור 56: מהירות כתלות בגובה בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

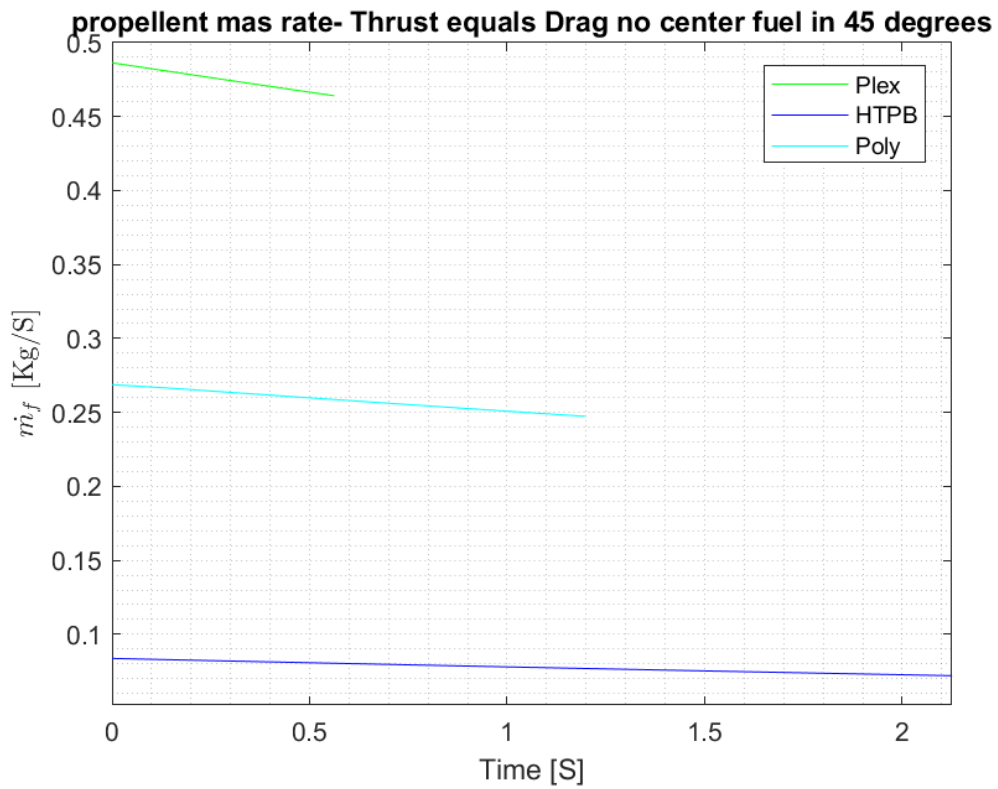
מהירות כתלות בזמן:

Speed Vs Time- Thrust equals Drag no center fuel in 45 degrees $m_{full}=6.2[kg]$



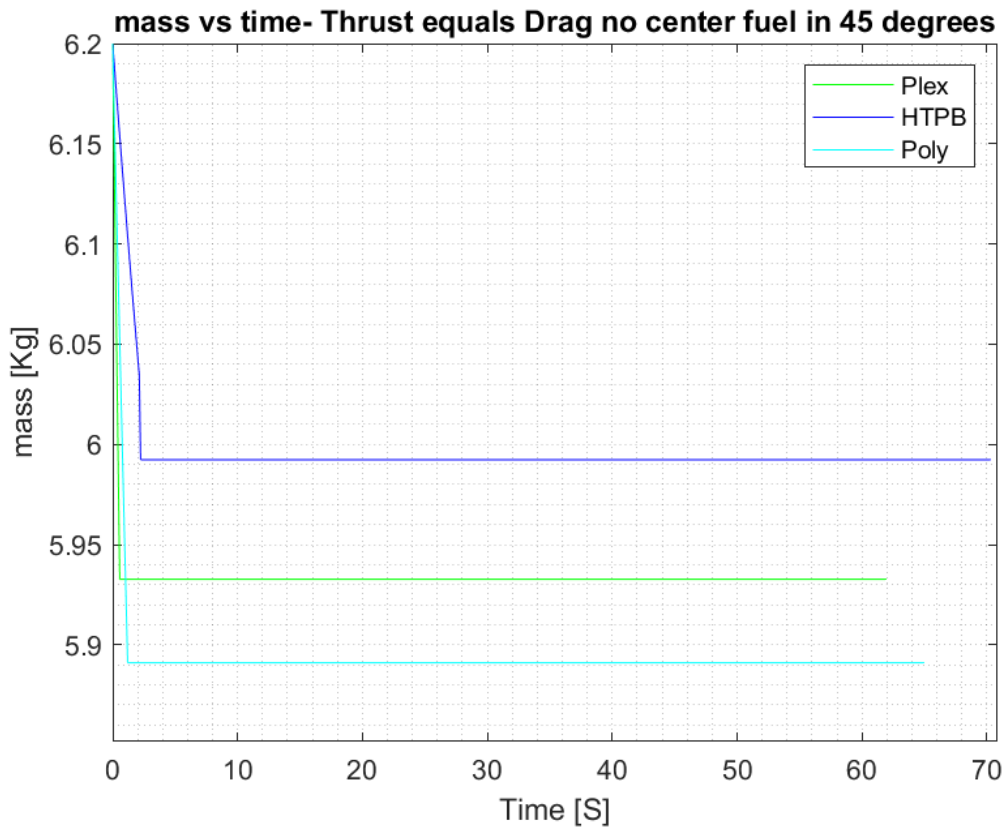
איור 57: מהירות כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

השתנות ספיקת הדלק בזמן:



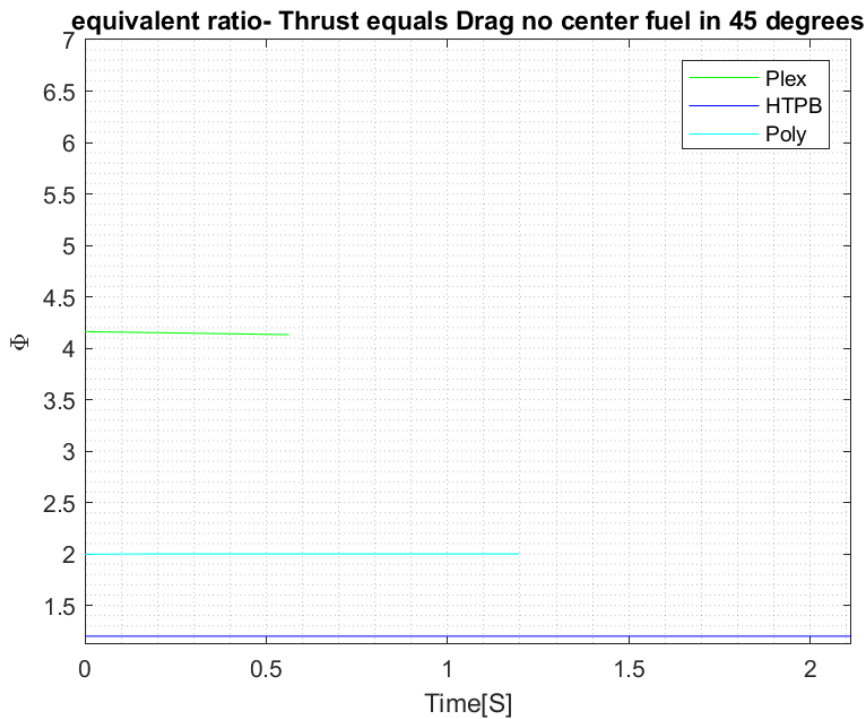
איור 58: השתנות ספיקת הדלק בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי בונס ומקדם גרר 0.5

השתנות מסת הקליע בזמן:



איור 59: השתנות מסת הקליע בתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי בונס ומקדם גרר 0.5

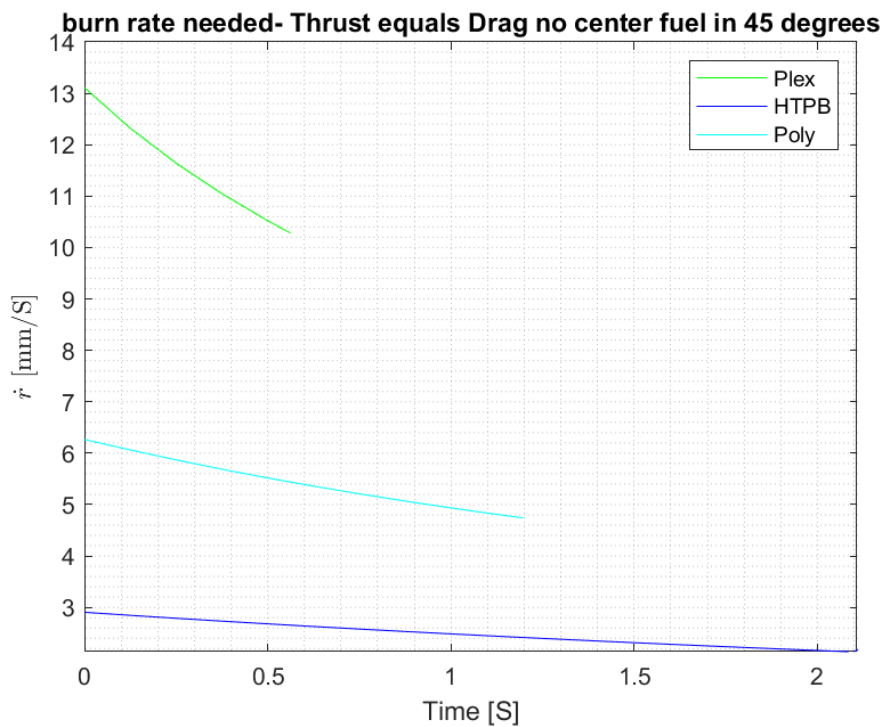
יחס אקוויולנטי בזמן:



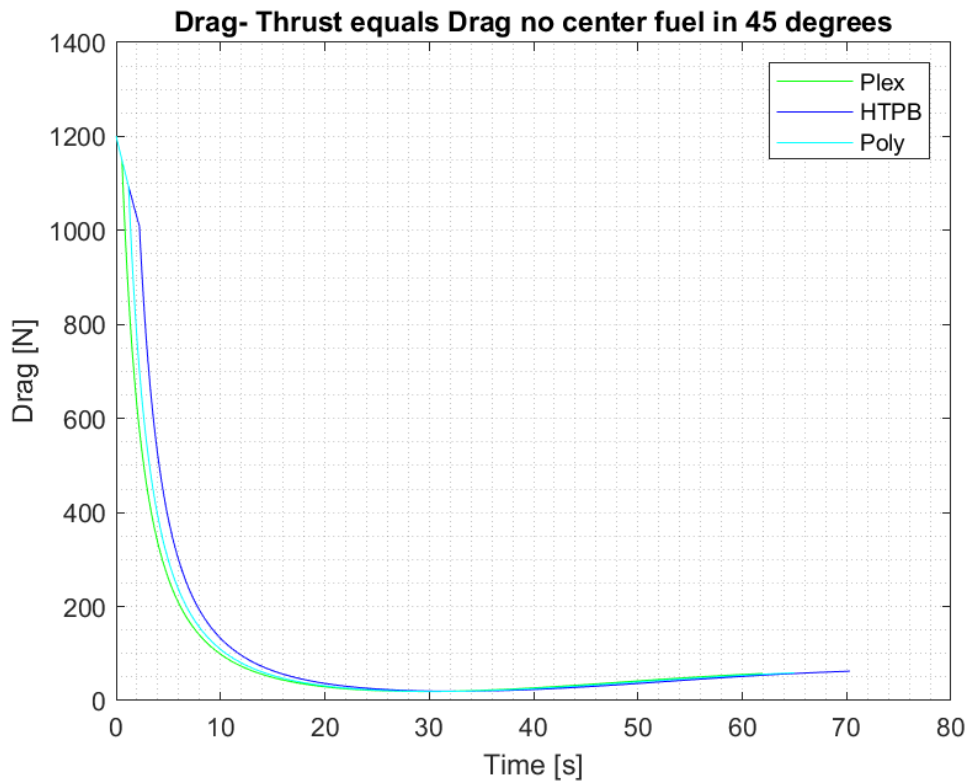
איור 60: השתנות היחס האקוויולנטי כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שליש כונס ומקדם גר 0.5

על פי הגרף ניתן להסיק כי התוצאות אינן ריאליות ולא ניתן להשיג דחף = גר בכונס כל כך קטן בעל מקדם גר גדול.

השתנות קצב הבעירה בזמן:

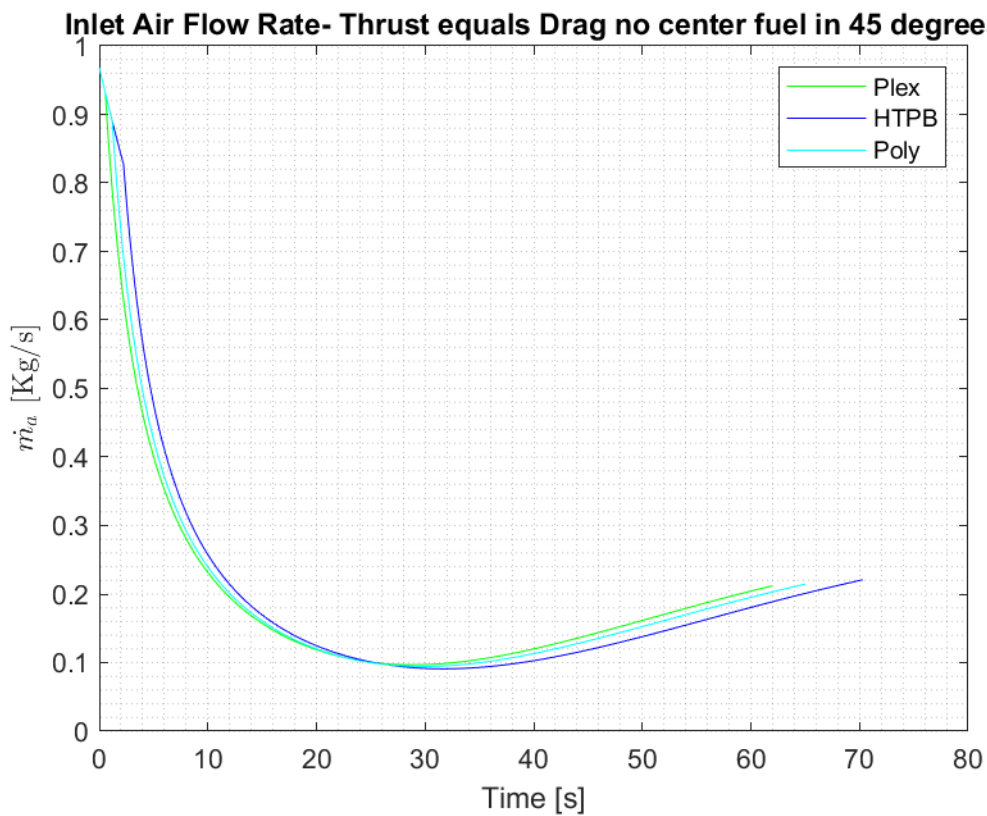


איור 61: השתנות קצב הבעירה כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שליש כונס ומקדם גר 0.5



איור 62: דחף=גרר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

ספיקה מסית של האוויר:



איור 63: השתנות ספיקת האוויר כתלות בזמן בשיגור של 45 מעלות עבור שלישי כונס ומקדם גרר 0.5

חישוב שטף מסי התחלתי וסופי:

לאחר חישוב ספיקת המסה נחשב את השטף המסי ההתחלתי בתא השריפה:
בהתחלה הערך המתקבל שווה עבור כל סוגי הדלקים:

$$\frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{initial} = 342.56 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

הערך הסופי המתקבל הוא:

$$\text{for Plexiglass: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 50.66 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for HTPB: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 52.78 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{for Polyester: } \frac{\dot{m}_a}{A_{CH}}|_{final} = 51.27 \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

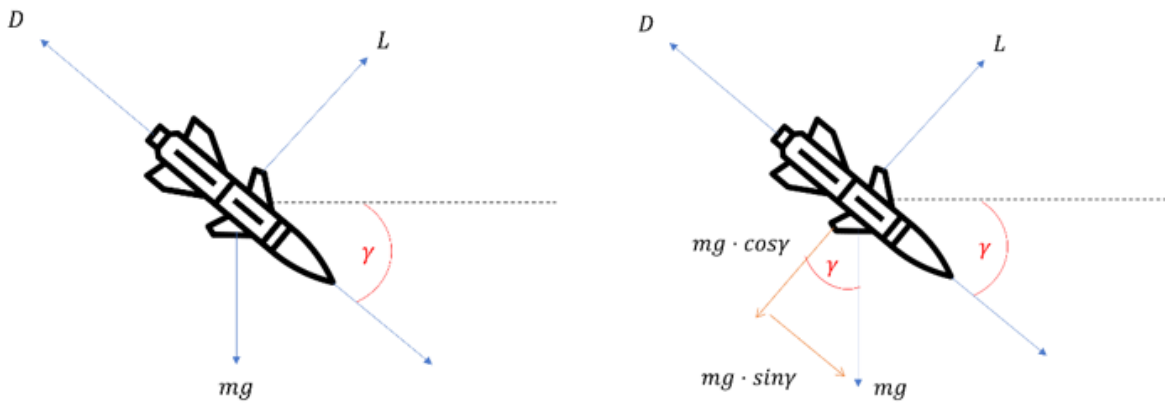
גלישה

בפרק זה נרצה לבדוק מספר אפשרויות לגלישה. מטרת הגלישה היא כמובן הארכת טווח הקליע. פרק זה יחולק לשני חלקים כאשר בכל פרק תיבחן גלישה באופן אחר. פירוט נוסף על החישובים ניתן בכל אחד מהחלקים של פרק זה.

גלישה- חלק 1

בחלק זה נרצה לבדוק מסלול גלישה אשר מתחיל מנקודה בה המהירות מאפשרת לנו את יחס הגלישה הרצוי.

דג"ח:



איור 64: דג"ח על קליע

משוואות התנועה:

$$\hat{x}: D = mg \cdot \sin \gamma$$

$$\hat{y}: L = mg \cdot \cos \gamma$$

↓

$$\tan(\gamma) = \frac{D}{L}$$

נרצה למצוא את המהירות המקיימת את הקשר הבא:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 s C_D = mg \cdot \sin(\arctan(\gamma))$$

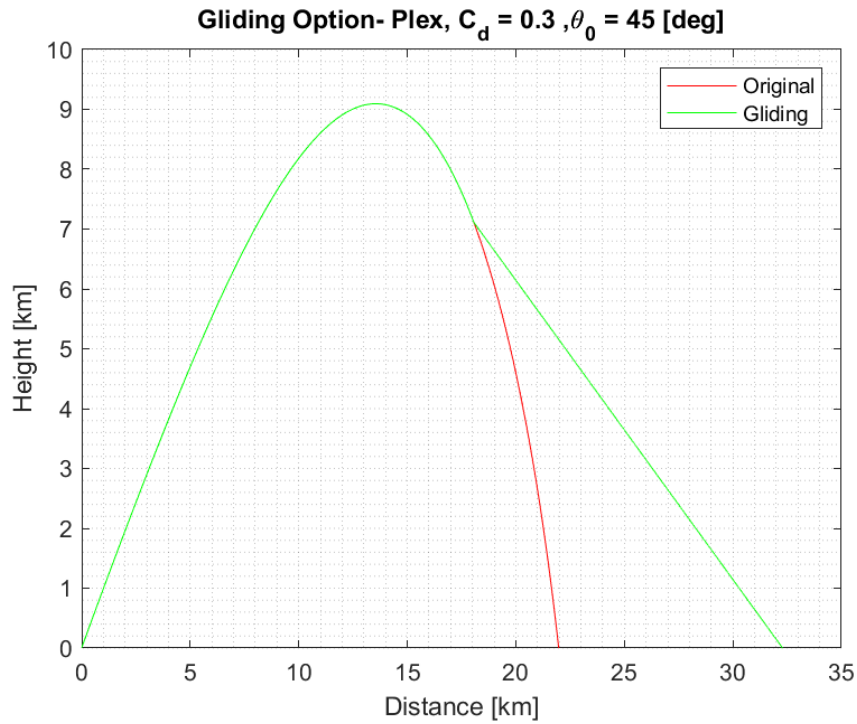
נמצא את הגובה המתאים למהירות שנמצאה וממנו ניצור מסלול גלישה ביחס L/D הנבחר.

חלק זה יתחלק ל-6 מקרים כפי שראינו בפרק הקודם של הפרויקט:

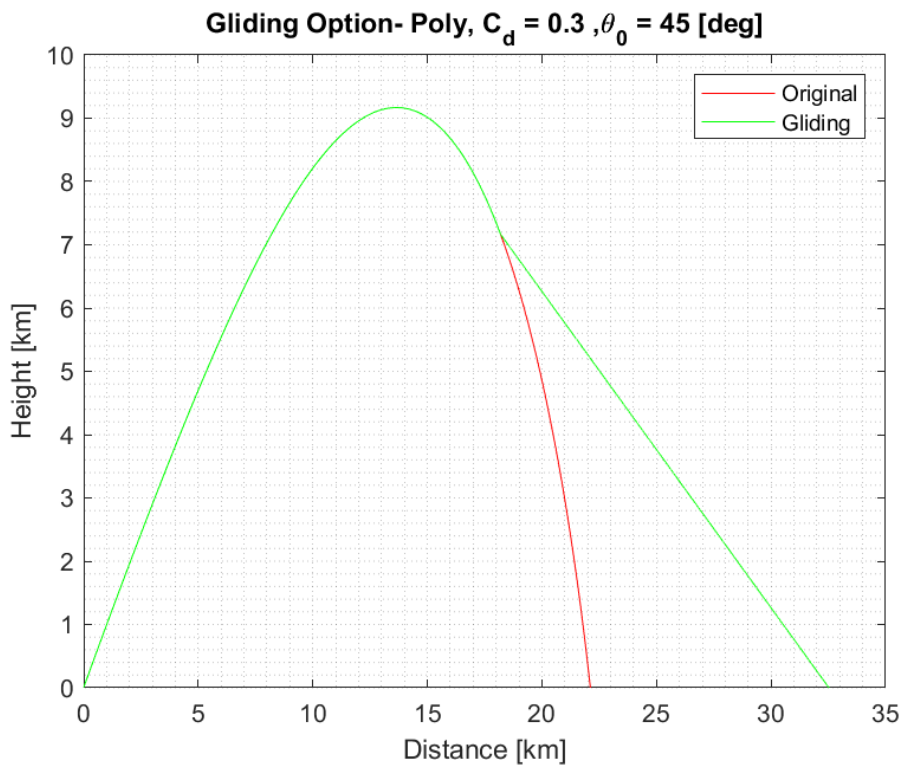
- כונס מלא- מקדם גרר 0.3/0.5
- חצי כונס- מקדם גרר 0.3/0.5
- שלישי כונס- מקדם גרר 0.3/0.5

עבור כל מקרה יוצגו שלושה גרפים- אחד עבור כל דלק. בנוסף, כלל הגרפים המוצגים עבור כל המקרים הנ"ל מציגים יחס גלישה 2.

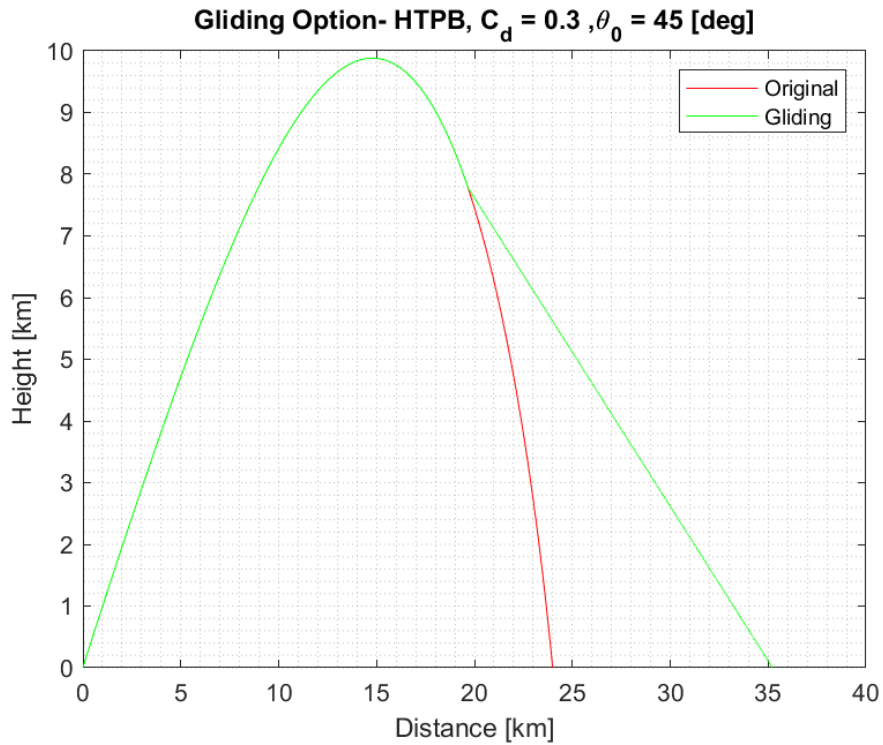
כונס מלא- $\frac{L}{D} = 2$, $C_d = 0.3$



איור 65: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex



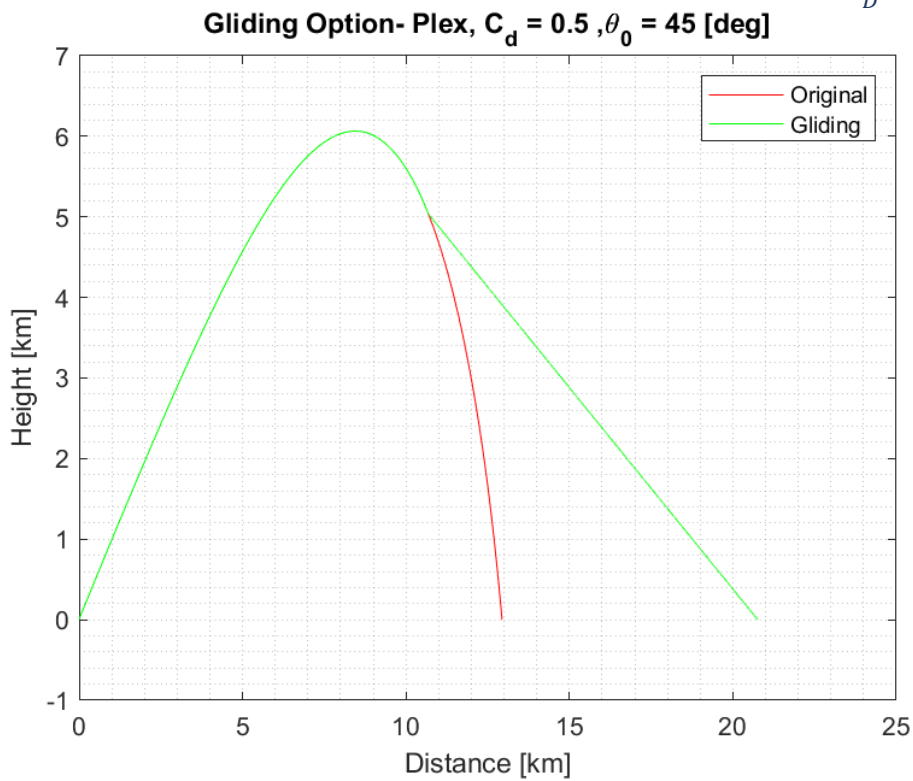
איור 66: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly



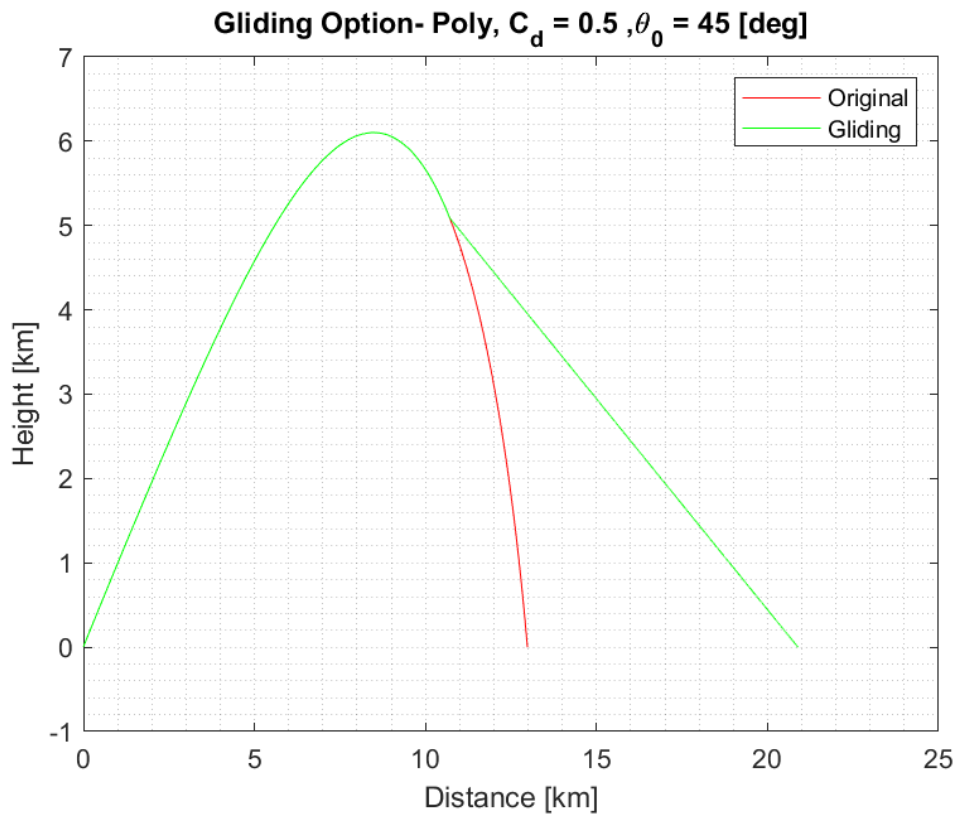
איור 67: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB

ניתן לראות כי בתנאים הנ"ל HTPB מניב את הטווח הגדול ביותר (35 ק"מ לעומת 32 ק"מ בשני הדלקים האחרים).

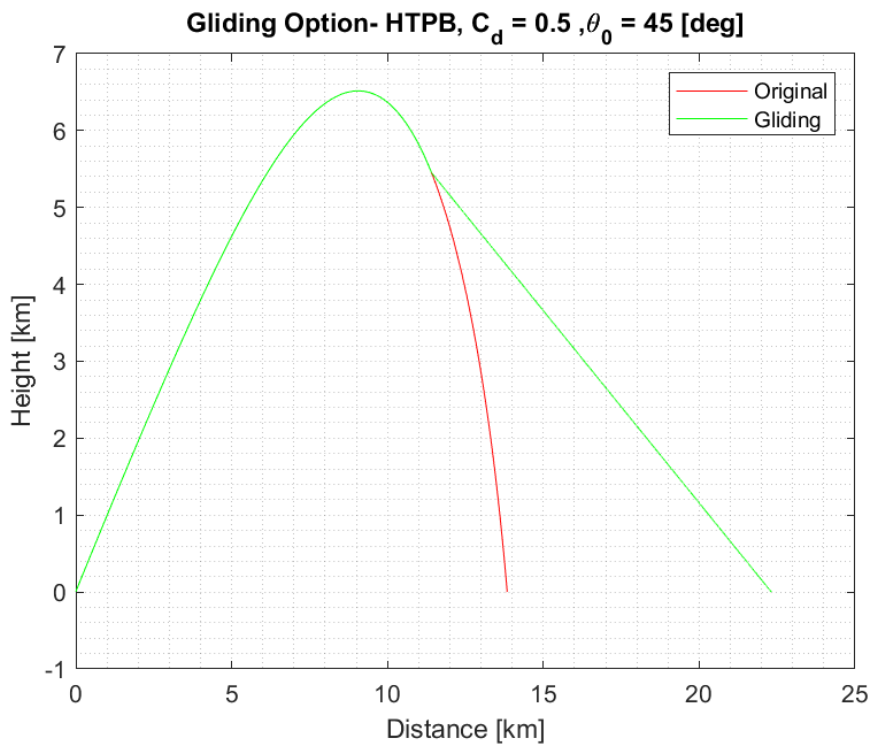
כונס מלא- $C_d = 0.5, \frac{L}{D} = 2$



איור 68: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex

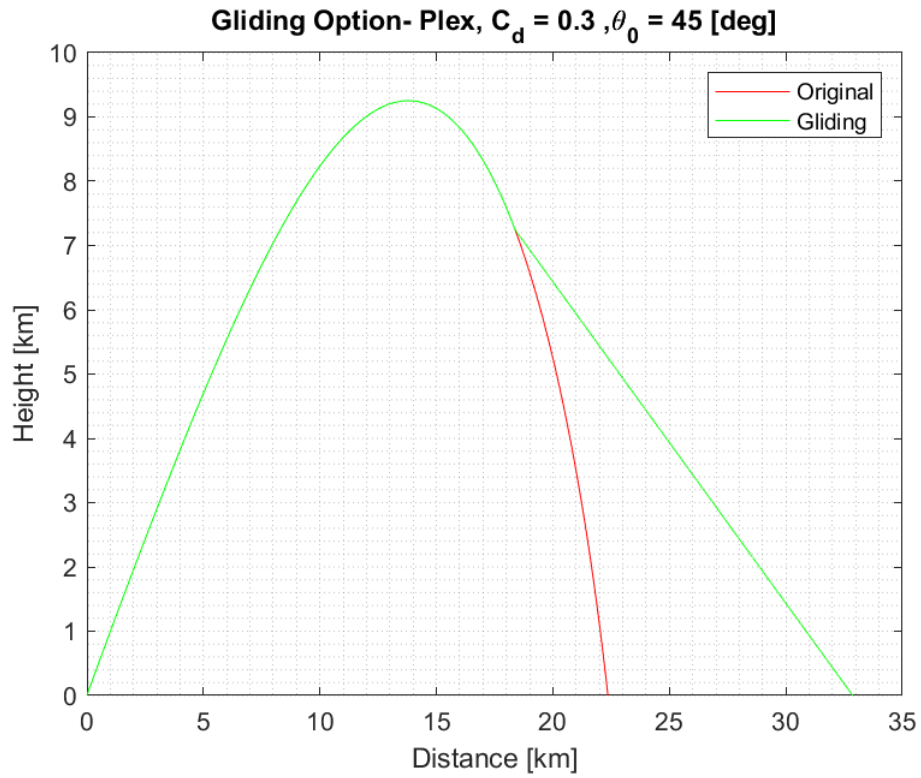


איור 69: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly

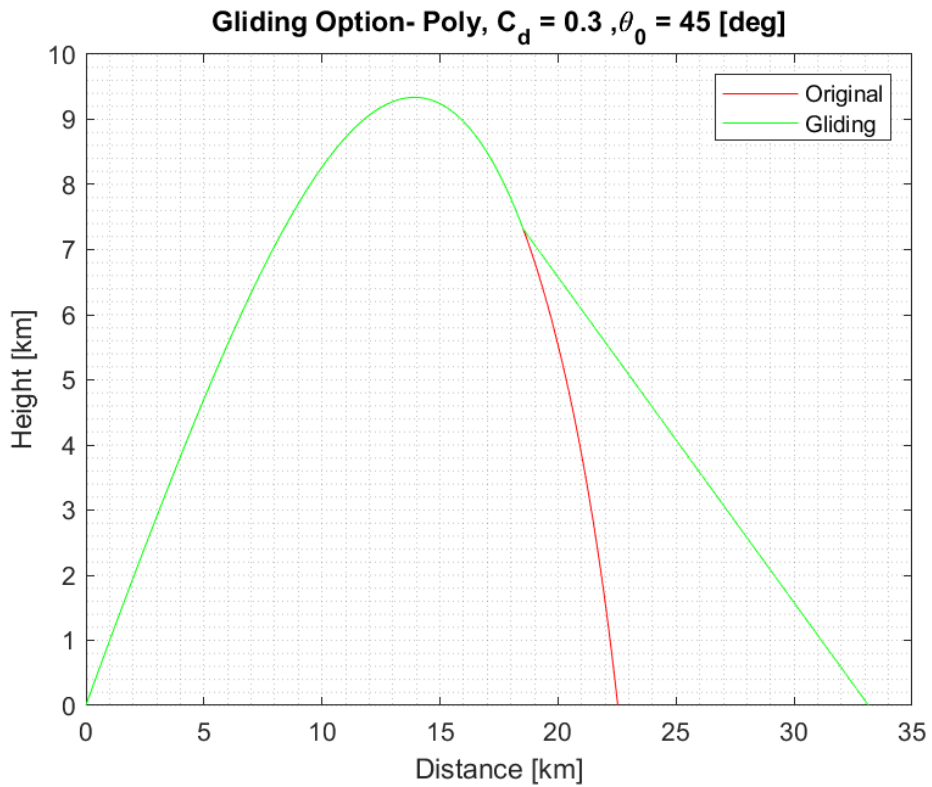


איור 70: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

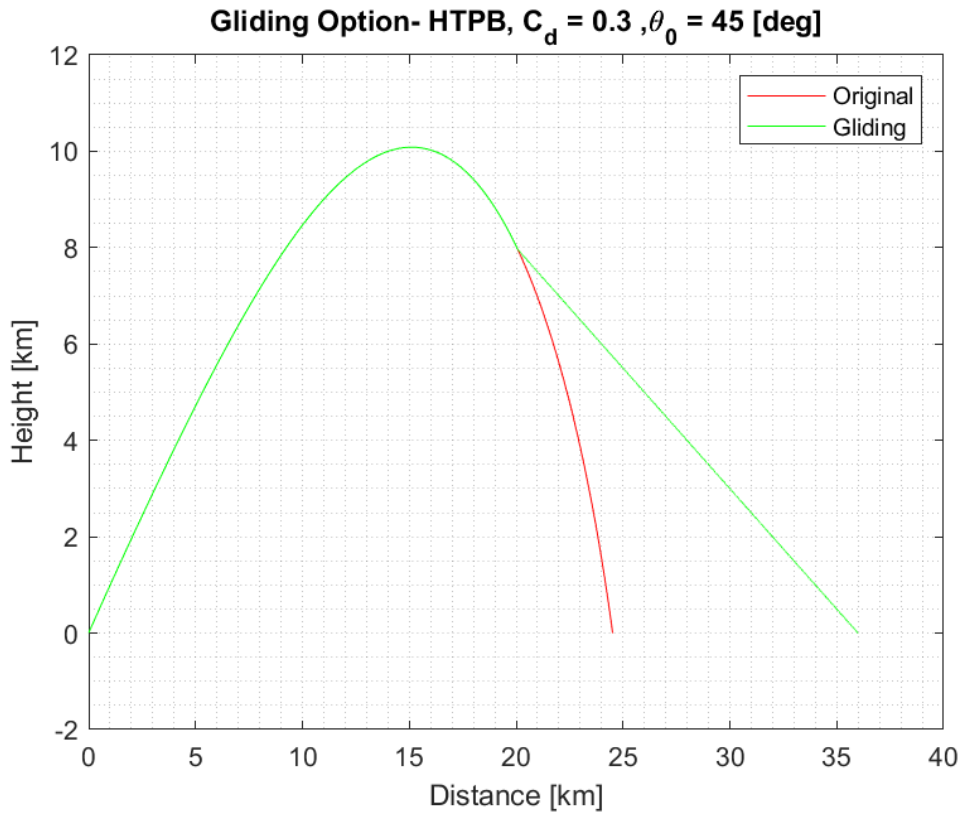
חצי כונס- $\frac{L}{D} = 2, C_d = 0.3$



איור 71: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex

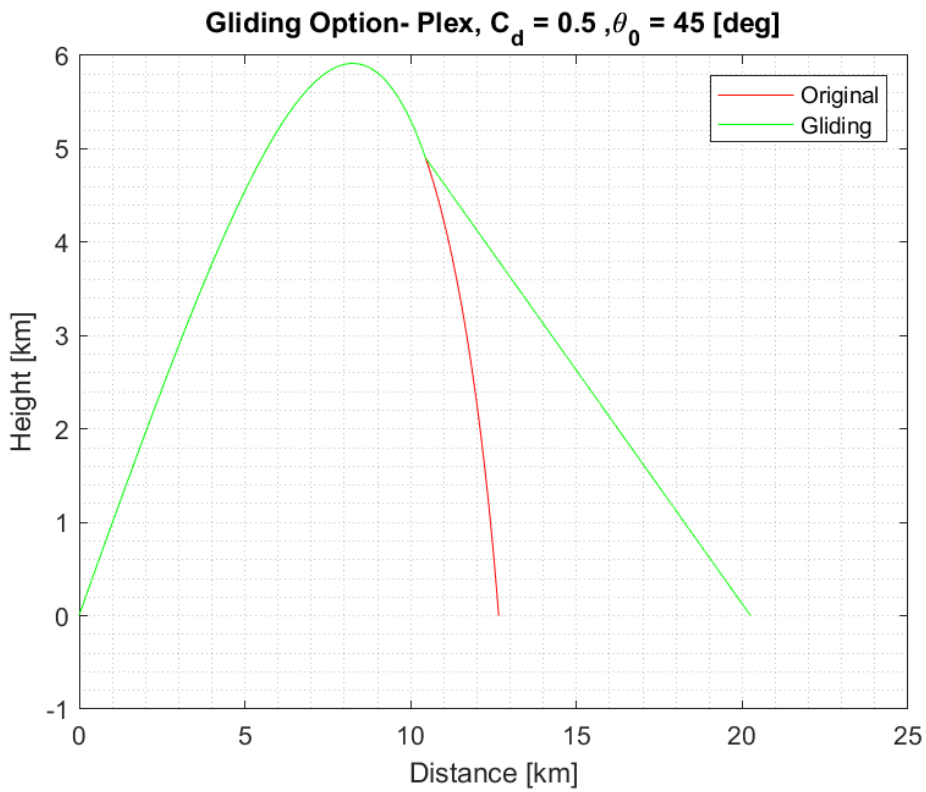


איור 72: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly

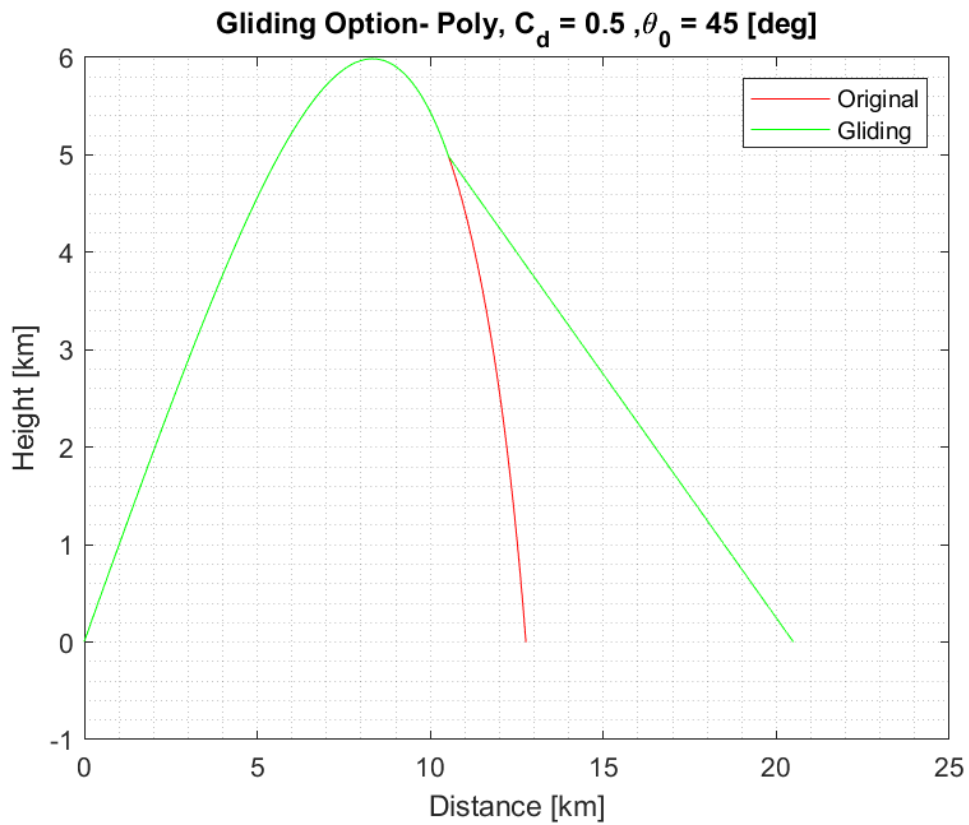


איור 73: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB

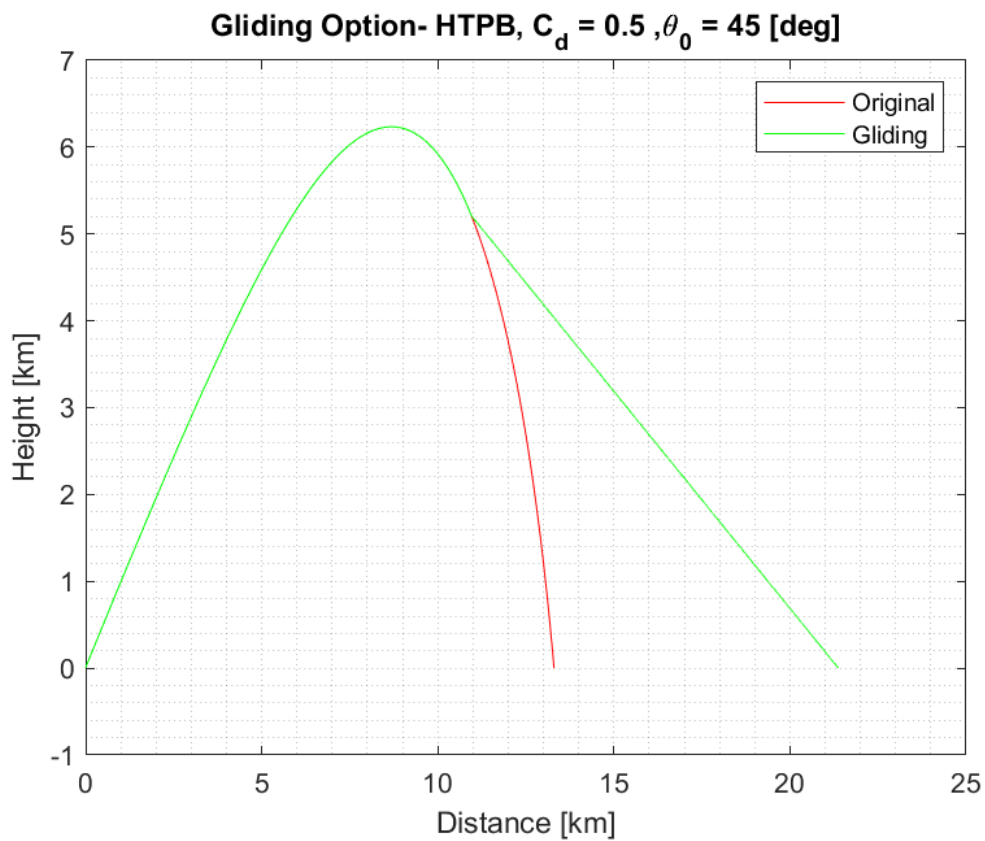
חצי בונס- $C_d = 0.5, \frac{L}{D} = 2$



איור 74: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי בונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex

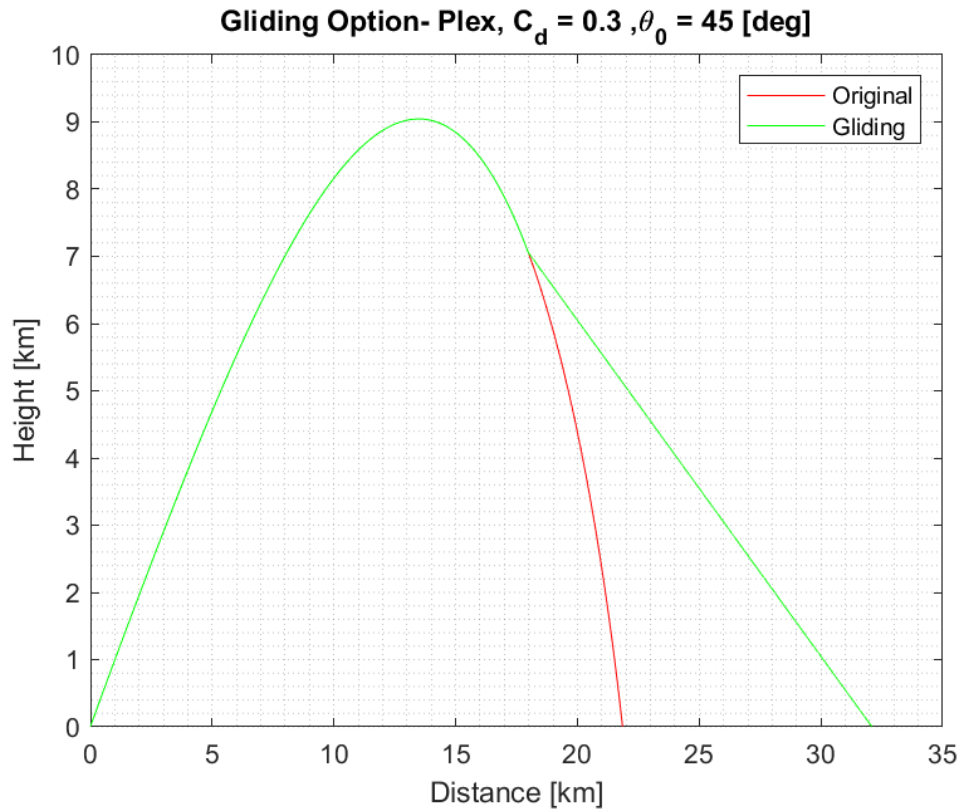


איור 75: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly

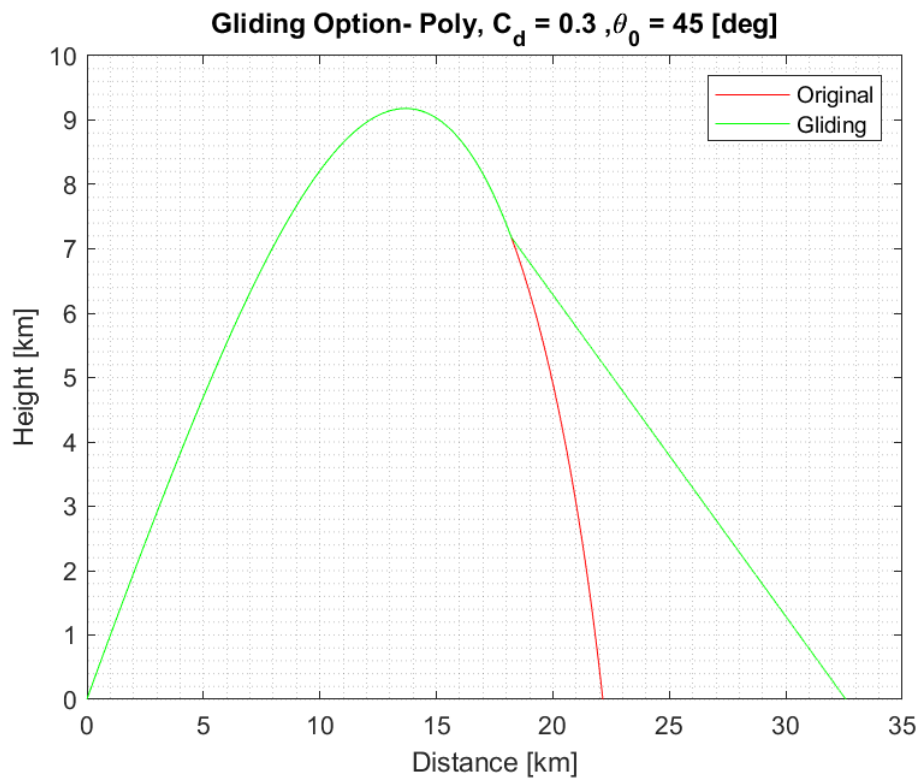


איור 76: מסלול הקליע המקורי כנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

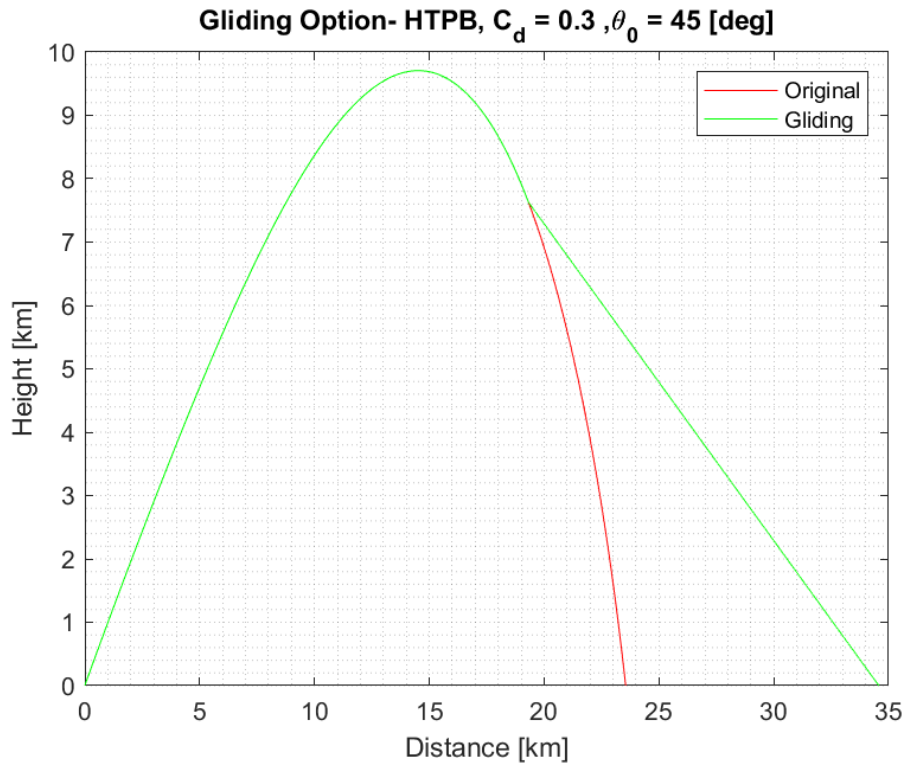
שליש בונס- $\frac{L}{D} = 2$, $C_d = 0.3$



איור 77: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex

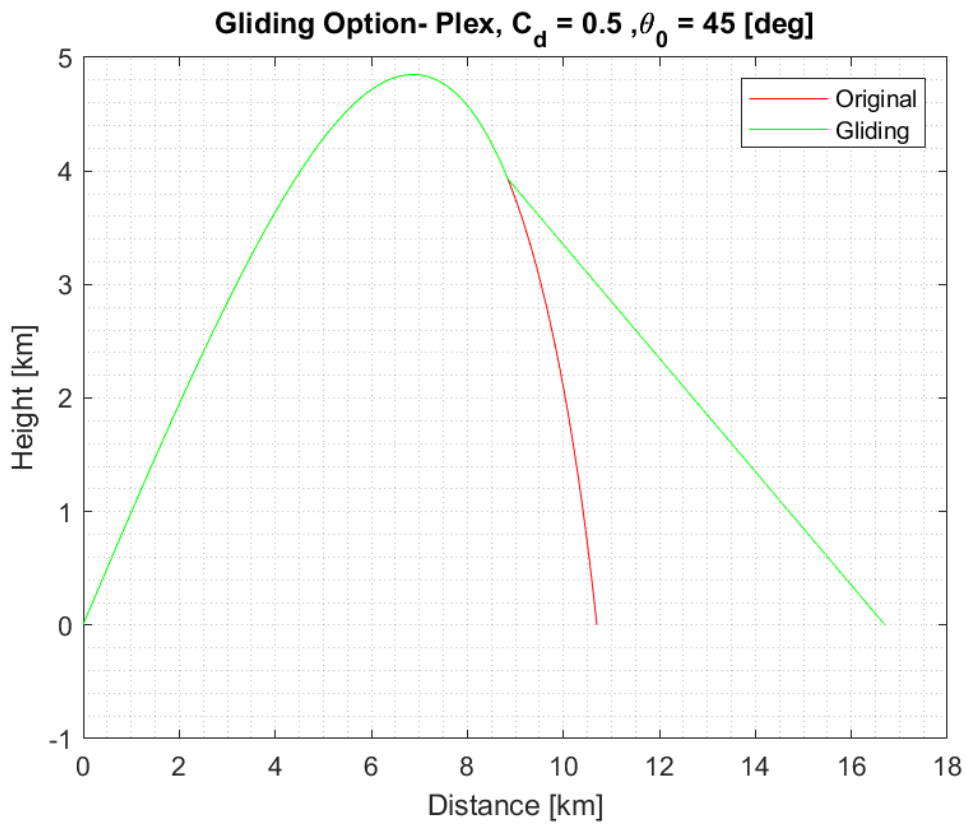


איור 78: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly

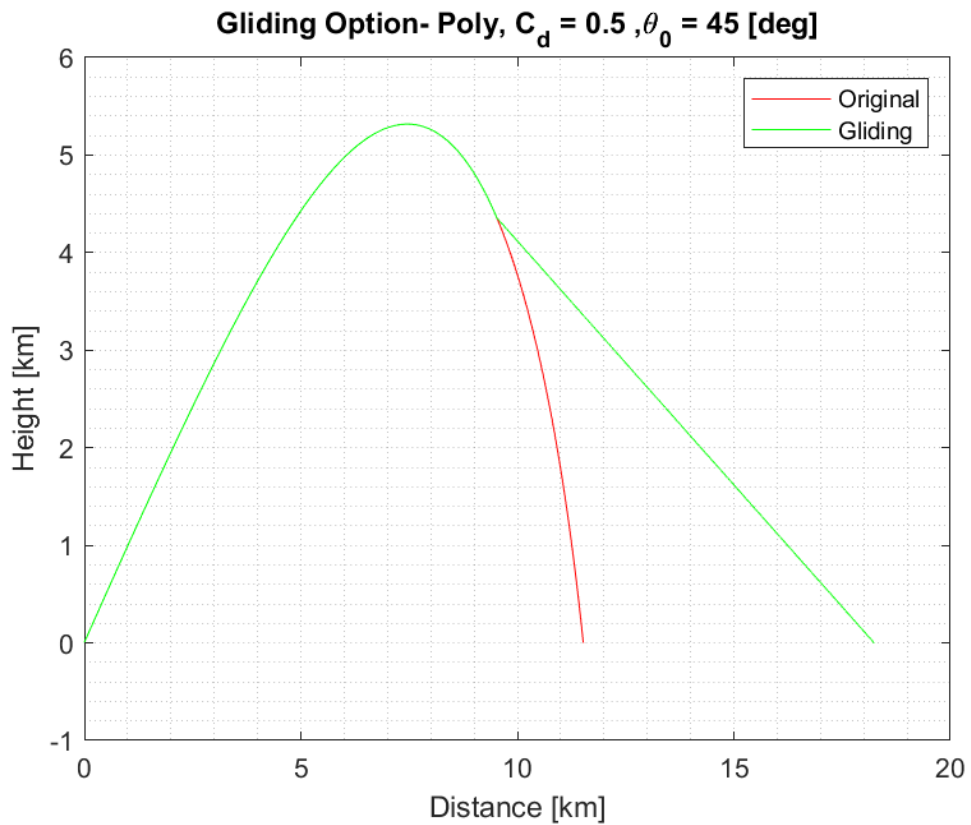


איור 79: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק HTPB

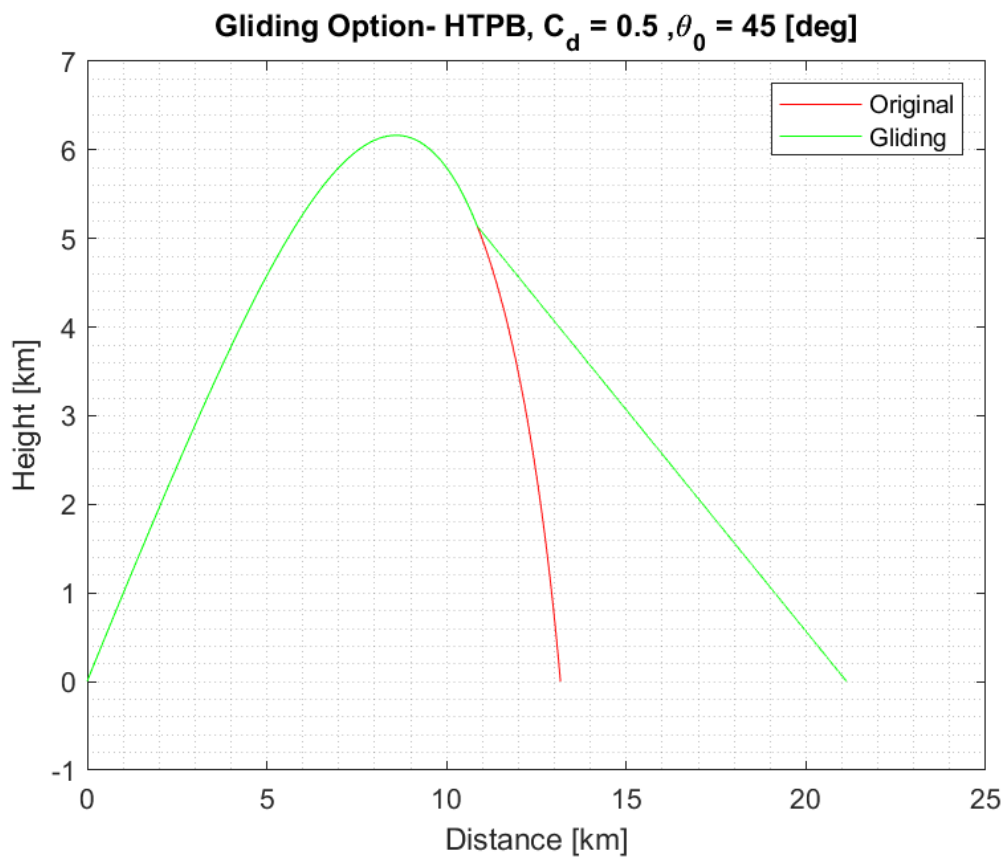
שלישי בונס- $C_d = 0.5, \frac{L}{D} = 2$



איור 80: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Plex



איור 81: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly



איור 82: מסלול הקליע המקורי בנגד מסלול עם אופציית גלישה עבור $L/D=2$, שלישי בונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

גלישה- חלק 2

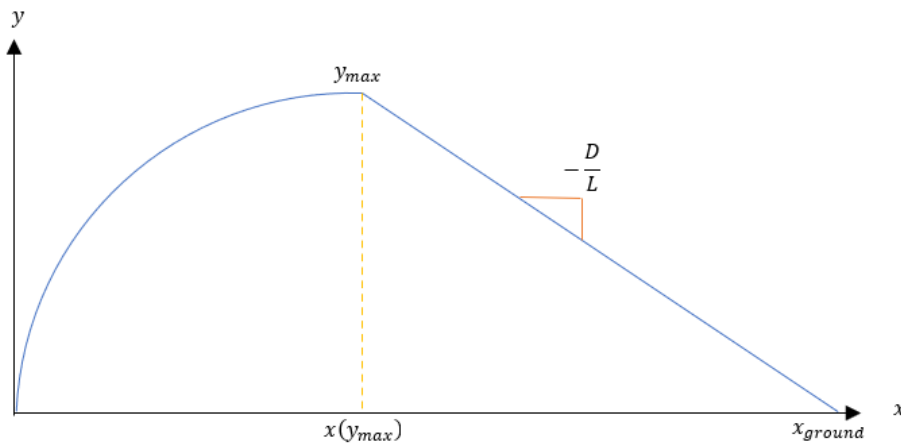
בחלק זה נרצה למצוא אפשרויות שונות לגלישה משיא הגובה. כלומר, נבחר טווח של יחסי L/D שונים אשר הקליע יחל לגלוש ביחסים האלו משיא הגובה של המסלול.

השלבים הם:

- מציאת $x(y_{max})$ ו- y_{max}
- הרכבת ישר בשיפוע של $-\frac{D}{L}$ החל מנקודת שיא הגובה:

$$y - y_{max} = -\frac{D}{L}(x - x(y_{max}))$$

$$\Rightarrow y = -\frac{D}{L}(x - x(y_{max})) + y_{max}, \quad x(y_{max}) \leq x \leq x_{ground}$$
- איחוד המסלול המקורי עד שיא הגובה יחד עם מקטע הגלישה.



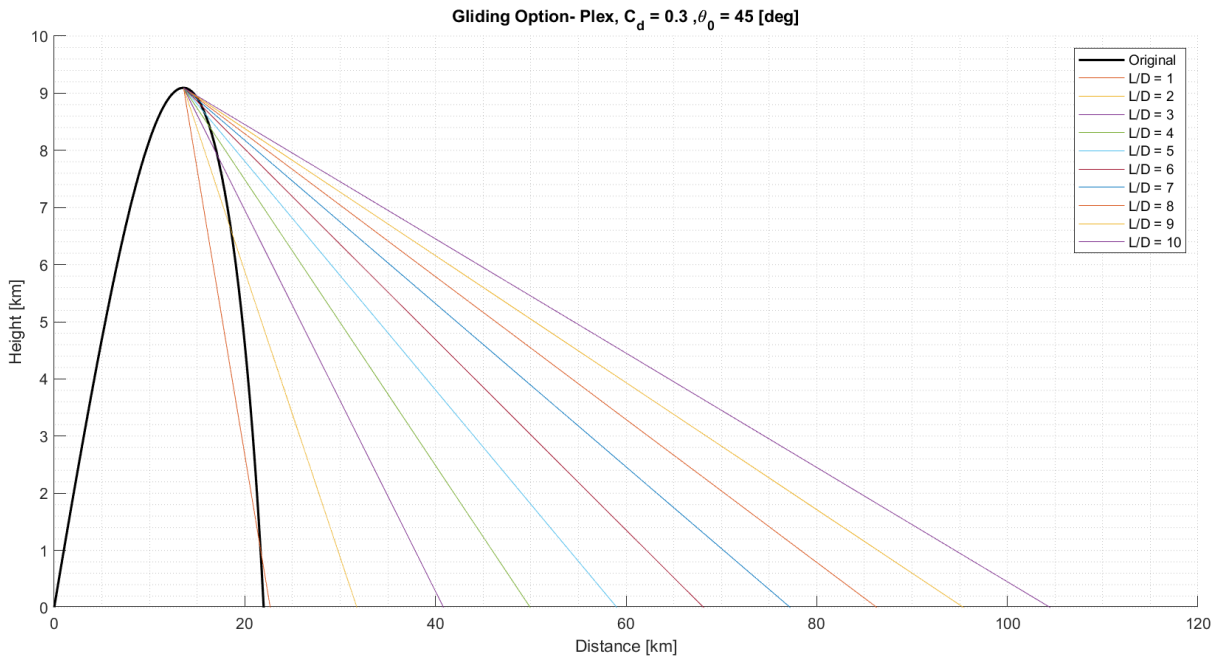
איור 83: תיאור סכמטי של תהליך בניית הגרף

בדומה לחלק הקודם, גם חלק זה יתחלק ל-6 מקרים:

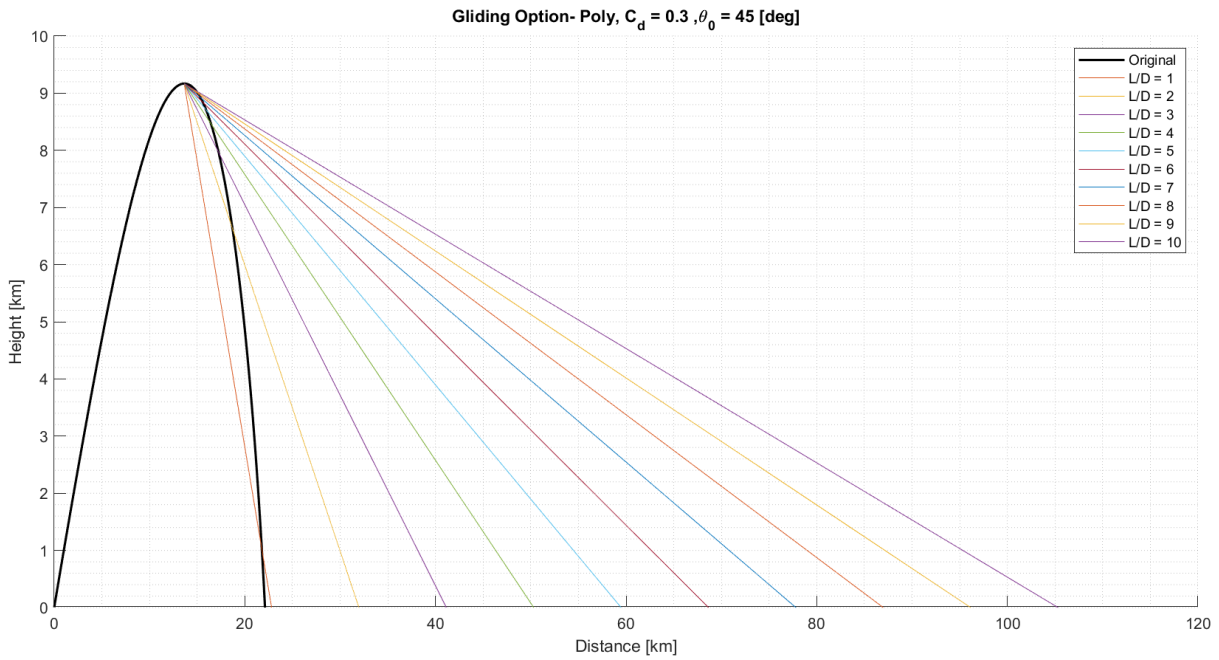
- כונס מלא- מקדם גרר 0.3/0.5
- חצי כונס- מקדם גרר 0.3/0.5
- שלישי כונס- מקדם גרר 0.3/0.5

עבור כל מקרה יוצגו שלושה גרפים- אחד עבור כל דלק, כאשר בכל גרף כזה תוצג השוואה בין המסלול המקורי לבין מסלול עם תוספת גלישה משיא הגובה ב-10 יחסי גלישה שונים (1 עד 10).

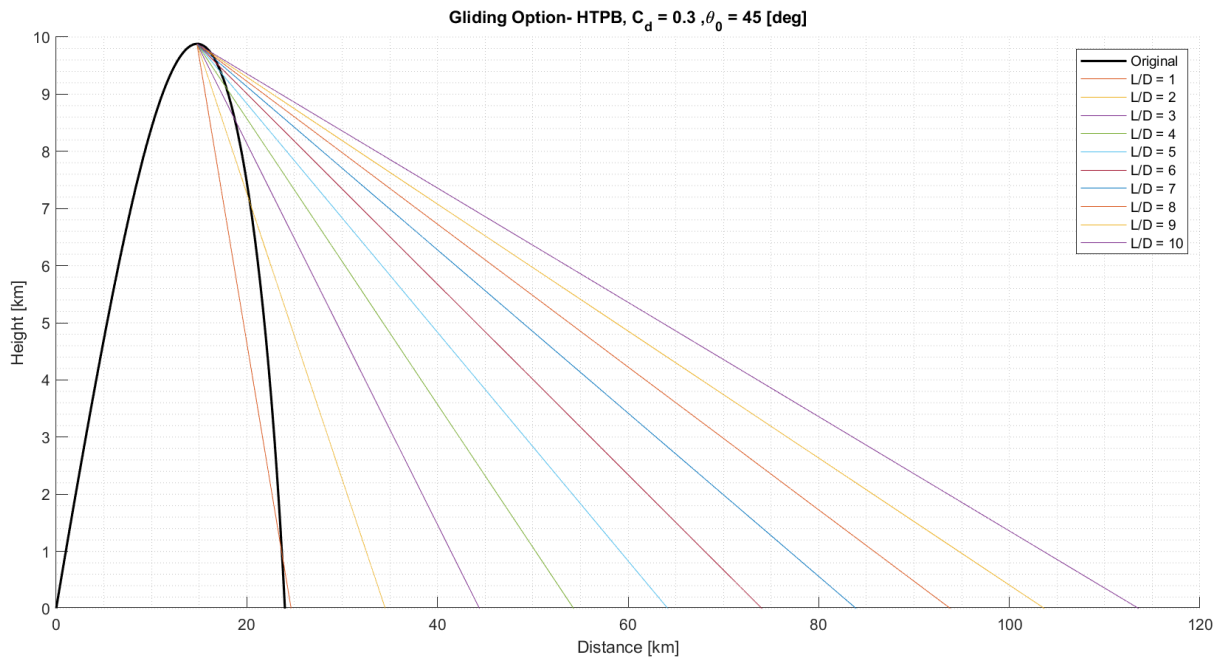
כונס מלא- $C_d = 0.3$



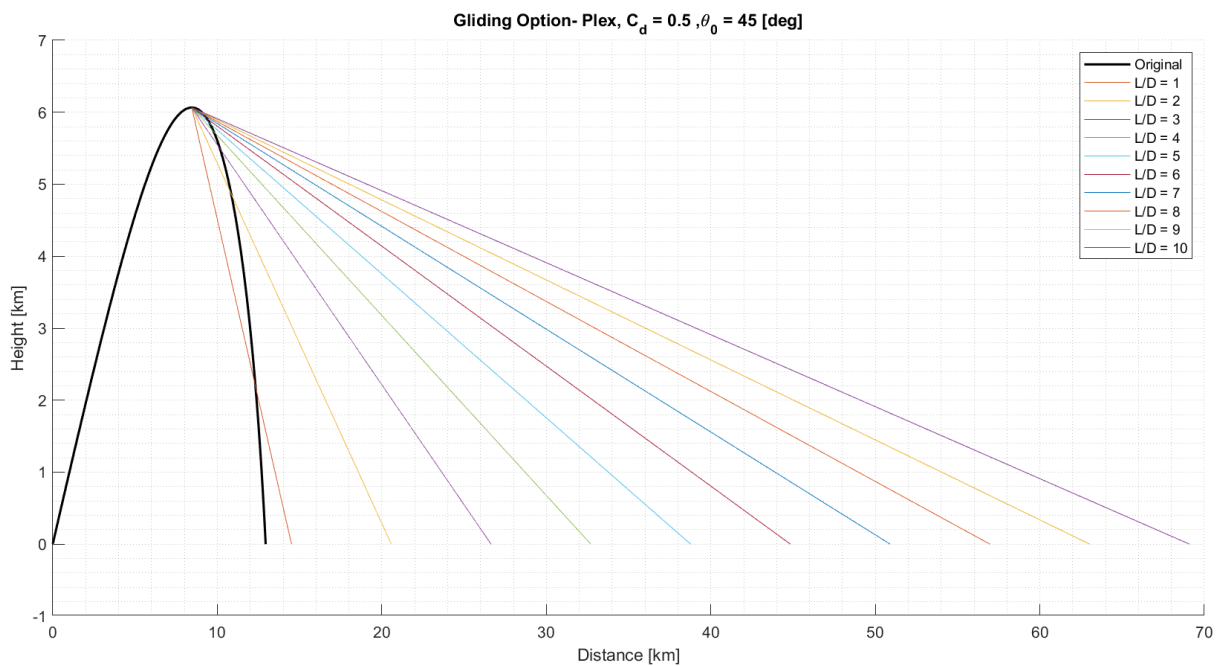
איור 84: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex

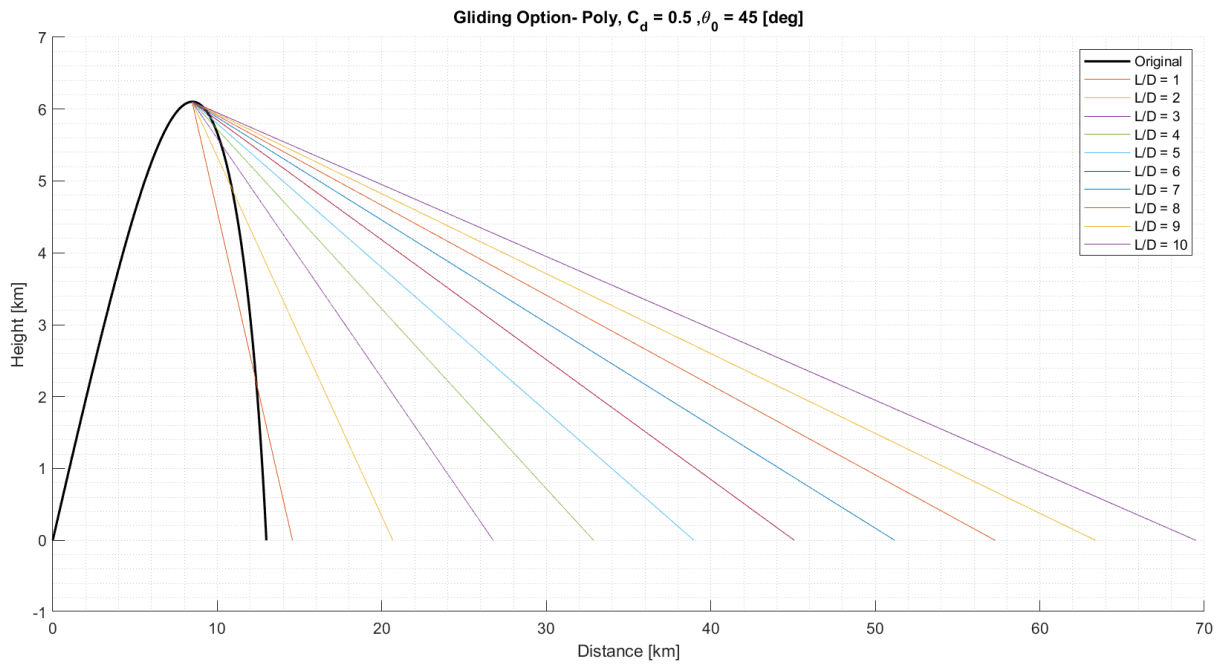


איור 85: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly

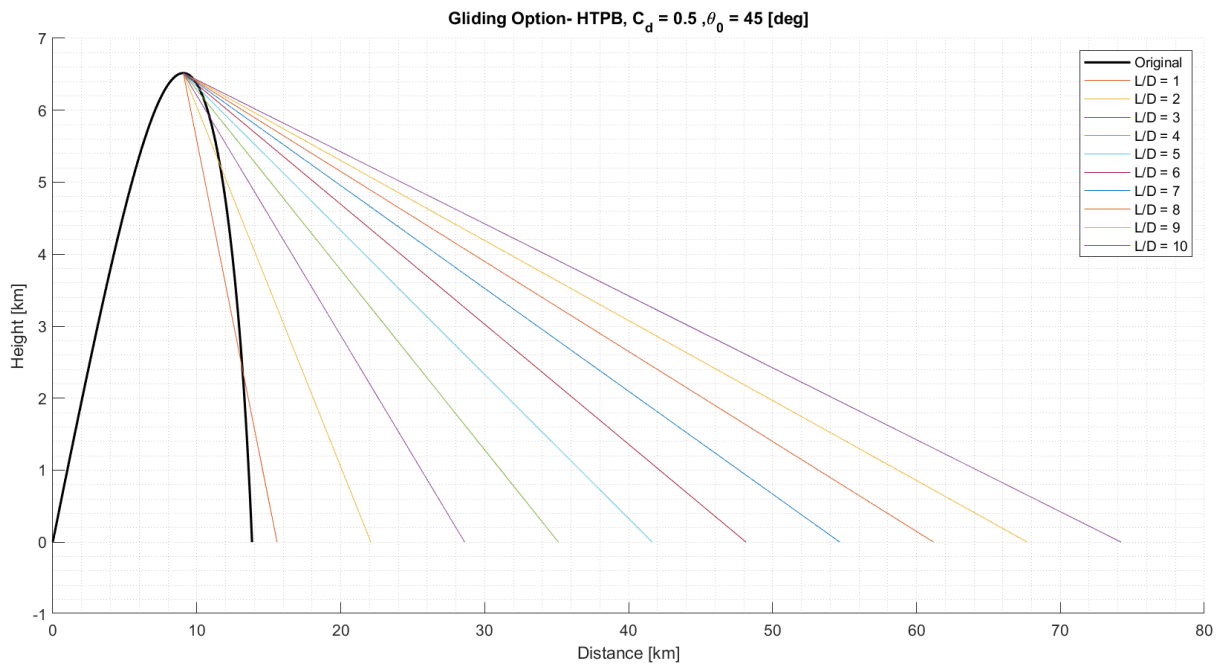


כונס מלא- $C_d = 0.5$



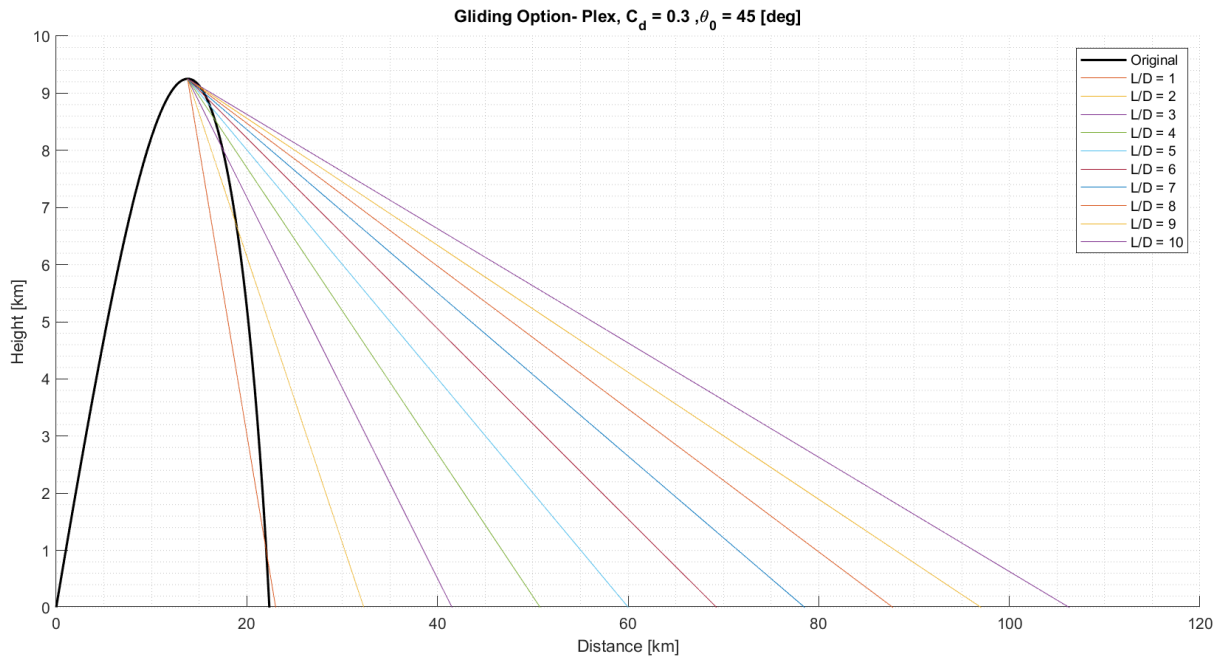


איור 88: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly

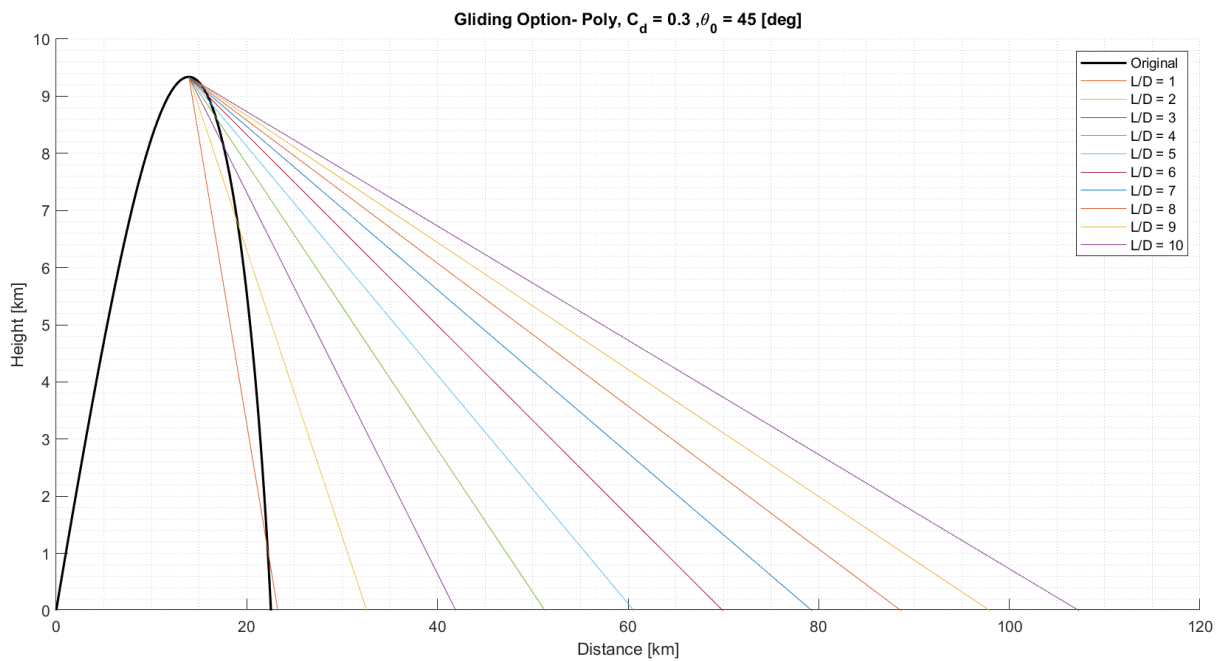


איור 89: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור כונס מלא, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

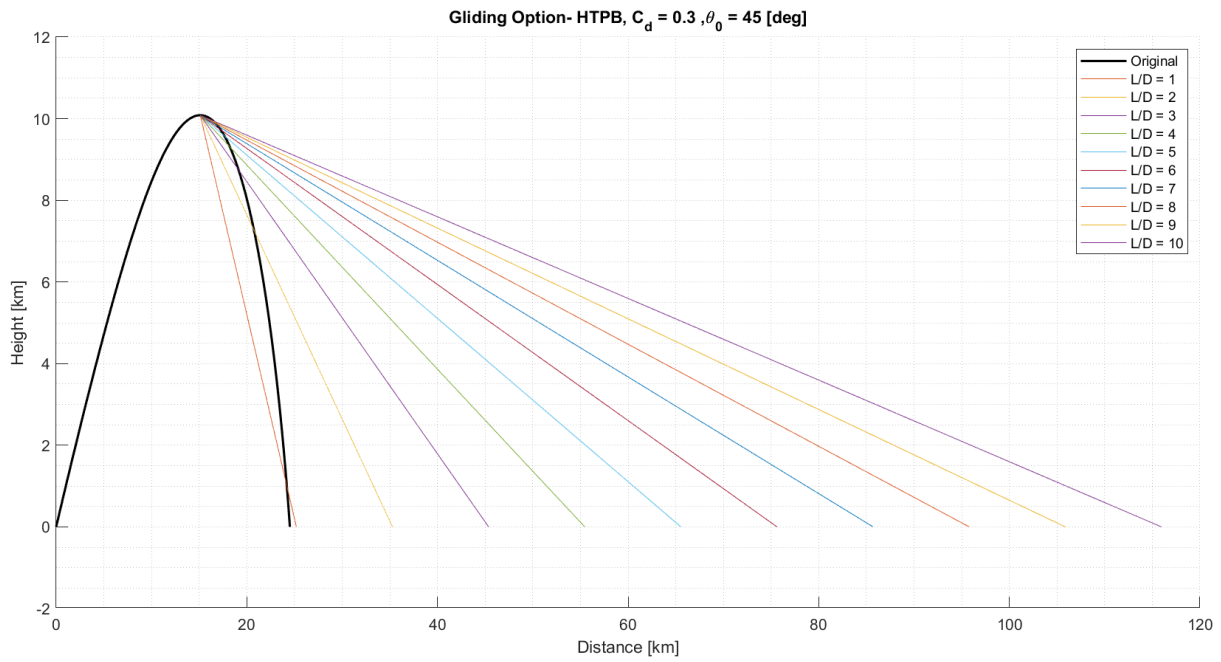
חצי כונס - $C_d = 0.3$



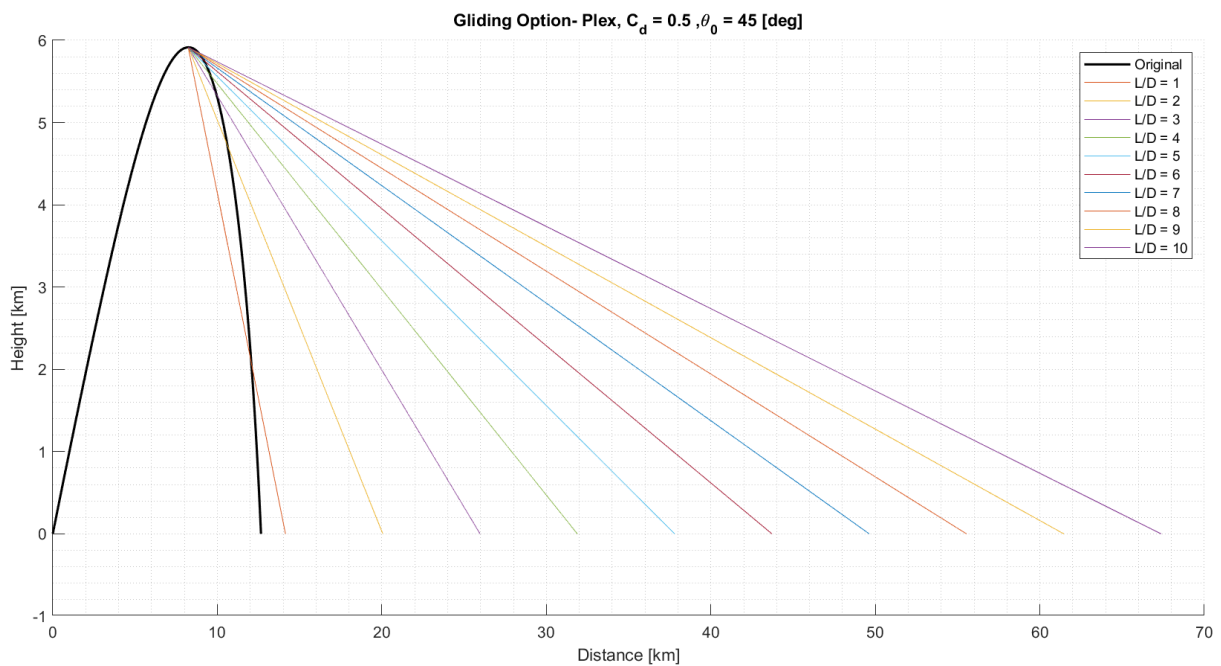
איור 90: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex

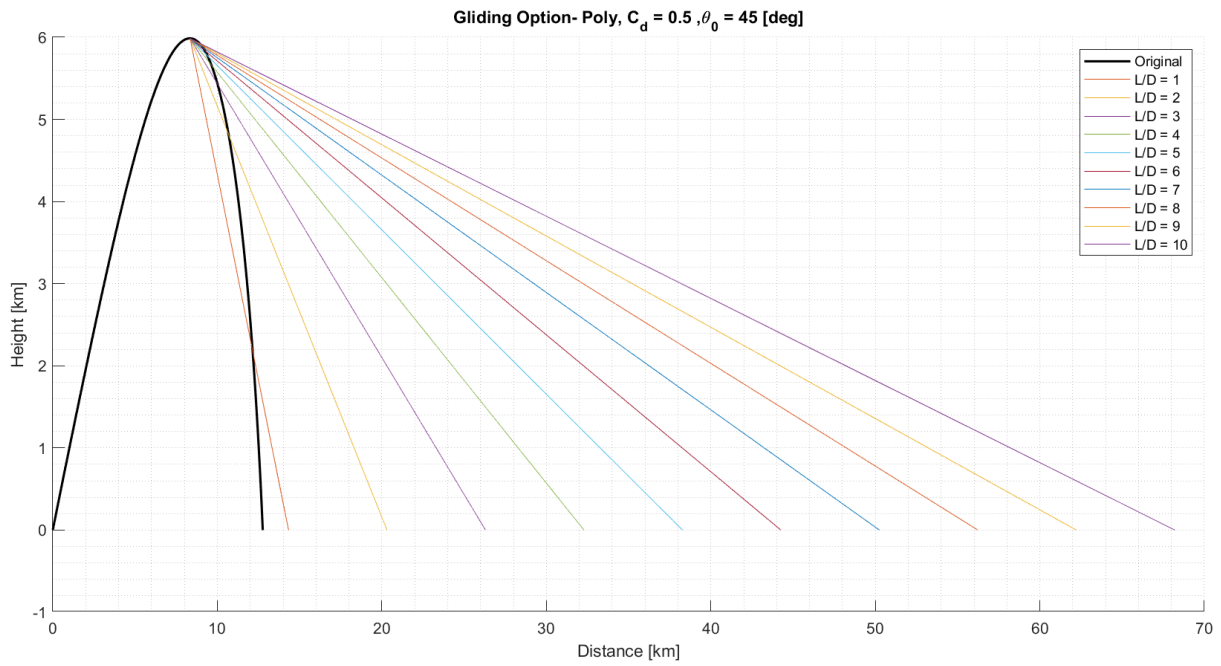


איור 91: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly

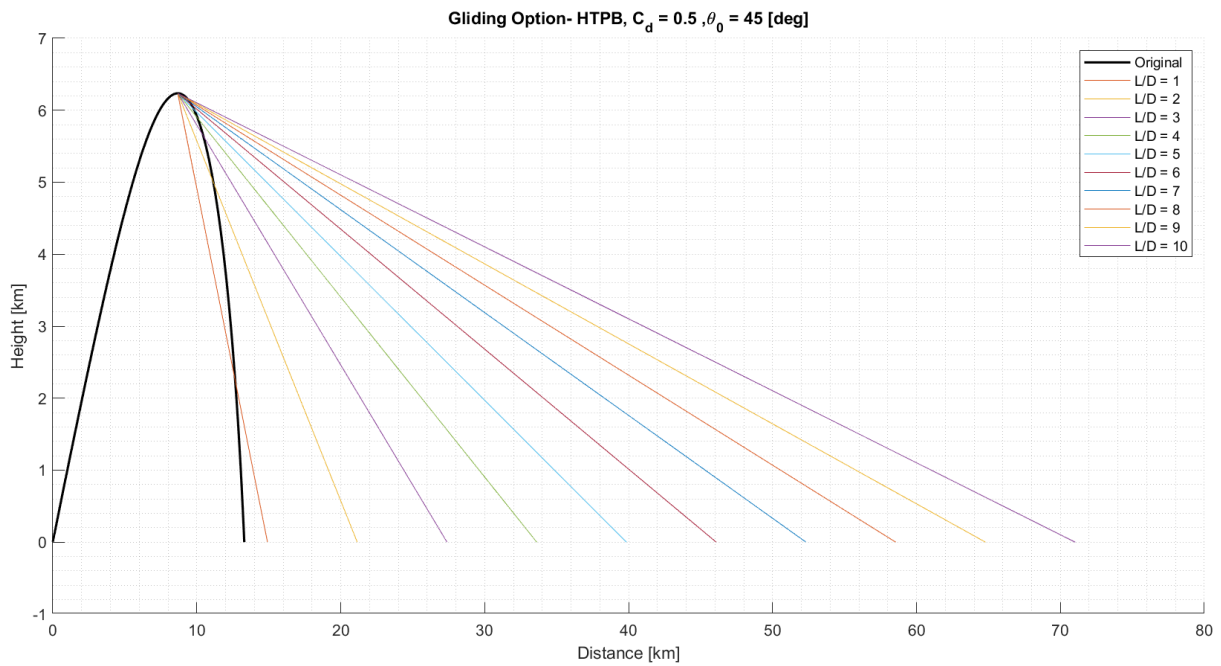


חצי בונס - $C_d = 0.5$



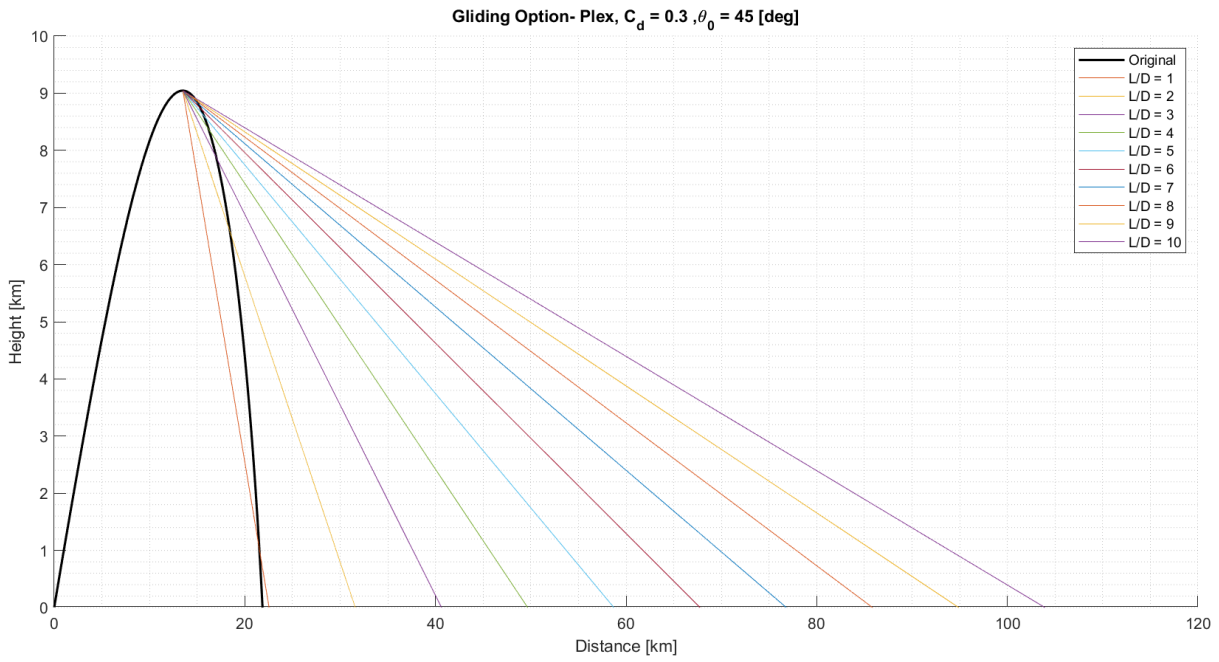


איור 94: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly

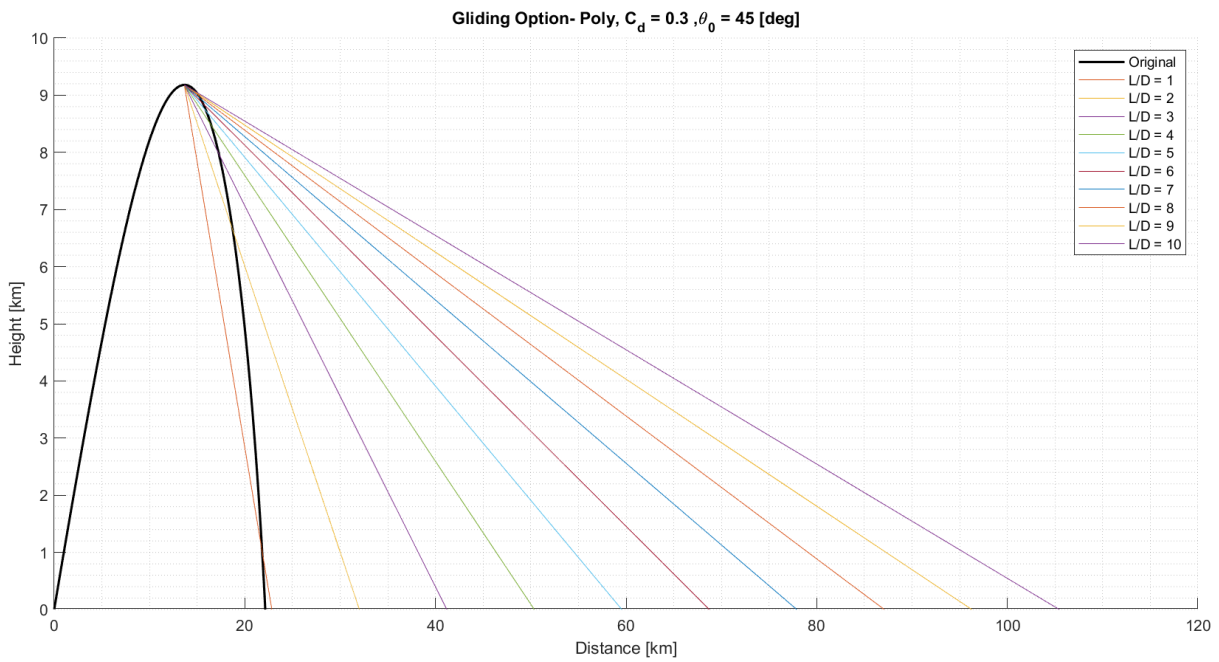


איור 95: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור חצי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

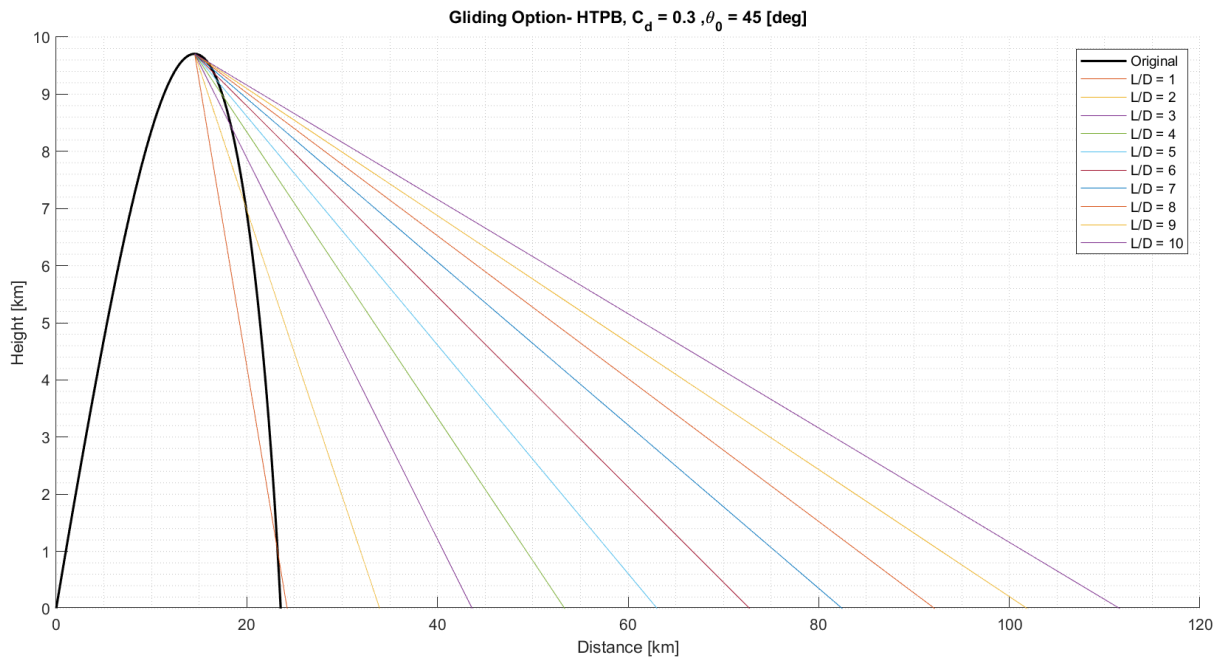
שליש בונס- $C_d = 0.3$



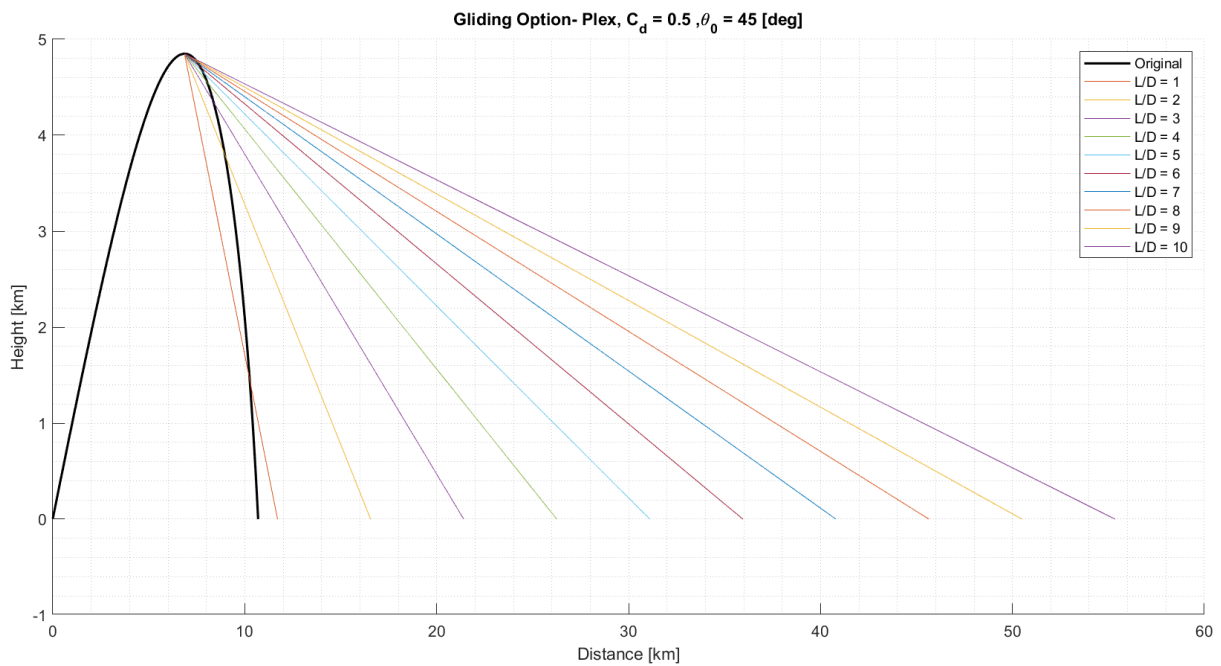
איור 96: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Plex

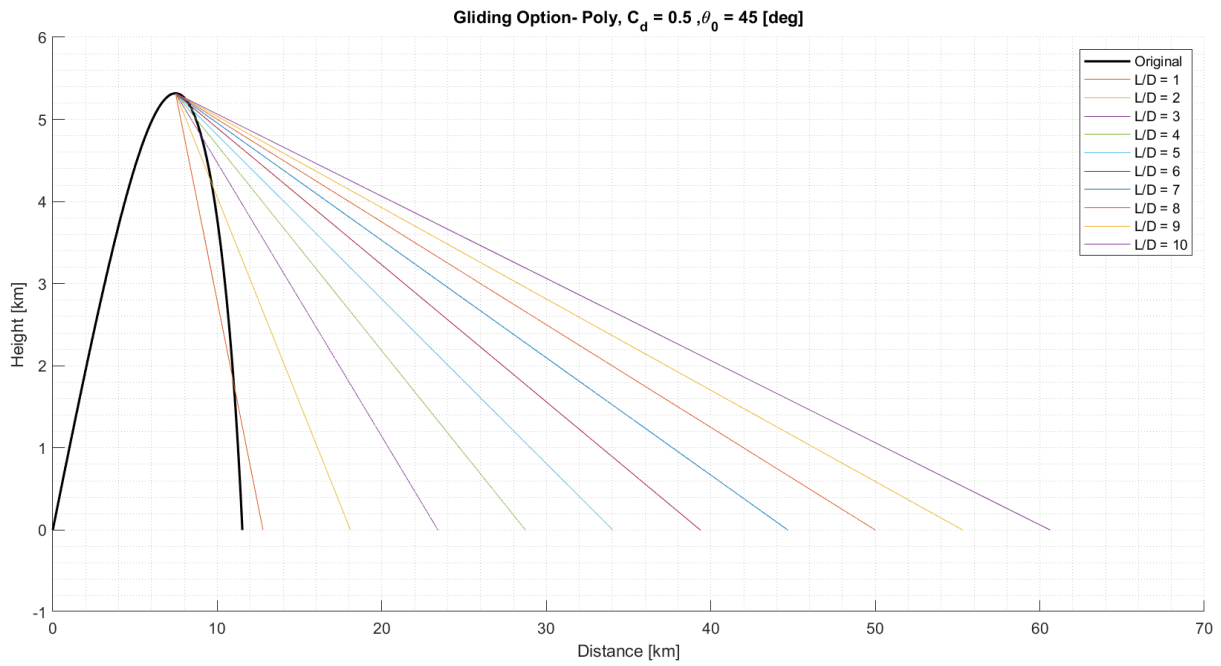


איור 97: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי בונס, מקדם גרר 0.3 ודלק Poly

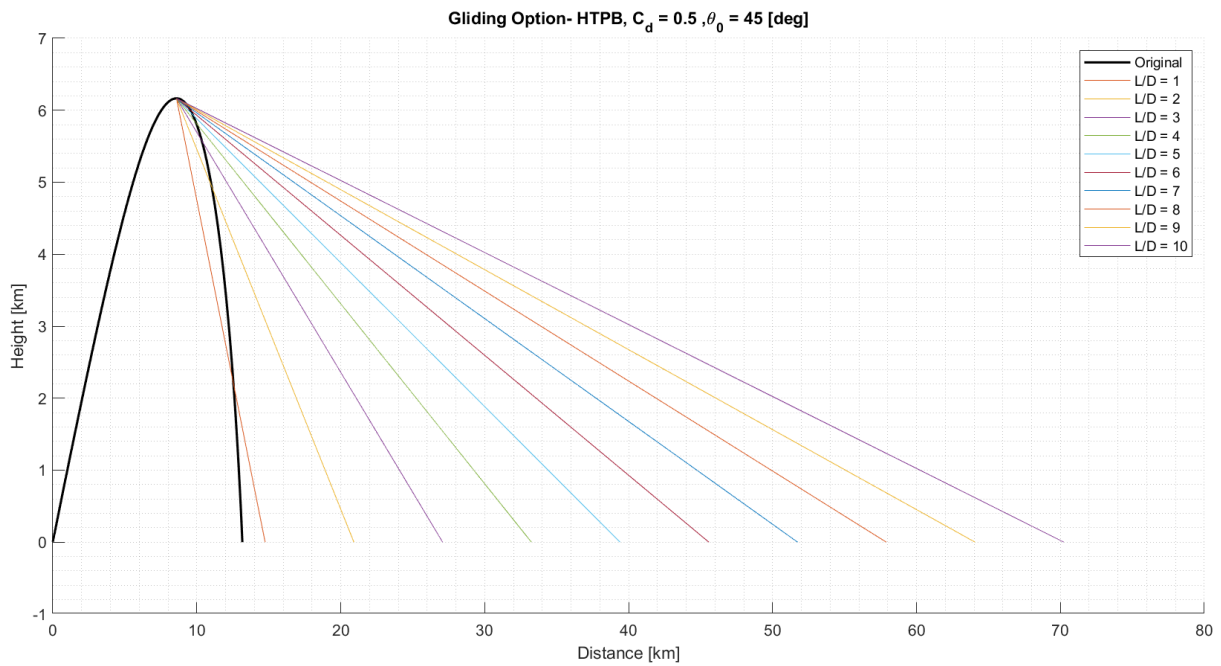


שלישי בונס- $C_d = 0.5$





איור 100: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק Poly



איור 101: אפשרויות גלישה משיא הגובה עבור שלישי כונס, מקדם גרר 0.5 ודלק HTPB

- תומר עד, פרויקט מחקר 1, טכניון, 2022.