



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת מכונות



**פרויקט תיכון מכונות**

## **משגר מזל"טים מסוג קטפולטה**

שמות הסטודנטים: איתי קול  
לאה מזגיש  
אהרון ורשאואר

שם המנחה: ויקטור וייסברג

## תקציר

פרויקט זה עוסק בתכן של מתקן שיגור מכאני נייד של מזל"טים במשקלים נמוכים. כפי שידוע המזל"ט הפך לכלי לחימה, סריקה ואיסוף מודיעין מאוד נפוץ בעולם כולו ובמדינת ישראל בפרט. כלי זה בשימוש במספר יחידות שדה ולעיתים דורש הפעלה בתנאים שאינם נוחים ואידיאלים, מה שיוצר בעייתיות בשימוש נוח ויעיל שלו. יתר על כן, למזל"ט עצמו הגבלות של גודל ומשקל מה שמחייב מציאת פתרונות יצירתיים להורדת רכיבים וסיכונים ממנו. מן המצב הזה עולה הצורך של מתקן השיגור הנייד. מתקן זה מונע סיבוכים בהטסת המזל"ט, וחוסך באנרגיה שעל המנוע להפעיל ובכך מאפשר שימוש במנוע קטן יותר, דבר שמקטין את גודלו ומוזיל את מחירו.

דו"ח זה עוסק בתהליך התכן של המוצר הסופי, דבר הכולל סקר של הדרישות, מחקר מעמיק של פתרונות ומנגנונים קיימים ושילובם באופן אופטימלי, חישובים פיזיקליים והנדסיים, בחירה של חומרים ועוד. בתהליך התכן היו מספר שיקולים שצריך להתחשב בהם, וביניהם נפח ומשקל המוצר (נוחות להתניידות של המפעילים בשטח), מחירי החלקים וזמינותם בשוק לצורך תיקונים והחלפות, התאמות לפרטי המזל"טים בשימוש, עמידות בתנאי שטח מחמירים ועוד. בהתאם למסקנות שהושגו במהלך התכנון והחישובים, יוצר מודל של המתקן באמצעות תוכנת SOLIDWORKS. באמצעות מודל זה ופירוקו לרכיביו, הוכנו גם שרטוטי הרכבה, ואפשרות להדגים בצורה ברורה את אופן פעולת המתקן לצורך הבנה מעמיקה ויישום בפועל.

המוצר עצמו מורכב משלדה המשמשת כבסיס למתקן, עליו מורכבים מסילות שבהם נעה עגלת המשא, גלגלת הנעה למתיחת הקפיץ ודורגלים לייצוב. על ידי כך שכלל הרכיבים במתקן הינם מכאניים, תפעול המוצר הינו פשוט ואינטואיטיבי לשימוש כך שחיילים בשטח לא יבזבזו הרבה זמן בטעינתו. נוסף על כך זה יוצר תחלופה קלה של רכיבים המתקלקלים, מוזיל את המחיר ומאפשר עמידות גבוהה לזעזועים ותנאים מחפירים. בנוסף זה עוזר לענות על בעיית האנרגיה שהמזל"ט מפעיל בכך שההגעה למהירות המראה תתבצע על ידי כוח שהאדם מפעיל ולא על ידי המנוע המותקן עליו, מה שמאפשר לו לטיסה ארוכה יותר.

## תוכן עניינים

1	מבוא	1.
1	אפיון דרישות המוצר	2.
2	הגדרת הבעיה	3.
2	חלופות ושיקולים בבחירת הפיתרון	4.
2	4.1. הצגת פתרונות חלופים	4.1.
2	4.1.1. קטפולטה פנאומטית	4.1.1.
3	4.1.2. קטפולטה עם קפיץ	4.1.2.
3	4.1.3. קטפולטה כבל בנגיי	4.1.3.
4	4.2. מסמך אפיון דרישות	4.2.
5	5. תכן כללי של הפתרון (PDR)	5.
7	5.1. עץ מוצר	5.1.
8	6. תכן מפורט של הפיתרון (CDR)	6.
8	6.1. בחירת חומרים	6.1.
9	7. חישובים הנדסיים	7.
9	7.1. הנחות	7.1.
9	7.2. חישוב מהירות ההמראה הדרושה	7.2.
10	7.3. חישוב הכוח הדרוש מכבל הבנגיי בהתאם לאורך המסלול	7.3.
12	7.4. בחירת כבל הבנגיי	7.4.
14	7.5. חישוב המומנט מידיית ההנעה	7.5.
14	7.6. בלימת זעזועים	7.6.
16	7.7. חישובי חוזק	7.7.
19	7.7.1. כוחות מתיחה	7.7.1.
20	7.7.2. כוח גזירה	7.7.2.
21	7.7.3. כוח גזירה על המסמרות	7.7.3.
22	8. תיק יצור	8.
22	8.1. שרטוט חלקים	8.1.
25		
25	איור 27- מעמד הרמה וייצוב	

26	שרטוט הרכבה	8.2.
28	תרשים עלויות	9.
28	סיכום	10.
29	מקורות	11.
30	נספחים	12.

## טבלת סימונים

סימון	תיאור הסימון	יחידות
$L$	כוח עילוי	$[N]$
$W$	כוח מתאוצת הכובד	$[N]$
$\sum$	סכום	-
$F_y$	כוחות בציר y	$[N]$
$m$	מסה	$[kg]$
$g$	תאוצת הכובד	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$C_L$	מקדם עילוי	-
$\rho$	צפיפות	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$A_w$	שטח הכנפיים	$[m^2]$
$v$	מהירות המזל"ט	$\left[\frac{m}{sec}\right]$
$a$	תאוצת המזל"ט	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$t$	זמן	$[sec]$
$s$	אורך מסלול הקטפולטה	$[m]$
$F$	כוח מכבל הבנג'י	$[N]$
$N$	כוח הנורמל	$[N]$
$\alpha$	זווית המסלול	$[deg]$
$F_{x'}$	כוחות במערכת המסובבת	$[N]$
$\tau$	כוח גזירה	$[MPa]$
$A$	שטח חתך	$[mm^2]$
$s_y$	מאמץ כניעה	$[MPa]$
$n$	מקדם ביטחון	-
$\sigma_{eq}$	מאמצים אקווילנטיים	$[MPa]$
$\sigma$	מאמצים ציריים	$[MPa]$
$k$	קבוע הקפיץ	$\left[\frac{N}{mm}\right]$
$\Delta x$	תזוזת הקפיץ	$[mm]$
$M$	מומנט	$[N \cdot mm]$
$R$	רדיוס	$[mm]$

$[J]$	אנרגיה	$E$
$[mm]$	אורך התיל	$d$
$[GPa]$	מודול גזירה	$G$
-	מספר כריכות פעילות בקפיץ	$Na$
-	יחס הקטרים בין קוטר נומינלי לקוטר התיל	$C$
	מספר כריכות כולל בקפיץ	$Nt$

## 1. מבוא

פרויקט זה עוסק בתכן שיגור מזל"ט במשקל של עד 5 ק"ג באמצעות מערכת של קטפולטה. שימוש בקטפולטה חוסך באנרגיה שהמזל"ט מפעיל על עצמו בכך שאנרגיית ההפעלה מגיע ממקור מכאני בידי המשתמש ולא מהמנוע של המזל"ט. השיגור בעזרת הקטפולטה מתבסס על המרת אנרגיה שאגורה במתקן לאנרגיה קינטית של המסילה עליה מורכב המזל"ט. האנרגיה שהמתקן מספק היא האנרגיה הדרושה להאצת המזל"ט למהירות ההמראה ובכך תתאפשר הפקת כוח עילוי הדרוש להמראה. בדוח זה יוצגו השיקולים לבחירת מנגנון טעינת הקטפולטה, ותכן מלא של המנגנון. בנוסף יוצגו השיקולים עבור בחירת החומרים ואופן נשיאת המזל"ט על המסילה. כמו כן, יוצגו החישובים הדרושים על מנת להבטיח שהתכן יעמוד בדרישות.

## 2. אפיון דרישות המוצר

דרישות המוצר מותאמות לקהל היעד אליו אנו מכוונים בפרויקט זה. הוחלט כי המוצר יהיה מיועד עבור גורמים צבאים לצורך סריקות שטח, מעקב ותצלומי אוויר. לפיכך על המוצר להיות עמיד בפני תנאי סביבה שונים כגון: טמפרטורות סביבה שונות, סוגי קרקע שונים, זוויות קרקע, לחץ סביבה, לחות ומגע עם מים. בנוסף עליו להיות קל לתפעול, ובעל משקל נמוך יחסית לניידות. להלן דרישות המוצר:

- תפעול קל של המערכת- על המערכת להיות נוחה וקלה עבור כל משתמש ללא היכרות מוקדמת של המערכת וללא כל מאמץ חריג מצידו.
- תחזוקה פשוטה וקלה- על המערכת להיות בעלת תחזוקה שוטפת פשוטה, עם חלקי חילוף זמינים וזולים יחסית.
- מנגנון אחיזת המזל"ט- מערכת תפיסת המזל"ט צריכה לתפוס את המזל"ט לכל אורך מסלול השיגור ולשחרר אותו בסיומו ללא כל התערבות חיצונית.
- עמידה בעומסים- מסלול ההמראה צריך לעמוד בעומסים של המזל"ט ומתקן האחיזה (כ-8 ק"ג).
- אמינות- שלדת המערכת תחזיק עבור 20,000 הטסות לפחות, וכן תהיה עמידה בפני התחמצנות והתעייפות.
- בטיחות-על המערכת להיות בטיחותית עבור המשתמש.
- שחרור המנגנון- על המתקן לשחרר את מתקן תפיסת המזל"ט ברגע שנאגרה מספיק אנרגיה לשיגור והמראת המזל"ט ולא לפני כן.
- עמידות בפני זעזועים- על המוצר להיות עמיד בפני זעזועים שיתרחשו בעת הגעת ועצירת מתקן האחיזה לסוף מסלול ההמראה.

### 3. הגדרת הבעיה

המוצר אמור לגרום להאצת המזל"ט עד למהירות השיגור שלו, תוך אחיזה מלאה לכל אורך המסלול ושחרורו בסופו. לפיכך דרוש ליצור מנגנון בו תתאפשר אחיזה נכונה של המזל"ט, אגירת האנרגיה הדרושה להמראה ושחרור מתקן האחיזה רק לאחר אגירת האנרגיה הדרושה, האצה רציפה של המתקן על גבי המסלול ושחרור המזל"ט מהמתקן במהירות מספיקה.

### 4. חלופות ושיקולים בבחירת הפתרון

כיום קיימים בשוק קטפולטות מסוגים שונים עבור שיגור מזל"טים הנבדלים באופן הנעתם. בפרק זה יבחנו מספר חלופות קיימות תוך בחינת היתרונות והחסרונות של כל אחד מהם, כל זאת על מנת לקבל השראה לקונספט בסיסי וכן שיפורו על ידי תיקון הליקויים הקיימים ושילוב תכונות ומערכות מקונספטים אחרים, זאת על מנת ליצור מוצר שיעמוד בדרישות שהוצגו בפרק 2.

#### 4.1. הצגת פתרונות חלופיים

להלן שלוש החלופות העיקריות שהוצעו עבור מוצר זה:

##### 4.1.1 קטפולטה פנאומטית

קטפולטה פנאומטית מונעת באמצעות אוויר דחוס בלחץ גבוה המגיע מהמדחס. ניתן לשלוט על רמת לחץ האוויר באמצעות מדי לחץ המותקנים במדחס. קטפולטות מסוגים אלו מאופיינים במהירויות שיגור גבוהות, ובעלי יכולת לשגר מזל"טים במשקלים גבוהים יחסית. בנוסף, ניתן להתאים את הקטפולטה לשיגור מזל"טים מסוגים שונים באמצעות וויסות רמת הלחץ. קטפולטה מסוג זה ניתנת לתפעול גם בטמפרטורות סביבה קיצוניות. עם זאת היא נוטה להיות כבדה ויקרה ביחס לשאר החלופות הקיימות. בנוסף נדרשת הכרה גדולה יותר של הפעלת הציוד מצד המשתמש עקב הציוד הנלווה, תחזוקה יקרה ומסובכת וכן היא מערכת בטוחה פחות ביחס לשאר החלופות.

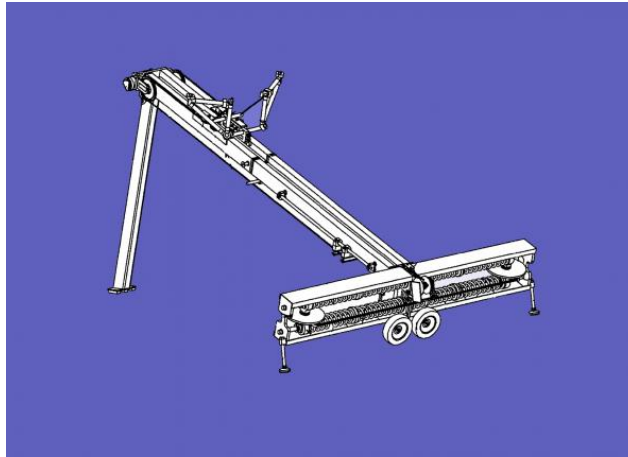


איור 1- קטפולטה פנאומטית [1]



#### 4.1.2 קטפולטה עם קפיץ

קטפולטה עם קפיץ מונעת על ידי קפיץ מתיחה אשר נמתח עד לאגירת האנרגיה הדרושה בכיוון מסלול ההמראה. קטפולטה מסוג זה נוחה לשימוש ובעלת מנעד רחב של אופציות ומהירויות שונות בהתאם לסוג הקפיץ. בנוסף היא זולה יחסית, וקלה לתפעול ולהעברה ממקום למקום. עם זאת במערכות עם מנגנון המבוסס על קפיצים איכות הקפיץ יורדת משמעותית לאחר שימושים רבים, בנוסף המערכת מושפעת באופן משמעותי מתנאי הסביבה, בעיקר מהפרשי חום וקור.



איור 2- קטפולטה קפיץ [2]

#### 4.1.3 קטפולטה כבל בנג'י

קטפולטה כבל בנג'י מבוססת על מערכת האצה שבנויה על עקרון האלסטיות של גומי. טעינת המשגר מתבצע באופן דומה לטעינה של קטפולטה על בסיס קפיצים, על ידי מתיחה של הכבלים לאחור למצב סטטי מתוח בעל רמת אנרגיה אגורה גבוהה. במערכות המבוססות על מנגנון זה קיימים משתנים רבים באמצעותם ניתן לשלוט על המערכת כגון- עובי הכבל, סוג החומר (איכות, חוזק, עמידות), ואורך הכבל. בנוסף המערכת בעלת משקל נמוך יחסית, תחזוקה פשוטה וזולה והיא נוחה לתפעול. מדובר על פתרון מכאני פשוט ולכן אמינות המוצר גבוהה עם אחוז כשל נמוך יחסית. לעומת זאת, בעת תקלה קיימת סכנה למשתמש במקרה והוא בקרבת הכבל, דרושה אחזקה שוטפת יחסית, ובנוסף עם זמן השימוש הגומי עובר דפורמציה מה שפוגע ברמת הדיוק.



איור 3- קטפולטה בנג'י [3]

## 4.2. מסמך אפיון דרישות

בטבלה 1 יוצגו הדירוגים עבור כל אחד מהשיקולים כאשר הציון מורכב מ-100-1, כאשר 1- הוא הציון הנמוך ביותר ו-100 הגבוה ביותר.

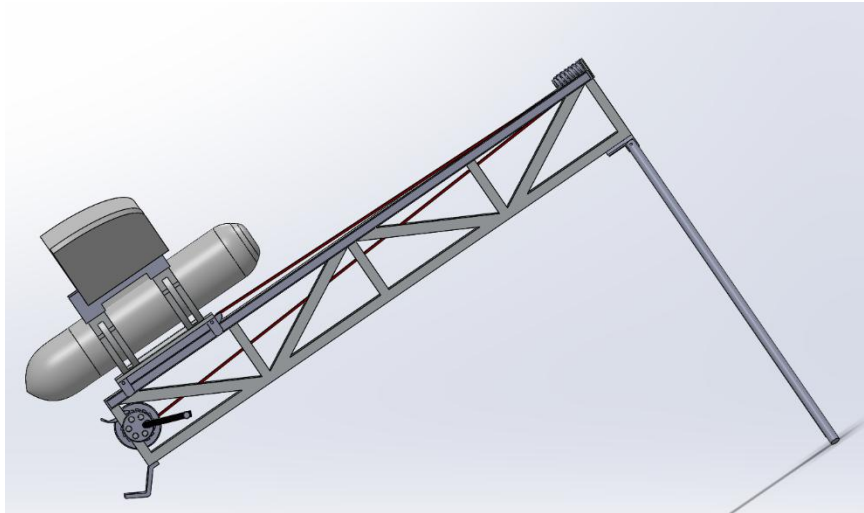
טבלה 1- תאימות הדרישות עבור החלופות המוצעות

	תפעול	תחזוקה	בטיחות	אמינות	משקל	מחיר	סה"כ ציון
משקל[%]	20	20	20	15	15	10	100
כבל בנג'י	80	80	60	75	90	80	76
קפיצים	80	60	65	65	90	85	72
פנאומטי	50	40	50	80	15	10	43

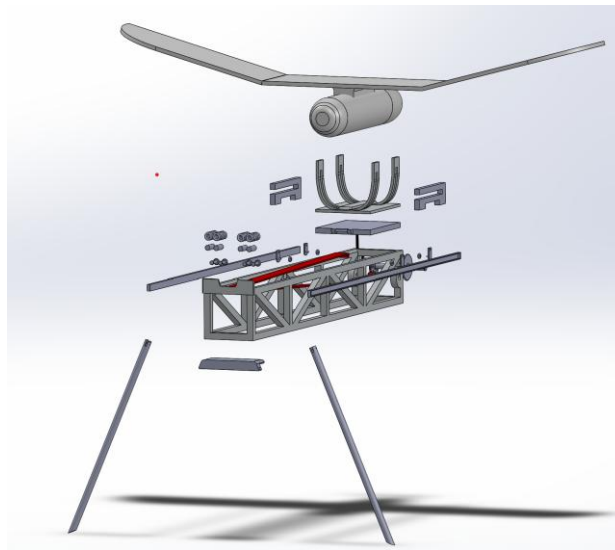
הפתרון שנבחר היא מערכת משגר קטפולטה המבוססת על מנגנון כבל בנג'י. מנגנון זה הינו אחד מבין המנגנונים הפשוטים שהוצעו מבין כלל החלופות, דבר המבטיח תפעול קל ואינטואיטיבי ותחזוקה פשוטה של המערכת. בנוסף הוא בעל אמינות גבוהה יחסית הנותן את האפשרות להשתמש בדגם מספר רב של פעמים ללא התעייפות יחסית למנגנון הקפיצים ועמיד בפני תנאי שטח שונים לכן מדובר על התחלופה המתאימה ביותר מבין השלוש.

## 5. תכן כללי של הפתרון (PDR)

בפרק התכן הראשוני של המוצר הנקרא PDR (preliminary design review) תוצג סקירה של רכיבי המוצר והרכבתו, ויבחן האם המוצר עומד בדרישות התכן ומסוגל להוביל לפתרון אמין ופרקטי מרמת הלקוח ועד רמת הייצור. באיור הבא מוצג הרכב המוצר המוגמר כאשר הוא טעון עם מזל"ט על גביו.

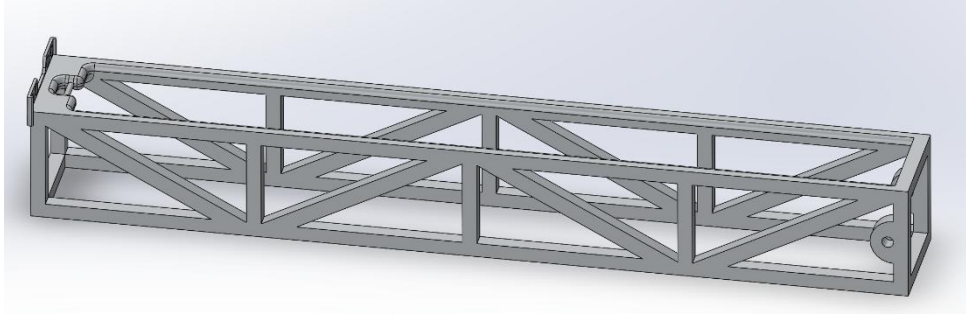


איור 4- הרכבה של הקטפולטה



איור 5- איור הרכבה מפוצץ של הקטפולטה

הקטפולטה מורכבת ממספר רכיבים עיקריים אשר מתחברים יחד. באיור הבא ניתן לראות את השלדה שהיא הבסיס של המוצר. בשלדה קיימים אזורים ייעודיים להתקנת שאר הרכיבים כגון, בולמי הזעזועים, גלגלת ההנעה וכבל הבנאי. בנוסף ניתן לראות כי השלדה מורכבת ממוטות היוצרים צורת משולשים מה שמקנה לה חוזק מפני כפיפה.



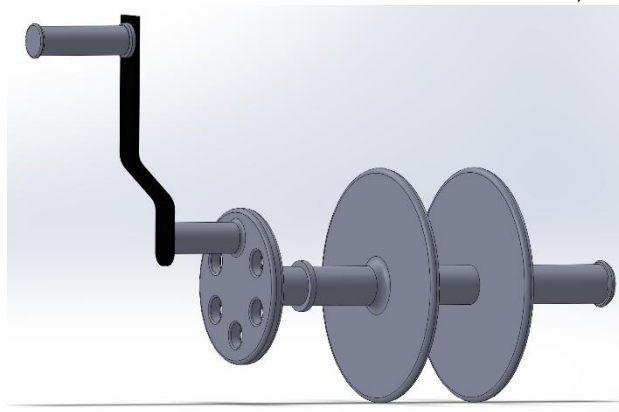
**איור 6- איור של השלדה**

באיור הבא ניתן לראות את הדורגלים. אלו הם בעצם שני מוטות שמיטתם להרים את השלדה לגובה הנדרש ליצירת זווית של 30 מעלות עם הקרקע, ולמתן נקודות אחיזה נוספות למען יציבות. הדורגלים מחוברים בעזרת פרפריות לשלדה כך שיוכלו להתפרק לנשיאה קומפקטית ונוחה של המוצר.



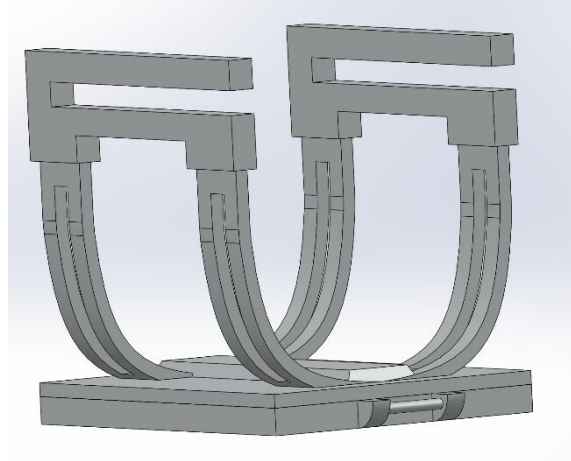
**איור 7- איור של הדורגלים**

לצורך מתיחת כבל הבנגיי ויצירת אנרגיה פוטנציאלית אגורה מספקת להנעת העגלה, גלגלת ההנעה ממוקמת בחלקו האחורי של השלדה לנוחות המפעיל. אל גלגלת ההנעה מחובר הראצ'ט אשר מונע שחרור מוקדם של הקפיץ ומאפשר טעינה נוחה וקלה.



**איור 8 - איור של גלגלת ההנעה**

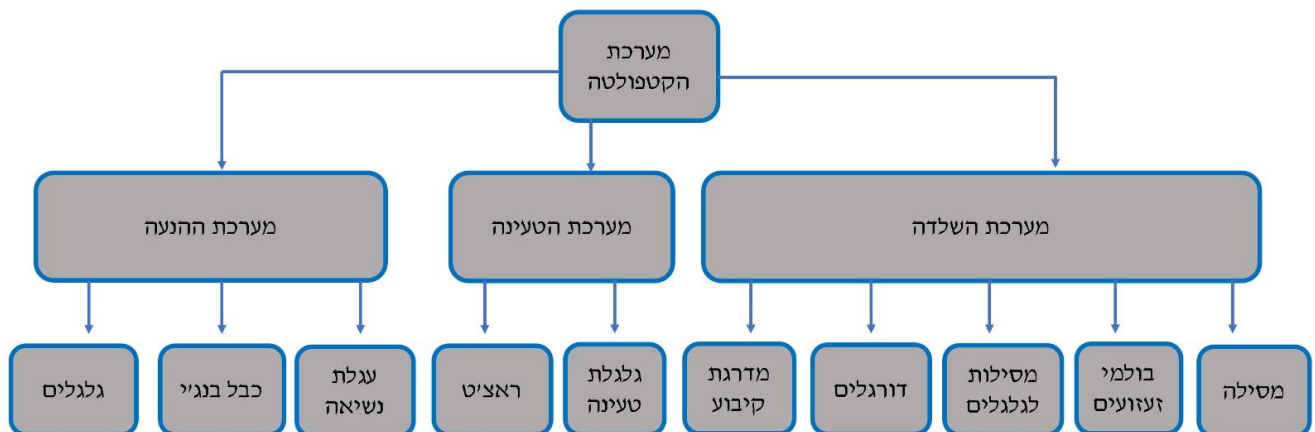
על גבי השלדה מורכבת עגלה לנשיאת מזל"ט. עגלה זו מונעת באמצעות הכוח האגור בקפיץ על סט גלגלים בתוך המסילה. לעגלה שני תופסנים אשר מחזיקים את כנפי המזל"ט כך שיוכלו להשתחרר קדימה ללא התנגדות אך מונעים תנועה אחורית לצורך האצת המזל"ט למהירות מספקת. תפיסת המזל"ט דרך הכנפיים מקנה תפיסה דרך מרכז המסה, דבר ההכרחי לשמירת יציבות ופילוג כוחות תקין בזמן השיגור.



איור 9- איור של עגלת הנשיאה של המזל"ט

## 5.1. עץ מוצר

להלן דיאגרמה המתארת את המכלולים השונים המרכיבים את מערכת הקטפולטה ואת הפריטים השונים המהווים את התכן של הפתרון.



איור 10- עץ מוצר של מוצר הקטפולטה

## 6. תכן מפורט של הפתרון (CDR)

בפרק זה יוצג התכן המפורט של הפתרון, בחירת חומרים והחישובים ההנדסיים העונים על שאלת עמידות המוצר לדרישות שהוצגו. מטרת סקר זה היא לבחון כי הפתרון המפורט ברמה המערכתית וברמת המכלולים עונה לדרישות המפרט וניתן לביצוע בתנאים הנתונים.

### 6.1. בחירת חומרים

מערכת הקטפולטה נדרשת לעמוד במספר דרישות שונות ולכן בהתאם לכך יש להתאים את החומר המתאים לכל חלק במערכת. לפיכך על מנת לבחור את החומרים המתאימים יש לבחון את מפרט הדרישות שתלויות בחומר:

- עמידות בפני תנאי סביבה שונים- חומר שעמיד לקורוזיה, ועומד בטווח טמפרטורות רחב.
- מערכת נוחה להתניידות- חומר בעל משקל נמוך, ופני שטח חלקים.
- תחזוק קלה ונוחה- חומר זמין וזול בשוק.
- עמידה בעומסים- החומר צריך להיות חזק ובעל יכולת לשאת את הכוחות המופעלים עליו, מבלי שיכשל.

החומר העיקרי ממנו תהיה בנויה הקטפולטה, ובפרט השלדה, הוא Aluminum 6061-T651. הסיבות לבחירת חומר זה היא כי הוא חומר זמין, בעל עמידות טובה לקורוזיה, קל משקל ובעל חוזק גבוה ולכן עונה על כלל הדרישות שפורטו לעיל. חומר זה ישמש גם להרכבת גלגלת ההנעה, הראצ'ט, ועגלת הנשיאה של המזל"ט [4].

החומר ממנו יורכבו קפיצי הלחיצה של בולמי הזעזועים הוא מסוג Stainless steel 431. הסיבה לבחירה זו היא בגלל עמידותו לקורוזיה, חוזק וקשיות גבוהים, חומר סטנדרטי בשוק ולכן גם זמין ובעל עלות נמוכה יחסית [5].

## 7. חישובים הנדסיים

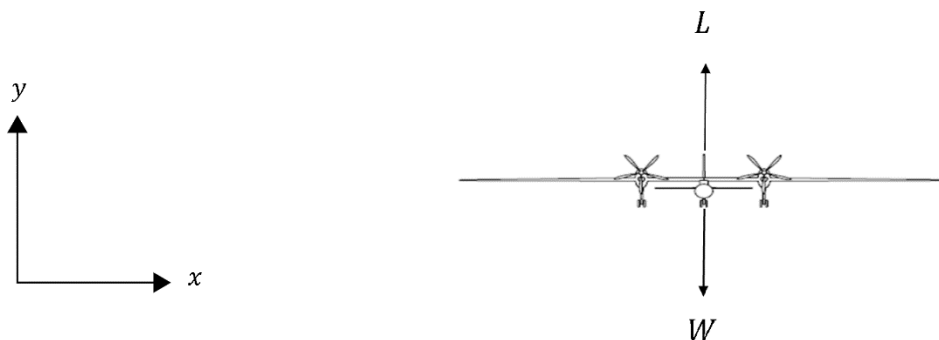
המערכת המתכוננת מיועדת לשיגור מזל"טים של עד 5 ק"ג. קיימות דרישות תכן הנדסיות אשר ההכרחיות לתפקוד תקין של המערכת שיפורטו בפרק זה.

### 7.1. הנחות

- אין הפסדי חיכוך במערכת הכוללת: גלגלים על המסילה, מזל"ט על העגלה, קפיץ על השלדה, גלגלי שיניים בראצ'ט, בולמי זעזועים, מזל"ט עם הסביבה.
- קיים שימור אנרגיה

### 7.2. חישוב מהירות ההמראה הדרושה

עבור חישוב מהירות ההמראה יש צורך להתייחס בכוחות הפועלים ביחס למרכז המסה של המזל"ט בזמן תעופה, תוך הנחה כי התאוצה היא קבועה.



איור 11- דיאגרמת כוחות על המזל"ט בזמן תעופה

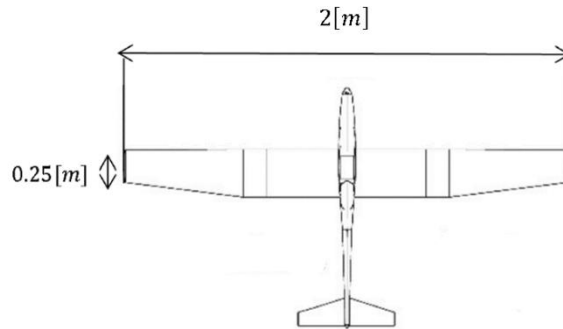
כאשר  $L$  מבטא את כוח העילוי הפועל כתוצאה מזרימת האוויר ו- $W$  הוא הכוח מתאוצת הכובד. מסכימת כוחות  $\sum F_y$  ניתן לראות כי כדי המזל"ט ישאר באוויר בתעופה על כוח העילוי להיות גדול/שווה לכוח הכבידה שפועל עליו.

$$\sum F_y = L - W = 0 \quad (1)$$
$$L = W$$

למציאת מהירות ההמראה הרצויה יש להשוואת בין כוח הכבידה לכוח העילוי הפועלים על המזל"ט כפי שמופיע במשוואה (1). חישוב כוח הכבידה יחשוב באופן הבא:

$$W = m \cdot g = 5 \cdot 9.81 = 49.05 [N] \quad (2)$$

כאשר  $m$  [kg] היא מסת המזל"ט ו- $g$   $\left[\frac{m}{s^2}\right]$  היא תאוצת הכובד. כוח העילוי המחושב תלוי בשטח הכנפיים של המזל"ט. הנתונים הגיאומטריים של המזל"ט מפורטים באיור הבא:



איור 12- נתונים גיאומטריים של המזל"ט

מאיור 12 נראה כי אורך כל כנף שווה ל-1[m] וכי רוחב הכנף שווה ל-0.25[m] לכן שטח הכנפיים המקורב בסה"כ יהיה שווה ל-0.5[m<sup>2</sup>]. כוח העילוי מחושב באמצעות הנוסחה הבאה:

$$L = C_L \cdot \rho \cdot A_W \cdot \frac{v^2}{2} = 1 \cdot 1.225 \cdot 0.5 \cdot \frac{v^2}{2} = 0.30625 \cdot v^2 \quad (3)$$

$C_L$  הוא מקדם העילוי וערכו שווה ל-1,  $\rho$  היא צפיפות האוויר,  $A_W$  [m<sup>2</sup>] הוא שטח הכנפיים ו- $V$  [m/sec] היא מהירות המזל"ט.

כעת מציבים את החישובים שהתקבלו במשוואות (2) ו-(3) למשוואה (1) שממנה תחולץ מהירות ההמראה המינימלית עבור נתוני המזל"ט הנתון:

$$W = L = 49.05 = 0.6125 \cdot \frac{v^2}{2} \quad (4)$$

$$v = 12.52 \left[ \frac{m}{sec} \right]$$

### 7.3 חישוב הכוח הדרוש מכבל הבנג'י בהתאם לאורך המסלול

חישוב כוח הכבל של המערכת מתבסס על העיקרון בו האנרגיה שיש להשקיע שווה לאנרגיה הקינמטית של המערכת כאשר מזניחים כוחות חיכוך היות וגודלם זניח. נציין כי עבור החישובים הללו הונח כי המזל"ט ממריא בדיוק בסוף מסלול ההמראה של הקטפולטה. חישוב מהירות המזל"ט יכול להתבצע לפי הקשר הקינמטי הבא:

$$v = \int a \, dt = a \cdot t \rightarrow t = \frac{v}{a} \quad (5)$$

$v$  [m/s] היא מהירות המזל"ט,  $a$  [m/s<sup>2</sup>] היא התאוצה ו- $t$  [s] הוא הזמן. נראה ממשוואה (5) כי קיים יחס ישר בין מהירות המזל"ט לזמן השיגור, דהיינו המזל"ט מתחיל ממנוחה ויגיע למהירות שיא בסוף המסלול.

אורך מסלול הקטפולטה (s) יכול להיחשב כדרך שהמזל"ט מבצע עד להמראה. לפיכך ניתן לחשב אותו באופן הבא תוך הצבת ביטוי ערך הזמן שחושב במשוואה (5):



$$s = \int a \cdot t \, dt = a \cdot \frac{t^2}{2} \quad (6)$$

ממשוואה (6) ניתן לחלץ את תאוצת המזל"ט:

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot s} \quad (7)$$

מאחר והתאוצה משתנה באופן לינארי על פי תצורת הפעולה של קפיץ הבנג'י, התאוצה שבה נשתמש תהיה ממוצע התאוצה מנקודת ההתחלה ועד הסיום.



איור 13- דיאגרמת כוחות על המזל"ט בזמן שיגור

$F$  הוא הכוח מכבל הבנג'י,  $N$  הוא כוח הנורמל מהמשטח,  $W$  הוא משקל המזל"ט ו- $\alpha$  היא זווית מסלול הקטפולטה. כוחות אלו הם ביחס למרכז המסה של גוף המזל"ט. מהאיור המוצג נראה כי תנועת המזל"ט על גבי מסלול השיגור היא בכיוון של מערכת הצירים הסובבת סביב ציר  $z$  בזווית  $\alpha$ .

כפי שצויין החומר שממנו מורכבת הקטפולטה ובפרט את עגלת השינוע הוא Aluminum 6061-T651 שצפיפותו שווה ל- $2700 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ . מסת העגלה מחושבת על פי הנפח שמתקבל בתוכנת Solidworks:

$$m_{\text{עגלה}} = V_{\text{עגלה}} \cdot \rho_{Al} = 0.0014[m^3] \cdot 2700 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 3.8[kg] \quad (8)$$

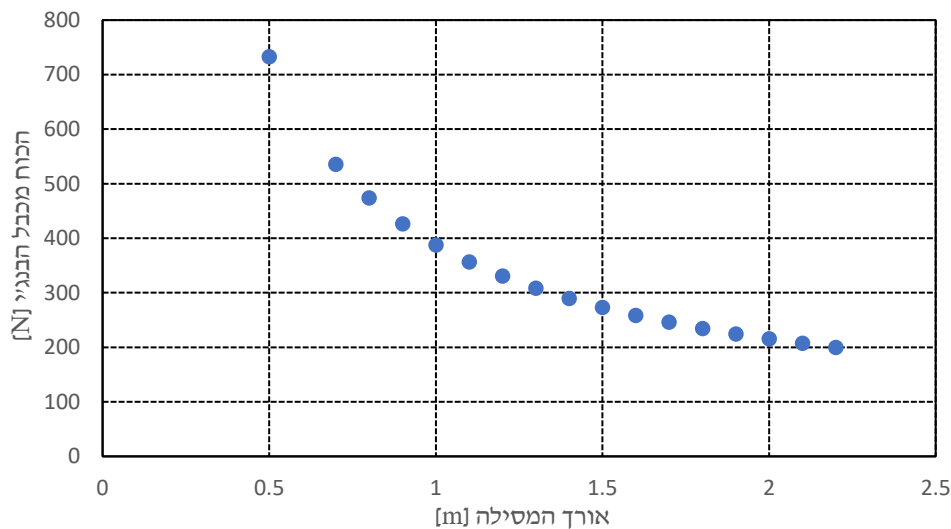
חישוב הכוח הפועל במערכת יתבסס על החוק השני של ניוטון:

$$\sum F = (m_{\text{מזל"ט}} + m_{\text{עגלה}}) \cdot a \quad (9)$$

ניתן לבצע חישוב זה עבור המערכת המסובבת, ובצורה כזו לחשב את הכוח שהכבל אמור להפעיל על מנת לשגר את המזל"ט ממצב מנוחה למהירות הסופית הנדרשת להמראה.

$$\begin{aligned} \sum F_{x'} = m \cdot a_{x'} &= m \cdot \frac{v^2}{4 \cdot s} + m \cdot 9.81 \cdot \sin \alpha = 8.8 \cdot \frac{12.52^2}{4 \cdot s} + 8.8 \cdot 9.81 \cdot \sin \alpha = \\ &= \frac{344.85}{s} + 86.32 \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

מסקר ספרות נמצא כי הזווית האופטימלית עבור שיגור מזל"ט דרך קטפולטה היא  $30^\circ$ . הצבת ערכי הפרמטרים השונים למשוואה (10) יביא למשוואה המקשרת בין כוח כבל הבנגיי לבין אורך המסילה. ניתן לראות את הקשר בין אורך המסילה לבין הכוח מכבל הבנגיי לפי הגרף הבא:



**גרף 1- הכוח מכבל הבנגיי כתלות באורך המסילה**

מהגרף עולה כי ככל שהמסילה ארוכה יותר כך הכוח הנדרש מהכבל קטן. לפיכך מהעולה מן הגרף כדי שהקטפולטה תהיה ניידת ויעילה נקבע כי אורך המסילה יהיה  $1.5 [m]$  לכן בהתאם למשוואה (10) הכוח שנדרש מהכבל הוא  $273.06 [N]$ .

#### **7.4. בחירת כבל הבנגיי**

ניתן ליחס לכבל הבנגיי תכונות דומות לקפיץ, לפיכך בחירת הכבל תתבסס על פי חישובים של חוק הוק למציאת מודול האלסטיות של הכבל.

תחילה הקפיץ במערכת רפוי וכפי שחושב בסעיפים הקודמים הכוח הממוצע שהקפיץ צריך להפעיל הוא  $273.06 [N]$ . עבור חישוב קבוע הקפיץ ילקח בחשבון הכוח המקסימאלי שערכו שווה ל-  $502.96 [N]$  (זהו הכוח שמתקבל במידה ולא נלקחת בחשבון התאוצה הממוצעת).

לחוזק הקפיץ נבחר כי הרוחב יהיה  $50 [mm]$  עם עובי של  $5 [mm]$  ואורך של  $3000 [mm]$ , וכי עובי מוט הגלגלת הוא  $20 [mm]$ . אחד עשר סיבובים של הגלגלת מביאים למתיחה של  $2418 [mm]$ .

חישוב מקדם הקפיץ יתבצע בעזרת חוק הוק:

$$k = \frac{F}{\Delta x} \quad (11)$$

כאשר  $k$  הוא קבוע הקפיץ,  $F$  הוא הכוח שמופעל על הקפיץ ו- $\Delta x$  היא תזוזת הקפיץ.

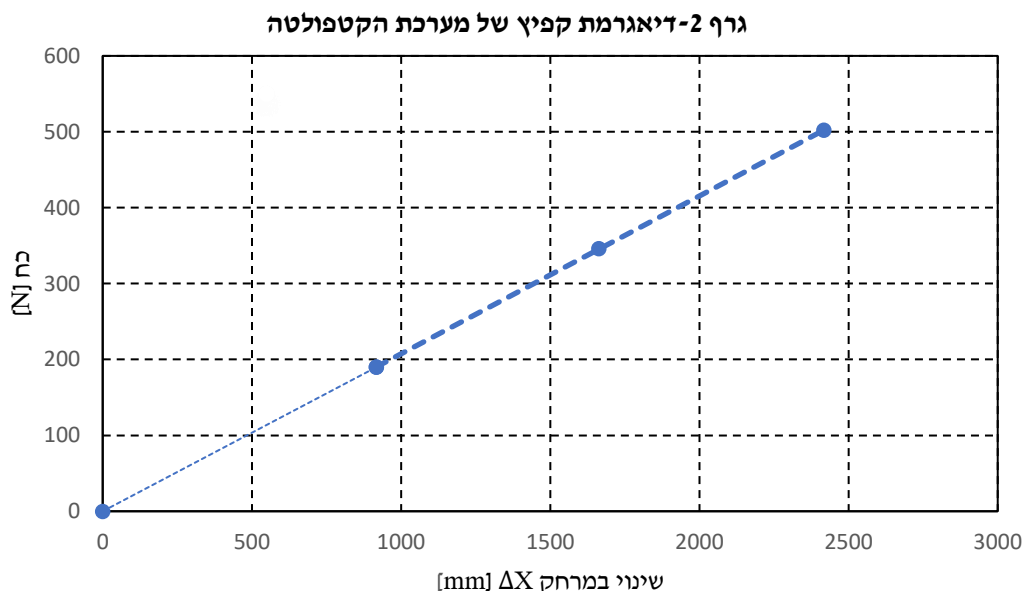
להלן חישוב מתיחת הקפיץ:

$$\Delta x = 10 \cdot 2 \cdot \pi + 15 \cdot 2 \cdot \pi + \dots 60 \cdot 2 \cdot \pi = 2418 [mm] \quad (12)$$

מתוך משוואות (11) ו-(12) יתקבל:

$$k = \frac{502.96}{2418} = 0.208 \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad (13)$$

היות ואורך הקורה הוא  $1500 [mm]$  קיימת מתיחות התחלתית של  $918 [mm]$ . להלן דיאגרמת קפיץ עבור מערכת זו:



כפי שניתן לראות בגרף 2, החלק הפעיל בקפיץ הוא החלק המודגש, ואילו החלק שלא מודגש הוא החלק בקפיץ שאינו פעיל. הכוונה היא שתחום זה של הקפיץ איננו בא לידי שימוש, מכיוון שהקפיץ לא מגיע לשינוי באורכים אלו גם לאחר שחרור הקפיץ שמתבצע לאחר ההמראה וניתוק המזל"ט. תכנון הקפיץ נעשה כך שקבוע הקפיץ יעבוד בכוחות קרובים יחסית, זאת על מנת לקבל כוח אחיד לאורך כל תנועת העגלה על המסילה. בנוסף כפי שרואים בבירור בגרף, מתיחת הקפיץ אינה מגיעה למצב של רפיון או אפילו קרוב לכך, בצורה זו נשמרת ההעברה של אנרגיה ככל הניתן עד לניתוק גמור של המזל"ט.

## 7.5. חישוב המומנט מידית ההנעה

כדי לדעת את המידות הדרושות עבור ידית ההנעה יש להכיר קודם את המומנט שנדרש להפעיל ממנה. עבור החישובים הללו ניקח בחשבון את הכוח שנדרש להפעיל כפי שחושב בסעיפים הקודמים.

אדם ממוצע יכול להפעיל בסביבות  $10[kg]$  ולכן הכוח שנגזר מכך הוא :

$$F_{human} = 10 \cdot 9.81 = 98.1[N] \quad (14)$$

היות ומומנט מוגדר כמכפלת הכוח באורך הזרוע ניתן למצוא את רדיוס ידית ההנעה הדרוש כיחס ההופכי בין הכוחות השונים כפי שנראה בחישוב הבאה :

$$M_{catapult} = M_{human} \quad (15)$$

$$F_{catapult} \times R_{pulley} = F_{human} \times R_{drive\ handle} \rightarrow \frac{F_{catapult}}{F_{human}} = \frac{R_{drive\ handle}}{R_{pulley}}$$

להלן חישוב יחס הרדיוסים הדרוש להפעלת הכוח :

$$\frac{F_{catapult}}{F_{human}} = \frac{273.06}{98.1} = 2.78 \quad (16)$$

ניתן להתייחס ל- $R_{pulley}$  כאל הרדיוס שנוצר מהכבל והגלגלת יחד בעת הפעלת הכוח הסופי. מתוך משוואות (15) ו-(16) יתקבל כי :

$$R_{pulley} = 50[mm] \rightarrow R_{drive\ handle} = 50 \cdot 2.78 = 139[mm] \quad (17)$$

## 7.6. בלימת זעזועים

בהגעת מתקן הנשיאה של המזל"ט לסוף המסלול נאגר כוח רב במתקן הנשיאה. כדי שחלק זה לא ישבר לאחר מספר שימושים בעקבות המכה מוקמו בולמי זעזועים עם קפיצי לחיצה מסוג Stainless steel 431 בסוף המסלול, באופן כזה שהגלגלים הנעים במסילה לא יתנגשו גם כן בסופה. על מנת לבדוק אם בולמי הזעזועים מתאימים למערכת נעשו החישובים הבאים.

הכוח שבולמי הזעזועים צריכים "לספוג" נובע מהאנרגיה הקינטית שנאגרה במתקן הנשיאה. לפיכך קיים שימור אנרגיה בין האנרגיה הקינטית של המתקן לבין האנרגיה האלסטית של הקפיצים. היות וקיימים ארבעה קפיצים לבלימת הזעזוע משוואת שימור האנרגיה תיראה בצורה הזאת :

$$E_{kinetic} = E_{elastic} \rightarrow \frac{mv^2}{2} = 4 \cdot \frac{k \cdot \Delta x^2}{2} \quad (18)$$

חישוב קבוע הקפיץ של קפיץ הלחיצה התבצע בעזרת הנוסחה הבאה :

$$K = \frac{d \cdot G}{8 \cdot Na \cdot C^3} \quad (19)$$

כאשר  $d$  הוא קוטר התיל,  $G$  הוא מודול הגזירה,  $Na$  הוא מספר הכריכות הפעילות ו- $C$  הוא יחס הקטרים בין הקוטר הנומינלי ( $D$ ) לקוטר התיל.

קוטר התיל הוא  $5 [mm]$ , הקוטר הנומינלי שווה ל- $23 [mm]$  ומודול הגזירה  $79 [GPa]$ . מציאת מספר הכרוכות הפעילות יעשה בעזרת הטבלה הבאה :

Term	Type of Spring Ends			
	Plain	Plain and Ground	Squared or Closed	Squared and Ground
End coils, $N_e$	0	1	2	2
Total coils, $N_t$	$N_a$	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Free length, $l_0$	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Solid length, $l_s$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$
Pitch, $p$	$(l_0 - d)/N_a$	$l_0/(N_a + 1)$	$(l_0 - 3d)/N_a$	$(l_0 - 2d)/N_a$

איור 14- טבלת נתונים עבור סוגי סיומות שונים של קפיצים

על פי סקר הספרות שנערך מומלץ להשתמש בקפיץ לחיצה עם סיומת סגורה (*Squared or closed*) עבור בולם זעזועים [7]. מספר הכריכות הכולל ( $N_t$ ) של הקפיץ הוא 7 ולכן מספר הכריכות הפעילות שווה ל-5.

אורך הקפיץ במצב כיווץ לפי איור 14 :

$$l_s = d(N_t + 1) = 7 \cdot (7 + 1) = 56 [mm] \quad (20)$$

לפיכך אם אורך הקפיץ הרפוי שווה ל- $90 [mm]$  הכיווץ המקסימאלי שמתאפשר הוא  $34 [mm]$ .

למציאת קבוע הקפיץ הוצבו כלל הערכים שהוצגו למשוואה 19 :

$$K = \frac{7[mm] \cdot 79 \cdot 10^9 [Pa]}{8 \cdot 5 \cdot \left[\frac{23}{7}\right]^3} = 389,740.69 \left[\frac{N}{m}\right] \quad (21)$$

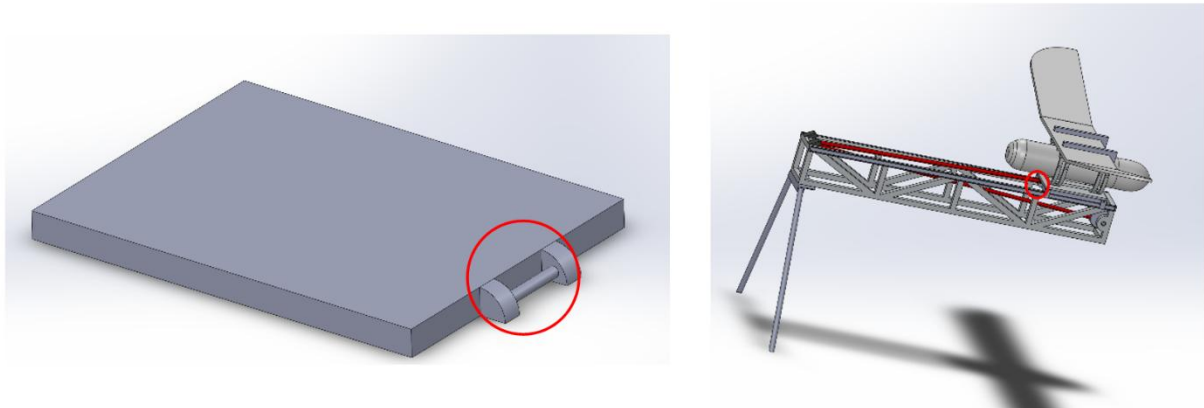
הצבת קבוע הקפיץ למשוואה 18 :

$$\frac{8.8[Kg] \cdot 12.52^2 \left[\frac{m^2}{s^2}\right]}{2} = 4 \cdot \frac{340,406.42 \left[\frac{N}{m}\right] \cdot \Delta x^2}{2} \rightarrow \Delta x = 0.029[m] \quad (22)$$

הכיווץ של כל אחד מקפיצי הלחיצה שווה ל- $29 [mm]$  ולכן הם עומדים בדרישות שניתנו.

## 7.7. חישובי חוזק

מערכת הקטפולטה נדרשת לעמוד בעומסים הנתונים עליה וכן בכוחות הנובעים מכבל הבנגיי. לפיכך יש לבדוק האם המערכת ובעיקר החלקים עליהם מופעל הכוח המירבי יכולים לעמוד בעומס מבלי שהחומר ייכנע. כעת נבחן את הנקודות החשודות לכשל במערכת, זאת באמצעות שימוש בנוסחת  $\text{von - mises}$ . מהשרטוט הכללי ניתן לראות כי כבל הבנגיי מפעיל את הכוח המירבי על החלק שנושא את עגלת הנשיאה של המזל"ט כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 15- איור ימני: מיקום החלק בשרטוט הכללי, איור שמאלי: איור החלק עם הדגשת האזור החשוד לכשל

הכוח שמופעל על החלק הזה הוא מאמצי גזירה אותם ניתן לחשב לפי הנוסחה הבאה:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (23)$$

כאשר  $\tau$  מייצג את מאמצי הגזירה,  $F$  הוא הכוח שמופעל ו- $A$  הוא שטח החתך.

במערכת הקיימת ישנם שלושה מוטות כאלה (בהם כבל הבנגיי עובר), לפיכך אנו בודקים את עמידות החלק על המוט הצר מבין השלושה. שטח החתך של המוט הוא:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 4^2 = 16\pi [mm^2] \quad (24)$$

הכוח שילקח בחשבון עבור החישוב הנ"ל הינו הכוח המקסימאלי שמופעל מכבל הבנגיי ולכן:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{502.96}{16\pi} = 9.98 [MPa] \quad (25)$$

היות ולא מופעלים מאמצים ציריים כך מתקבלת משוואת וון-מיזס:

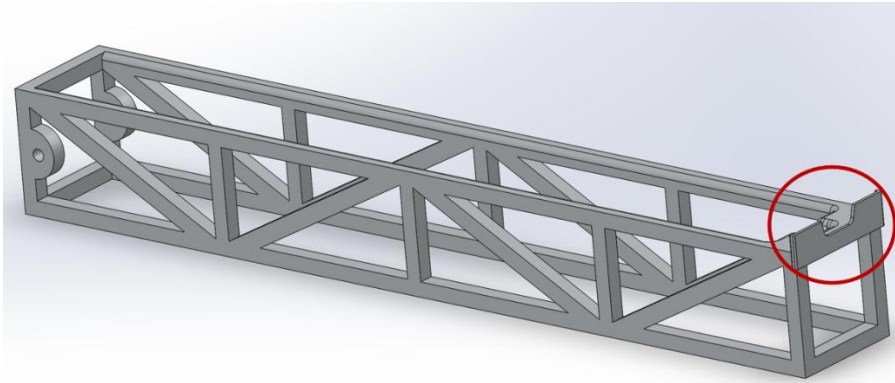
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \leq \frac{S_y}{n} \rightarrow \sqrt{3} \cdot \tau \leq \frac{S_y}{n} \quad (26)$$

כאשר  $s_y$  הוא מאמץ הכניעה של החומר ו- $n$  הינו מקדם הביטחון. החומר ממנו החלק עשוי הוא Aluminum 6061-T651 ולכן מאמץ הכניעה שווה ל-  $[276 \text{ MPa}]$  [5]. להלן הצבת הערכים הללו למשוואה 26 :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot 9.98 \leq \frac{276}{n} \rightarrow n \leq \frac{276}{17.28} = 15.96 \quad (27)$$

ככל ש- $n$  גדול יותר המערכת רחוקה יותר מכשל, ולכן היות והתקבל מקדם ביטחון גדול מאוד ניתן לומר כי לא קיים חשש לכשל. בנוסף הבדיקה נעשתה בנקודה הכי מועמסת והכי חלשה מבחינת המידות, ובכך נמצא כי החלק עומד במאמצים הנתונים עליו במערכת.

חלק נוסף שיש לבדוק את עמידותו לחוזק הוא החלק הבא :



#### איור 16- איור של השלדה עם הדרגת האזור החשוך לכשל

באזור שמוצג באיור 16 נוצרים כוחות גזירה על שטח החתך בעקבות הכוח שנוצר מהתנגשות עגלת הנשיאה יחד עם המזל"ט בבולמי הזעזועים. ניתן לחשב את הכוח על פי הכיווץ של בולמי הזעזועים שחושב בפרק הקודם. קבוע הקפיץ של בולמי הזעזועים חושב גם כן ולכן על פי חוק הוק הכוח שנוצר מהתנגשות הוא :

$$F = k \cdot \Delta x \rightarrow 389.74 \left[ \frac{N}{mm} \right] \cdot 29[mm] = 11,302.46[N] \quad (28)$$

היות וקיימים 4 בולמי זעזועים הכוח הכולל שווה פי 4 מהכוח שחושב :

$$F = 4 \cdot 11,302.46 = 45,209.84[N] \quad (29)$$

חישוב שטח החתך של החלק המודגש באיור 16 :

$$A = 5 \cdot 210 = 1050[mm^2] \quad (30)$$

כוח הגזירה שנוצר מחושב באופן הבא :

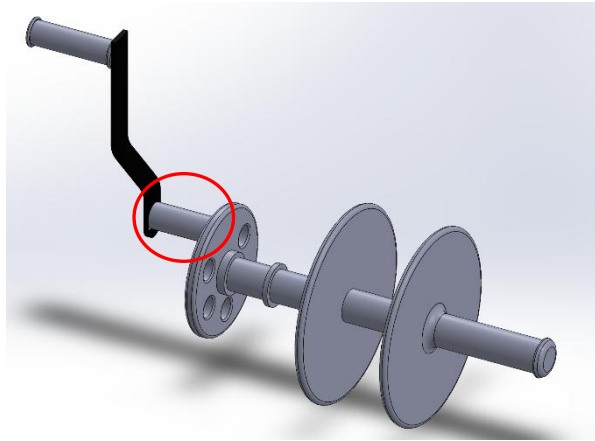
$$\tau = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{45,209.84}{1050} = 43.05[MPa] \quad (31)$$

על החלק המדובר לא מופעלים כוחות ציריים ולכן כך מתקבלת משוואת וון-מיזס :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \tau \leq \frac{s_y}{n} \rightarrow n \leq \frac{276}{74.57} = 3.7 \quad (32)$$

כפי ניתן לראות ממשוואה 32 מקדם הביטחון שהתקבל גדול מספיק ולכן לא קיים חשש לכשל עבור החלק הנ"ל.

חישוב חוזק הכרחי נוסף מגיע מידית ההנעה באזור בו מתבצע פיתול כפי שניתן לראות באיור הבא :



**איור 17- איור של ידית ההנעה עם הדגשת האזור החשוך לכשל**

כפי שניתן לראות באיור 17 נוצרים מאמצי גזירה הנובעים מפיתול באזור במודגש. מאמצי גזירה מקסימליים מפיתול מחושבים באופן הבא :

$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (33)$$

כאשר  $T$  הוא מומנט הפיתול,  $D$  קוטר המוט ו  $\tau_{max}$  הוא מאמץ הגזירה המקסימלי.

$$T = r \cdot F = 115[mm] \cdot 981[N] = 112,815 \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad (34)$$

כאשר  $r$  זהו הזרוע ממיקום הפעלת הכוח על ידי האדם עד למרכז המוט המתחבר לגלגלת, ו- $F$  מבטא את הכוח המקסימלי אותו אדם מסוגל להפעיל בצורה נוחה (כפי שחושב במשוואה 14). בהצבת הנתונים שהתקבלו למשוואה 33 ניתן לקבל את מאמץ הגזירה המקסימלי :

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot 112,815}{\pi 16^3} = 140.27[MPa] \quad (35)$$

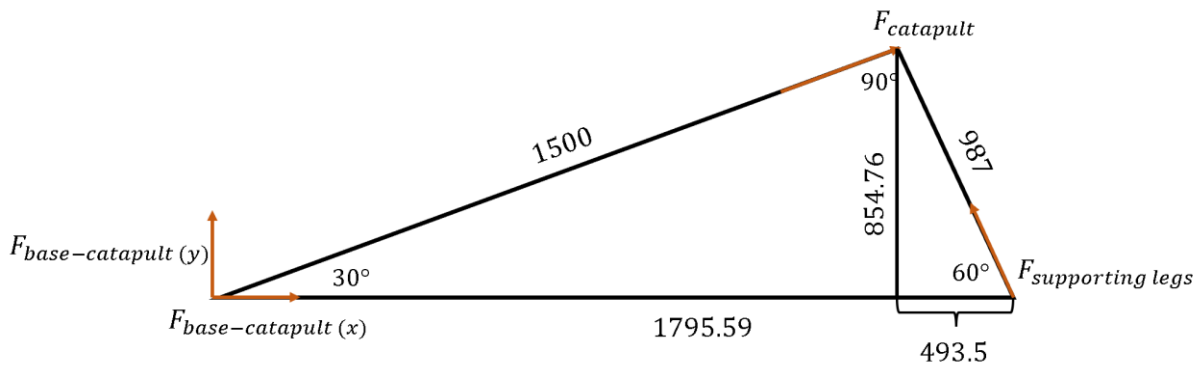
הצבת ערך מאמץ הגזירה שהתקבל במשוואה 35 למשוואת וון-מיזס מתוך הנחה כי לא קיימים כוחות ציריים על החלק יביא לחישוב הבא :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \tau \leq \frac{s_y}{n} \rightarrow n \leq \frac{276}{242.95} = 1.13 \quad (36)$$

הערך שהתקבל עבור מקדם הביטחון ממשוואה 36 גדול מספיק לכן ניתן לומר כי חלק זה עומד בדרישות.



כדי לבדוק אם הקטפולטה עצמה עומדת בפני כוח ההדף שנוצר בעת שיגור המזל"ט נעשו חישובים מתאימים המתבססים על דיאגרמת הכוחות המופיעה באיור הבא :



איור 18- דיאגרמת כוחות על הקטפולטה

ניתן לחשב את הכוח שמופעל בבסיס הקטפולטה באמצעות שלוש משוואות שיווי משקל של המערכת. עבור החישובים הבאים נלקח הכוח המקסימאלי שמופק מההדף כפי שחושב במשוואה 29 :

$$\sum F_x = F_{base\_x} - F_{legs} \cdot \cos(60) + 45,209.84 \cdot \cos(30) = 0 \quad (37)$$

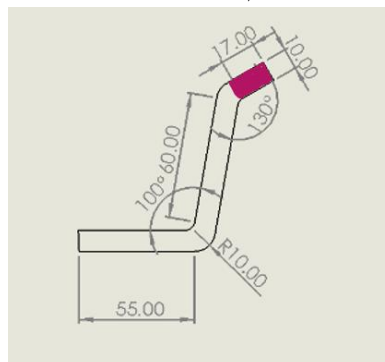
$$\sum F_y = F_{base\_y} + F_{legs} \cdot \sin(60) + 45,209.84 \cdot \sin(30) = 0 \quad (38)$$

$$\sum M_{legs} = -1795.59 \cdot F_{base\_y} - 493.5 \cdot 45,209.84 \cdot \sin(30) - 854.76 \cdot 45,209.84 \cdot \cos(30) = 0 \quad (39)$$

מחישוב המשוואות 37-39 התקבל כי הכוח מבסיס הקטפולטה בכיוון השלדה שווה ל- $44,387.39[N]$ . כפי שמופיע באיור 4 קיים חלק בבסיס הקטפולטה שמטרתו להרים את אותה כדי שבסיס המזל"ט לא יתנגש עם הקרקע, בנוסף הוא מסיע בקיבוע הקטפולטה לקרקע באמצעות שני פתחים דרכם יתדות. כדי לבדוק האם החלק עומד בדרישות נעשו עליו מספר חישובי חוזק שונים.

#### 7.7.1 כוחות מתיחה

חישוב כוח המתיחה נעשה על החיבור של הקטפולטה עם חלק מדרגת הקיבוע. באזור המודגש הכוח מקביל לכיוון השלדה ולכן הכוח שמתקבל הוא הכוח המקסימאלי.



איור 19- איור של שרטוט חלק מדרגת הקיבוע עם החלק עליו מחושבים כוחות המתיחה

כוחות מתיחה מחושבים באמצעות הנוסחה הבאה :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (40)$$

כאשר  $A$  הוא שטח החתך ו- $F$  הוא הכוח הפועל על שטח החתך.

חישוב שטח החתך של החלק המודגש נעשה באופן הבא :

$$A = 200 \cdot 10 = 2000[mm^2] \quad (41)$$

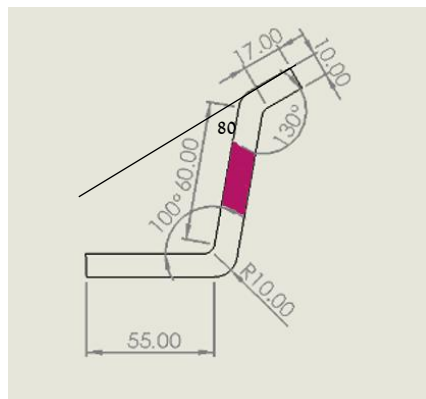
חישוב מאמץ המתיחה :

$$\sigma = \frac{44,387.39}{2000} = 22.19[MPa] \quad (42)$$

היות ומאמץ הכניעה של החלק הוא  $276[MPa]$  החלק עומד בדרישות התקן לכוח מתיחה.

### 7.7.2. כוח גזירה

חישוב כוח הגזירה מתבצע על החלק האלכסוני של חלק ההרמה כפי שמודגש באיור הבא.



איור 20- איור של שרטוט חלק מדרגת הקיבוע עם החלק עליו מחושבים כוחות גזירה

כוח הגזירה עבור חלק זה מחושב באופן הבא :

$$\tau = \frac{F \cdot \sin(80)}{A} \quad (43)$$

חישוב שטח החתך של החלק המודגש נעשה באופן הבא :

$$A = 200 \cdot 10 = 2000[mm^2] \quad (44)$$

חישוב כוח הגזירה :

$$\tau = \frac{44,387.39 \cdot \sin(80)}{2000} = 21.85[MPa] \quad (45)$$

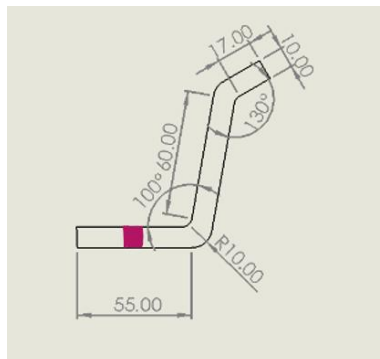
להלן חישוב לפי משוואת וון מיזס עבור המאמץ האקוויולנטי בחלק המודגש :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \rightarrow \sqrt{3} \cdot \tau = 37.85[MPa] \quad (46)$$

היות וגם בחישוב זה המאמץ שהתקבל קטן ממאמץ הכניעה ניתן לומר כי החלק עומד בדרישות התקן לכוח גזירה.

### 7.7.3. כוח גזירה על המסמרות

חישוב כוח הגזירה על מסמרות התבצע לפי שטח החתך של 2 המסמרות הנתונות ללחצי גזירה.



איור 21- איור של שרטוט חלק מדרגת הקיבוע עם החלק עליו מחושבים כוחות גזירה על מסמרות

כוח הגזירה על שתי המסמרות מחושב באופן הבא :

$$\tau = \frac{F \cdot \cos(30)}{2 \cdot A} \quad (47)$$

שטח החתך עבור פתח של מסמרה אחת מחושב באופן הבא :

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 10^2 = 100\pi[mm^2] \quad (48)$$

חישוב מאמץ הגזירה על שתי המסמרות מחושב :

$$\tau = \frac{44,387.39 \cdot \cos(30)}{2 \cdot 100\pi} = 61.18[MPa] \quad (49)$$

חישוב המאמץ לפי משוואת וון מיזס עבור מאמץ גזירה בחלק המודגש :

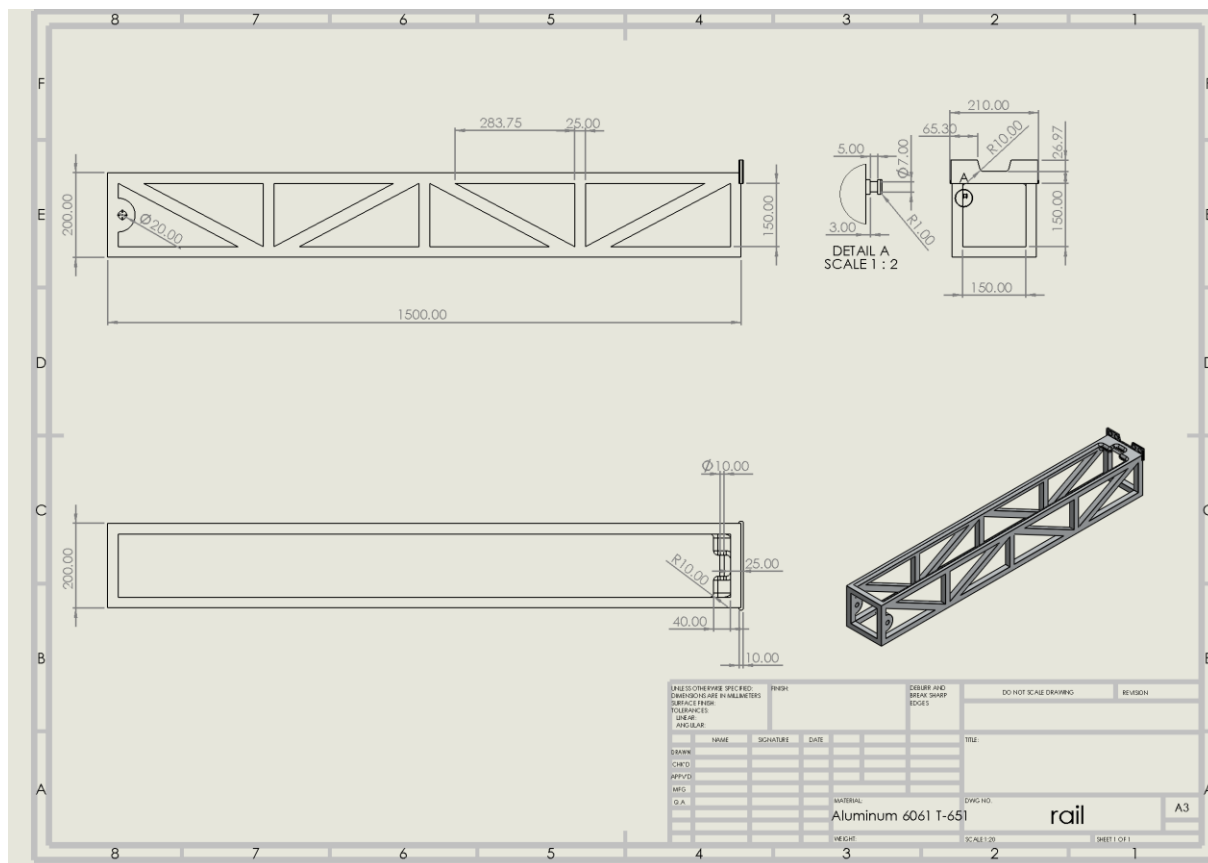
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{3} \cdot \tau = 105.96[MPa] \quad (46)$$

המאמץ שהתקבל מהחישוב קטן ממאמץ הכניעה לכן ניתן לומר כי החלק עומד בדרישות התקן לכוח גזירה.

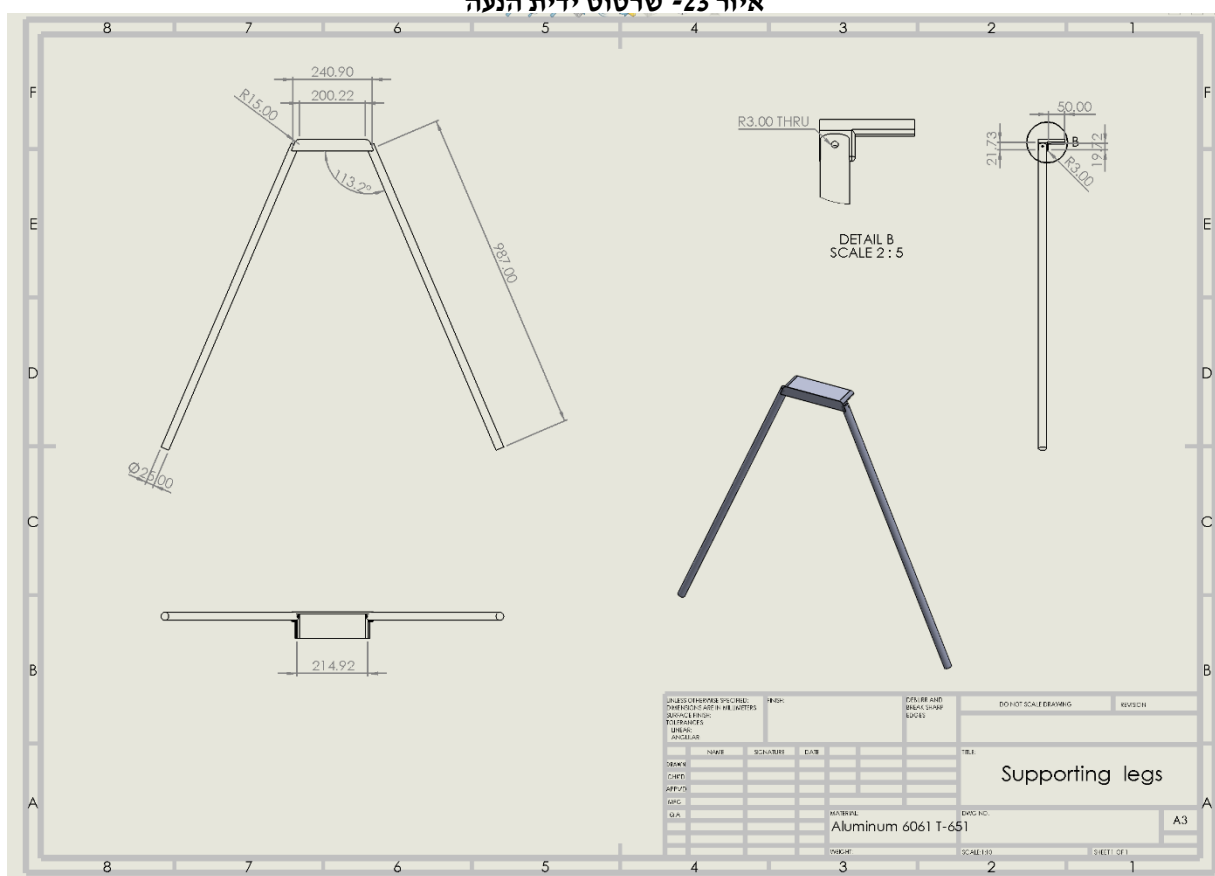
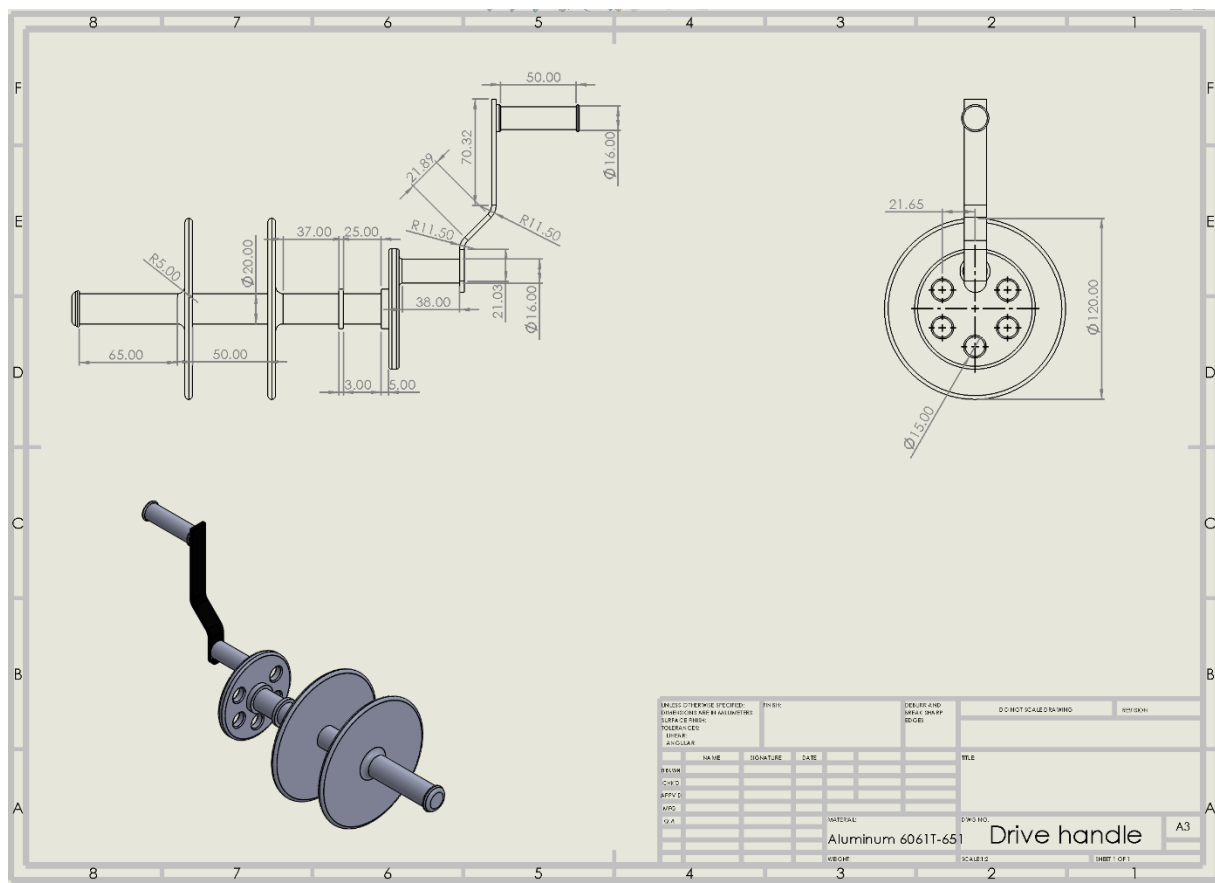
## 8. תיק יצור

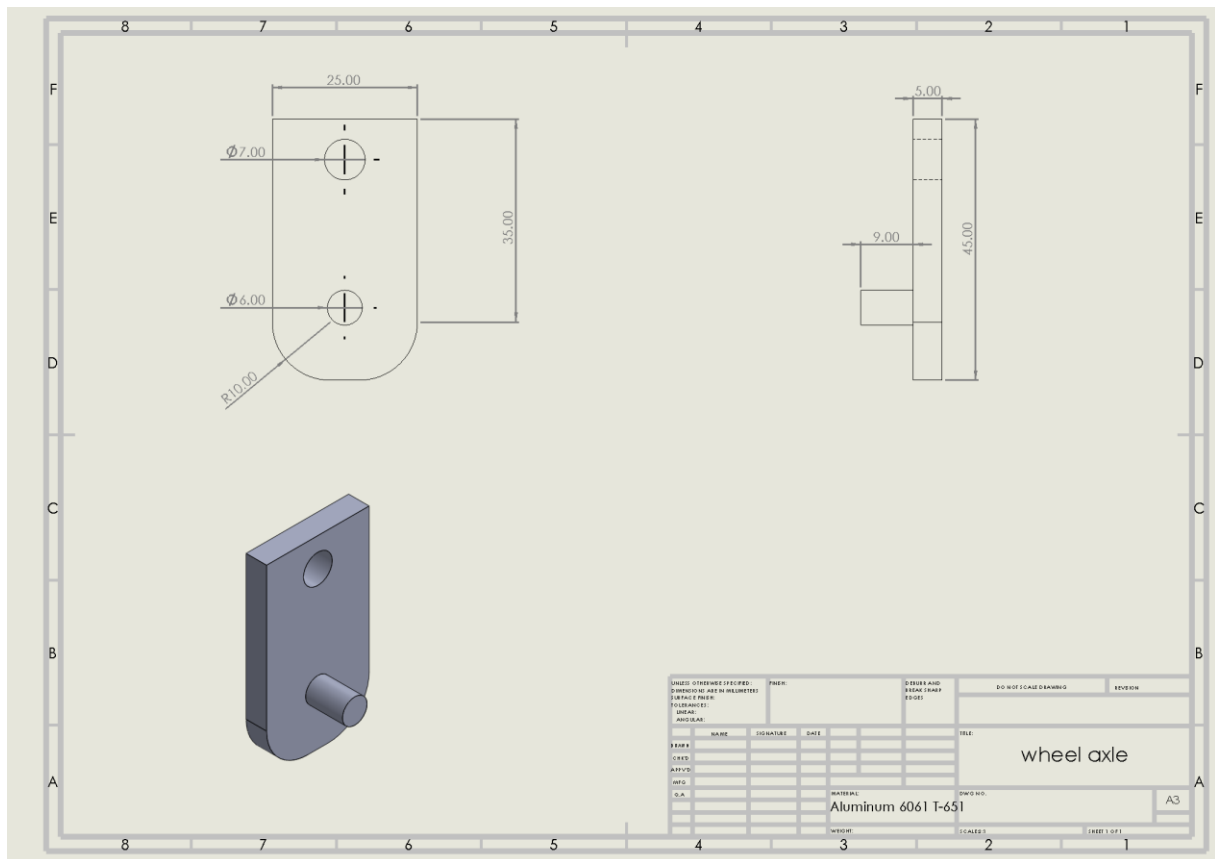
בפרק זה יוצג תיק הייצור המורכב מגיליונות שרטוט של מערכת הקטפולטה עם כל חלק בנפרד בעזרת תוכנת Solidworks ושרטוט ההרכבה השלם של הקטפולטה. היחידות שמצויינות הן במילימטרים.

### 8.1. שרטוט חלקים

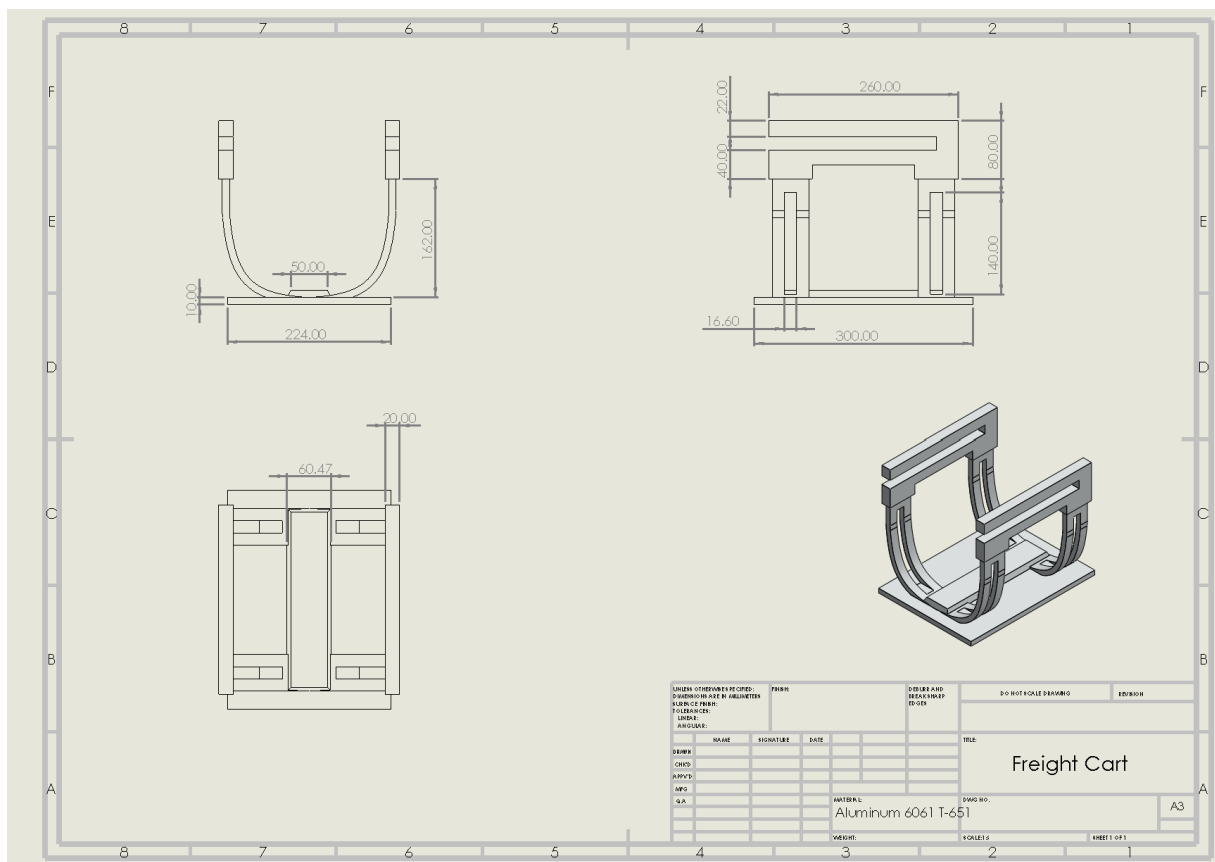


איור 22- שרטוט השלדה





איור 25- תופסן גלגל

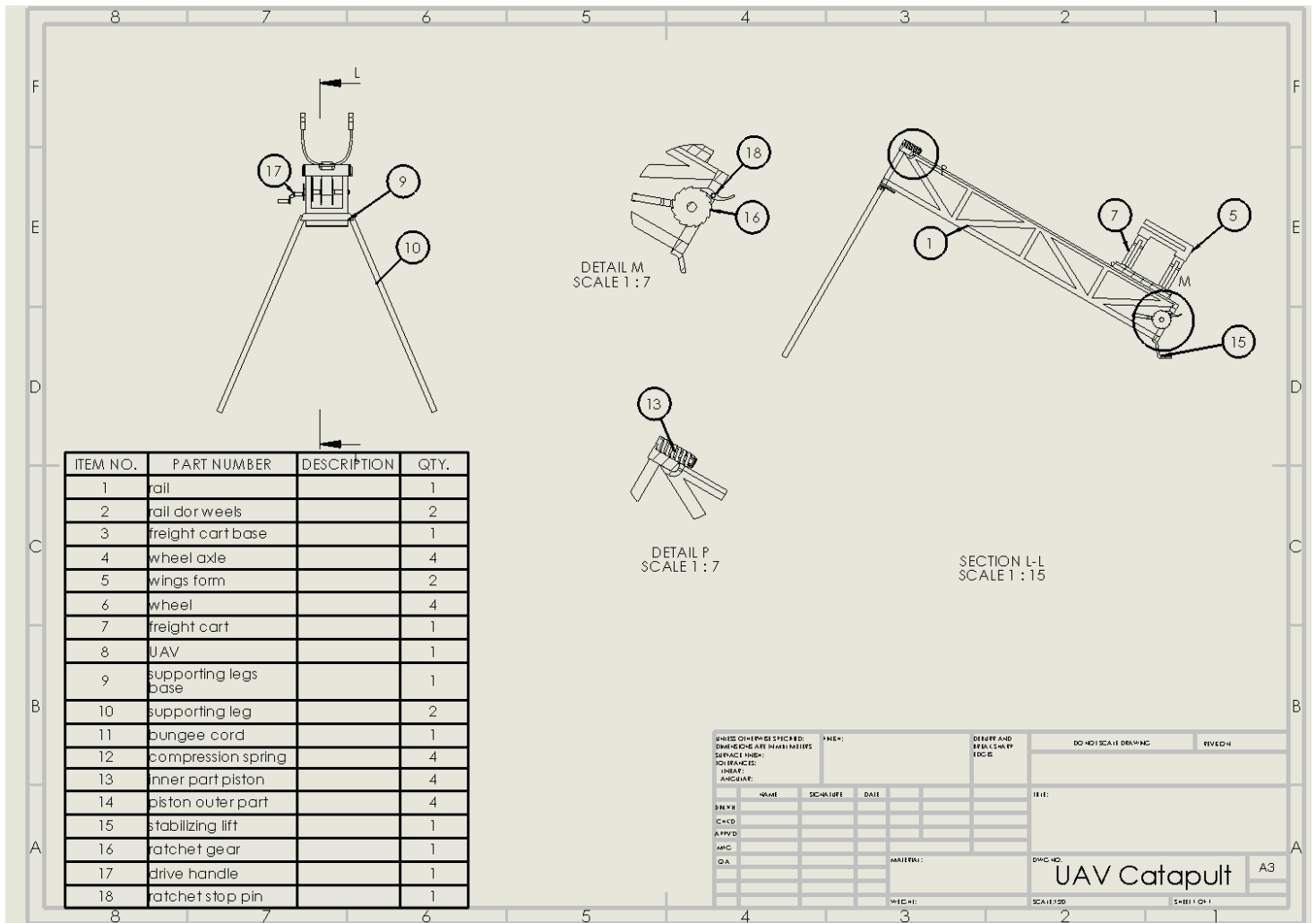


איור 26- עגלת נשיאה



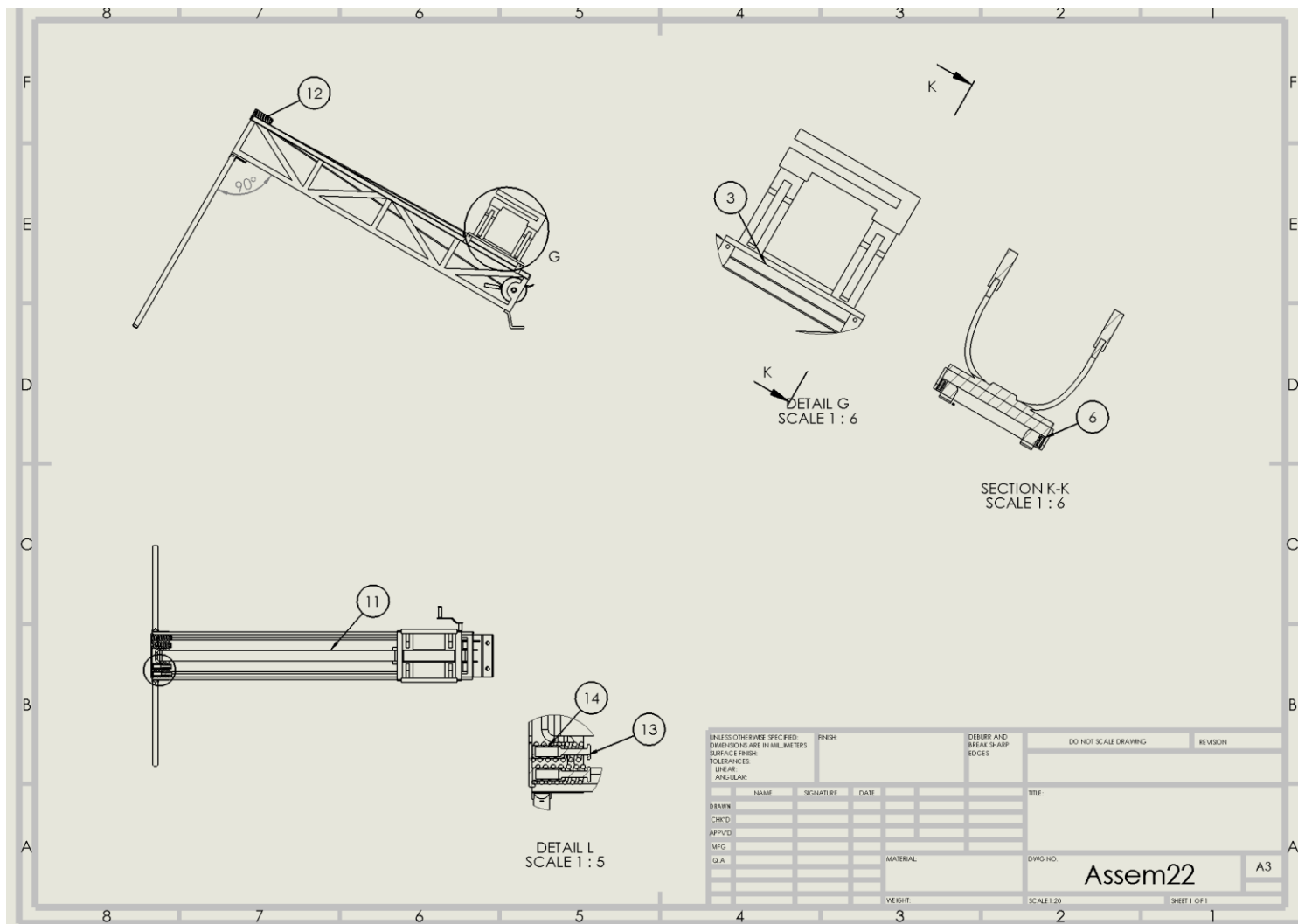
## 8.2. שרטוט הרכבה

באיורים 24 ו-25 מוצגים שרטוטי ההרכבה של הקטפולטה.



איור 28- שרטוט הרכבה של הקטפולטה ממבט פנים עם חתך L-L





איור 29- שרטוט הרכבה של הקטפולטה ממבט צד ומבט על עם חתכים

## 9. תרשים עלויות

להלן טבלה המציגה את מפרט עליות החומרים המשמשים להרכבת המזלט. יצויין כי קיימים חלקים שנקנים כמוצר סופי.

**טבלה 2- מפרט עליות חומרים**

חומר/מוצר	מחיר	כמויות נדרשות	סה"כ
כבל בנגיי	\$5-1.75 (למטר)	3 מטר	\$15-5.25
בולמי זעזועי (קפיץ ובוכנה)	\$120-70 (ליחידה)	4	\$480-280
גלגלים	\$40-20 (לסט של 4)	1	\$20-40
ראציט	\$45-25 (ליחידה)	1	\$45-25
קורות אלומיניום Aluminum 6061 T-651	\$5-2.8 (לק"ג)	20 (ק"ג)	\$100-56

מהעולה מן הטבלה המחיר עבור ייצור הקטפולטה נע בין \$406.25-660.

## 10. סיכום

בפרויקט זה תוכננה מערכת מכאנית ניידת לשיגור והטסה של מזל"טים במשקל נמוך. שלבי התכנון של המערכת כללו הגדרת הבעיה הקיימת, סקירה נרחבת של מנגנונים קיימים בשוק ותצורות שונות לפתרון הבעיה אשר חלקן הוצגו כחלופות אפשריות תוך התחשבות בחסרונות שלהן. מתוך המחקר הושג הסכם כולל לתצורת המוצר ורכיביו אשר מופיע בשלב הPDR. בשלב הCDR בעזרת המרצה המנחה ותוך שימוש בנוסחאות ותיאוריה שנלמדו בקורסי קדם, נעשה תכנון של פרטי המוצר תוך התחשבות בשיקולי אנרגיה וכוחות לרמת גימור גבוהה ופרקטית. עם זאת מאחר והפרויקט הינו מורכב, נעשו מספר הנחות והזנחות על מנת להקל על החישובים הדרושים. בהתאם לזאת נבחרו חומרים העונים על דרישות המוצר וכן על דרישות הלקוח. לאחר ביצוע החישובים הנדרשים הוצג תיק ייצור המכיל שרטוטים עבור כל חלק בנפרד והסבר על אופן הרכבתם. מתוך תכנון ועשיית פרויקט זה אפשר ללמוד רבות על חשיבות תהליך התכנון של מוצר ועל השיקולים והדקויות הרבות שצריך להתחשב בהם כגון: בחירת סוג חומר, התאמה וממשק בין החלקים, מחיר הרכיבים והימצאותם וזמינותם בשוק וכו'.

## 11. מקורות

[1] קטפולטה פנאומטית

<https://www.aeroexpo.online/prod/uav-factory-ltd-europe/product-174156-63525.html>

[2] קטפולטה קפיץ

<https://techlinkcenter.org/technologies/spring-loaded-uav-launch-catapult/f849ad01-ba43-4988-8474-c00f2b6970f8>

[3] קטפולטה בנגיי

<https://uasweekly.com/2020/11/22/ukrspecsystems-releases-new-uav-bungee-catapult-launcher>

Aluminum 6061 T-651 [4]

<https://www.coremarkmetals.com/6061-t651-aluminum-plate>

[5] קפיצי פלדה

[https://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-St-St-Introduction\\_61.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-St-St-Introduction_61.ashx)

Aluminum 6061 T-651 של תכונות חומר [6]

<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>

[7] סוגי סיומות של קפיצים

<https://www.acxesspring.com/compression-spring-end-types.html>

[8] מחיר כבל בנגיי

[hookandcord.com/WEBBING \(1.5"\) - HEAVY DUTY NYLON - \(BY THE YARD\)-WN-15-BTY](http://hookandcord.com/WEBBING_1.5%27-HEAVY_DUTY_NYLON-(BY_THE_YARD)-WN-15-BTY)

[9] מחיר בולמי זעזועים

[Amazon.com: Roykaw Golf Cart Coil Over Heavy Duty Front/Rear Shocks for EZGO TXT/Medalist 1994-up Gas and Electric Models, Replaces OEM # 70928-G01 76418-G01 - Red : Automotive](https://www.amazon.com/Roykaw-Golf-Cart-Coil-Over-Heavy-Duty-Front-Rear-Shocks-for-EZGO-TXT-Medalist-1994-up-Gas-and-Electric-Models-Replaces-OEM-70928-G01-76418-G01-Red-Automotive/dp/B000APR002)

[10] מחיר גלגלים

[Amazon.com: INJORA 1.0 Beadlock Wheel Stamped Steel Beadlock Deep Dish 1.0" Wheels for 1/18 TRX4M Axial AX24 SCX24 Gladiator Deadbolt Bronco C10 JLU Upgrade Parts\(Black\) : Toys & Games](https://www.amazon.com/INJORA-1.0-Beadlock-Wheel-Stamped-Steel-Beadlock-Deep-Dish-1.0-Wheels-for-1-18-TRX4M-Axial-AX24-SCX24-Gladiator-Deadbolt-Bronco-C10-JLU-Upgrade-Parts-Black-Toys-Games/dp/B000APR002)

[11] מחיר ראציט

[Ratchets & Ratchet Sets at Lowes.com](https://www.lowes.com/ratchets-and-ratchet-sets)

[12] מחיר קורות אלומיניום

<https://www.indiamart.com/proddetail/aluminium-rod-6061-t6-16484778248.html>

## 12. נספחים

- טבלת תכנות חומרים לקפיצים :

**Table 10-5**

Mechanical Properties of Some Spring Wires

Material	Elastic Limit, Percent of $S_u$		Diameter $d$ , in	$E$		$G$	
	Tension	Torsion		Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Music wire A228	65–75	45–60	<0.032	29.5	203.4	12.0	82.7
			0.033–0.063	29.0	200	11.85	81.7
			0.064–0.125	28.5	196.5	11.75	81.0
			>0.125	28.0	193	11.6	80.0
HD spring A227	60–70	45–55	<0.032	28.8	198.6	11.7	80.7
			0.033–0.063	28.7	197.9	11.6	80.0
			0.064–0.125	28.6	197.2	11.5	79.3
			>0.125	28.5	196.5	11.4	78.6
Oil tempered A239	85–90	45–50		28.5	196.5	11.2	77.2
Valve spring A230	85–90	50–60		29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-vanadium A231	88–93	65–75		29.5	203.4	11.2	77.2
A232	88–93			29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-silicon A401	85–93	65–75		29.5	203.4	11.2	77.2
Stainless steel							
A313*	65–75	45–55		28	193	10	69.0
17-7PH	75–80	55–60		29.5	208.4	11	75.8
414	65–70	42–55		29	200	11.2	77.2
420	65–75	45–55		29	200	11.2	77.2
431	72–76	50–55		30	206	11.5	79.3
Phosphor-bronze B159	75–80	45–50		15	103.4	6	41.4
Beryllium-copper B197	70	50		17	117.2	6.5	44.8
	75	50–55		19	131	7.3	50.3
Inconel alloy X-750	65–70	40–45		31	213.7	11.2	77.2

\*Also includes 302, 304, and 316.

Note: See Table 10–6 for allowable torsional stress design values.

• טבלת תכונות חומר של Aluminum 6061 T651 :

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<u>2.7 g/cc</u>	0.0975 lb/in <sup>3</sup>	AA; Typical
<b>Mechanical Properties</b>			
Hardness, Brinell	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
Ultimate Tensile Strength	<u>310 MPa</u>	45000 psi	AA; Typical
Tensile Yield Strength	<u>276 MPa</u>	40000 psi	AA; Typical
Elongation at Break	<u>12 %</u>	12 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
Elongation at Break	<u>17 %</u>	17 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity	<u>68.9 GPa</u>	10000 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Notched Tensile Strength	<u>324 MPa</u>	47000 psi	2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, K <sub>t</sub> = 17.
Ultimate Bearing Strength	<u>607 MPa</u>	88000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Bearing Yield Strength	<u>386 MPa</u>	56000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Poisson's Ratio	0.33	0.33	Estimated from trends in similar Al alloys.
Fatigue Strength	<u>96.5 MPa</u>	14000 psi	AA; 500,000,000 cycles completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	<u>29 MPa-m<sup>1/2</sup></u>	26.4 ksi-in <sup>1/2</sup>	K <sub>IC</sub> ; TL orientation.
Machinability	<u>50 %</u>	50 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	<u>26 GPa</u>	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
Shear Strength	<u>207 MPa</u>	30000 psi	AA; Typical