

המחלקה להנדסת חשמל

שםuproject:

רחפן מונחה GPS

Project Name:

GPS guided drone

הגדרתuproject – ספרuproject

אדם גנים

שם הסטודנט:

גברת אירנה ליבסטר

שם המנחה:

תאריך
הגשתה: 01.07.2021

אישור המנהה:

יום ג', 29 ביוני, 22:05 (לפני 19 שניות)

Irena Libster

אני



שלום אדם.

אני מאשרת את ספר הפרויקט.

בברכה,
איינה ליבסטר

תודות

ברצוני להודות ולהזכיר תודה בראש ובראשוña לגברת אירנה ליבסטר על כך שלילוותה והנחתה אותה לארך כל הפרויקט.

תודה על הזמיןות שלך והשיקעת הזמן שלך לצורך הכוונה, מתן דגשים מוקזוועים, עצות להתמודדות בהמשך הדרך ובעיקר תודה על האמון שננתת בי לאורך הדרך בפרויקט.
בנוסף, ברצוני להודות לפרופסור עלי לוי שתרם ועזר לי בהכוונה, בבניית האנטנות ומדידתן במתווה האנטנות.

תוכן עניינים -

	תודות 3
6.....	1. רשיונות 1.1 רשימת טבלאות 1.2 רשימת אירורים 1.3 רשיימת משואות
6.....	2. תקציר מנהלים 3. Executive Summary 4. מיליון מונחים 5. מבוא 6. מטרת הפרויקט 6.1 מטרות הפרויקט 6.2 יעד הפרויקט 6.3 מודיע הפרויקט 6.4 בדיקת מודיע הפרויקט
10.....	7. סקירת ספרות וסקר שוק 7.1 סקירת ספרות 7.1.1 QuadCopter Flight Dynamics 7.1.2 PID CONTROLLER 7.1.3 GPS – Global Position Satellite 7.1.3 7.2 סקר שוק 7.2.1 Amazon prime air 7.2.2 רחפן לצורכי ריסוס והדבורה: 7.2.3 רחפן לפיזור הפגנות:
16.....	8. חלופות מערכתיות / טכנולוגיות 8.1 חלופות מערכתיות: 8.2 חלופות טכנולוגיות: 9. תקן הנדיי מפורט 9.1 חלק 1 – יחידת ניהול מהלך הטיסה האוטומטי 9.1.1 גוף הרחפן: 9.1.2 מנועים/מדחפים: 9.1.3 פרופולרים: 9.1.4 בקרים מהירות: 9.1.5 מקלט GPS: 9.1.6 מערכת שליטה: 9.1.7 מערכת תלמטריה: 9.1.8 סוללה: 9.1.9 בקרים טיסה: 9.1.10 אלגוריתם בקרים טיסה: 9.1.11 אלגוריתם הבקרה: 9.2 חלק 2 – יחידת תיעוד מהלך הטיסה 9.2.1 משדר ImmersionRc US Version – LawMate 9.2.2 האנטנות שנבנו ליחידת תיעוד המשימה: 9.2.3 מצלמה: 9.2.4
20.....	
20.....	
22.....	
26.....	
26.....	
26.....	
27.....	
27.....	
27.....	
28.....	
29.....	
29.....	
36.....	
37.....	
38.....	
43.....	
45.....	
45.....	
45.....	
46.....	
56.....	

57	חלק 3 – ייחידת היצוד הייעודי לביצוע המשימה	9.3
57	בקר – ESP32 – GPS NEO6m – LCD 1602 + I2C – צג סרו – מנועים: שרטוטים חשמליים: ייחידת ניהול של מהלך הטיסה האוטומטי: ייחידת תיעוד מהלך המשימה: היצוד הייעודי לביצוע המשימה: מידול חלקם בתלת מימד: התוצר: בדיקות והערכה: בדיקת ממדים: אלגוריתם: סיכום ומסקנות: הצעה לעבודת המשך: תכנון הפרויקט: תוכנית עבודה סופית : ריכוז שינויים : ניהול סיכונים ודרכי התמודדות : רשימת מקורות	9.3.1 9.3.2 9.3.3 9.3.4 9.4 9.4.1 9.4.2 9.4.3 9.5 .10 .11 11.1 11.2 .12 .13 .14 14.1 14.2 14.3 .15 .16 16.1 16.2
59		
59		
61		
61		
62		
62		
64		
65		
65		
66		
67		
68		
69		
69		
70		
71		
72		
72		
73		

1. רשיונות

1.1 רשימת טבלאות

מספר טבלה	תיאור
1	רכיב נתוני סקר שוק
2	יתרונות וחסרונות של כלי הטיס השוניים
3	יתרונות וחסרונות של אמצעי הניווט
4	מתן ציון לכל חלופה מערכתיות של כלי הטיס
5	מתן ציון לכל חלופה מערכתיות של אמצעי הניווט
6	יתרונות וחסרונות להחלופות הטכנולוגיות
7	מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של בקר טיסה
8	מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של תוכנת ניהול ניהול
9	מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של מיקרו בקר
10	מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של מערכת הוידיאו האנלוגית
11	נתוני המשדר (יחידה שליטה)
12	נתוני המקלט (יחידה שליטה)
13	נתוני מערכת הטלמטריה
14	רכיב נתונים של אנטנתה הרלייקס שנבנתה
15	נתוני הסוללות
16	נתוני המשדר האנalog (יחידה התיעוד)
17	נתוני המקלט האנalog (יחידה התיעוד)
18	השוואה בין תוצאות שני התרדים שנבדקו
19	השוואה בין תוצאות שלושת התרדים שנבדקו
20	השוואה בין נקודת הציון הנבחרת לבין נקודת הציון שנקלטה בפועל

1.2 רשימת איזורים

מספר איזור	תיאור
1	המחשת פעולה המנועים
2	יישום הרחפן למשימת צילום
3	כיוון סיבוב המנועים במצב שמירת גובה
4	בקר PID
5	המחשת פעולה ה-SGPS
6	Amazon Prime Air
7	רחפן ריסוס של חברת Agridrones
8	רחפן להטלת גז מדמייע לפיזור הפגנות
9	דיאגרמת בלוקים של יחידת הטיסה
10	מבנה פנימי של מנוע ללא מברשות
11	תיאור מבנה כללי של אנטנתת הליקס
12	בדיקות תיאום אימפדינסים במכשיר Network Analyzer
13	בדיקות רוחב סרט של האנטנה במכשיר Network Analyzer
14	אנטנה משדרת מתחת לקו האופק
15	גרף קרטזי של מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) עברו תדר 433MHz
16	גרף קרטזי של מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) עברו שלושה תדרים שונים
17	אנטנה משדרת בקו האופק
18	גרף קרטזי של מדידת אנטנת ייחוס (ורוד) והאנטנה שבנית (אדום) בחתר ארכי (אדום) בתדר 433MHz
19	צילום האנטנה (משמאל) והאנטנה במטווה אנטנות (מימין)
20	היחידות המרכזיות של בקר הטיסה
21	סכימה בלוקים של אלגוריתם בקר הטיסה
22	תיאור רכיב הג'ירוסקופ
23	תיאור גלגול, עלרוד וסיבוב ביחס לכל ציר
24	תיאור יצירת וקטור התואזה
25	תיאור פריסת הזרויות - Pitch ו-Roll במרחב
26	תהליך קריית הבромט
27	סכימה של בקר PID
28	חוויי הבקרה השונים
29	תיאור פעולה של חוג המיקום במקורה שאף הרחפן מיושר עם מערכת הצירים
30	תיאור פעולה של חוג המיקום במקורה שאף הרחפן לא מיושר עם מערכת הצירים
31	דיאגרמת בלוקים של יחידת התיעוד
32	תיאור מבנה כללי של אנטנת קוולנייר בתדר 2.4GHz
33	בדיקות תיאום אימפדינסים במכשיר NetWork Analyzer
34	גרף קרטזי של מדידת האנטנה בחתר אופקי (הגבהה – אדום) ואנטנת ייחוס (כחול) עברו תדר 2.4GHz
35	גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) עברו תדר 2.4GHz
36	גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתר אופקי (הגבהה) עברו תדר 2.4GHz
37	גרף קרטזי של מדידת האנטנה בחתר אופקי (הגבהה – אדום) ואנטנת ייחוס (כחול) עברו תדר 2.5GHz
38	גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) עברו תדר 2.5GHz
39	גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתר אופקי (הגבהה) עברו תדר 2.5GHz
40	אנטנת קוולנייר בתדר 2.4GHz
41	בדיקות תיאום אימפדינסים במכשיר NetWork Analyzer
42	מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנת הייחוס (ירוק) בתדר 2.4GHz
43	מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנת ייחוס (ירוק) בתדר 2.45GHz

מדידת האנטנה בחתר ארכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנתן ייחוס (ירוק) בתדר 2.5GHz	44
אנטנתן יאגי אודה בתדר 2.4GHz	45
מצלמה אנלוגית	46
דייגרמת בלוקים של יחידת ביצוע המשימה	47
תיאור הרכניות של בקר ESP32	48
תיאור הרכניות של ה-GPS	49
הציג שמיושם ביחידת ביצוע המשימה	50
תיאור רכיב התקשרות I2C שמחובר לצג	51
אופן הפעולה של מגע מיקרו סרוו ותיאור כניסותיו	52
شرطוט צפוני של יחידת ניהול מהלך הטיסה האוטומטי	53
شرطוט צפוני של יחידת התיעוד	54
شرطוט צפוני של יחידת ביצוע המשימה	55
החוקים הממודלים המורכבים על גבי הרחפן	56
החלק התיכון של המארץ הייעודי של יחידת הצילום שבת菡נת הבסיס	57
החלק העליון של המארץ הייעודי של יחידת הצילום שבת菡נת הבסיס	58
תמונה של התוצר הסופי	59
נקודות הציון שנבחרה בתוכנת Mission Planner	60
נקודות הציון שנקלטה בציג הדיגיטלי שעל הרחפן	61
דייגרמת בלוקים של האלגוריתם בברקר-ESP	62
תיאור פועלות חיישן הקربה על גבי הרחפן	63
מודול סולורי התומך בראשת דור 4	64
תיאור רחפן בעל פלטפורמת גוף גדולה	65
דו"ח התקדמות הפרויקט	66

1.3 רשימת משוואות

מספר נוסחה	תיאור
1	חישוב מספר סיבובי לדקה
2	חישוב יחס אות לרעש במקלט ה-GPS הראשי
3	חישוב קצב העברת נתונים לפי שנו במקלט ה-GPS הראשי
4	חישוב תוארטוי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קו ראייה של יחידת השלים
5	חישוב יחס אות לרעש בכינסה למקלט שביחידת השלים
6	חישוב קצב העברת נתונים לפי שנו למקלט שביחידת השלים
7	חישוב תוארטוי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קו ראייה של יחידת הטלמטריה
8	חישוב מקדם החזרה להספק של אנטנתה ההליקס
9	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנתה ההליקס
10	חישוב יחס גלים עומדים של אנטנתה ההליקס
11	חישוב מקדם החזרה להספק לצורך מצאת רוחב הסרט של האנטנה
12	חישוב מקדם החזרה למתח לצורך מצאת רוחב הסרט של האנטנה
13	חישוב יחס גלים עומדים של האנטנה לפי בחירת מקדם החזרה להספק
14	חישוב רוחב הסרט של אנטנתה ההליקס
15	חישוב זווית הפתייה בין האנטנות
16	חישוב כמות הזרם המרבי שסוללת לייפו יכולה להזרים
17	חישוב מהירות זוויתית
18	חישוב הזווית של הרחפן ביחס לזוית ההתחלה
19	חישוב גודלו של ווקטור התאוצה R
20	חישוב סינוס הזווית בין כל אחת מקריאות מד התאוצה לבין ווקטור התאוצה המשוקלל R
21	חישוב הזווית עבור צירים X - Z
22	מדידת זווית מדוקית על ידי שימוש במסנן משלים
23	חישוב הזמן הדרוש לקריאת הלחץ
24	חישוב תדר הדגימה של החישון
25	חישוב גובה הרחפן ביחס לגובה פני הים
26	חישוב נצילות מסדר הוידיאו האנלוגי
27	חישוב תוארטוי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קו ראייה של יחידת התיעוד
28	חישוב יחס אות לרעש בכינסה למקלט של יחידת התיעוד
29	חישוב קצב העברת נתונים לפי שנו ביחסית התיעוד
30	חישוב קצב העברת נתונים בפועל בערזץ של יחידת התיעוד
31	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנת הקוליניאר בתדר 2.5GHz
32	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנת הקוליניאר בתדר 2.5GHz
33	חישוב יחס גלים עומדים שבאנטנת הקוליניאר בתדר 2.5GHz
34	חישוב מקדם החזרה להספק של אנטנת הקוליניאר בתדר 2.4GHz
35	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנת הקוליניאר בתדר 2.4GHz
36	חישוב יחס גלים עומדים שבאנטנת הקוליניאר בתדר 2.4GHz
37	חישוב מקדם החזרה להספק של אנטנת היגי אודה בתדר 2.5GHz
38	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנת היגי אודה בתדר 2.5GHz
39	חישוב יחס גלים עומדים שבאנטנת היגי אודה בתדר 2.5GHz
40	חישוב מקדם החזרה להספק של אנטנת היגי אודה בתדר 2.4GHz
41	חישוב מקדם החזרה למתח של אנטנת היגי אודה בתדר 2.4GHz
42	חישוב יחס גלים עומדים שבאנטנת היגי אודה בתדר 2.4GHz
43	חישוב יחס אות לרעש בכינסה למקלט ה-GPS המשני
44	חישוב קצב העברת נתונים בערזץ ה-GPS השני לפי שנו

2. תקציר מנהליים

בפרויקט זה ישנו שני יעדים מרכזיים. היעד הראשון הינו בניית רחפן (הכול מצלמה לתייעוד מהלך המשימה) , ייצוב הרחפן ויכולת טיסה אוטונומית לעד מוגדר מראש. היעד השני הינו שילוב של מערכת מכנית המופעלת באמצעות בקר -GPS ו-GPS נוסף אשר יודעת לזהות את הגעת הרחפן אל נקודת הציון ולבצע פעולה כלשהי שהוגדרה מראש ולבצעה בהצלחה.

נמשמעותו נפרט כי היעד השני סנכרון של שני GPS, שהראשון מופעל על ידי בקר הטיסה לצורכי ניוט הרחפן אל נקודת הציון הנבחרת והשני מופעל על ידי בקר ESP ומשמש לצורכי זיהוי היעד הנבחר שבו תבוצע המשימה. אל בקר-ESP יוגדר פוליגון סביר היעד שהוגדר למשימה וכאשר ה-GPS יזהה אותו, תינתן הפקודה לביצוע המשימה.

על מנת שפרויקט זה יוגדר כהצלחה נהיה חייבים לרכוש ידע בנושאים הבאים:

- בקרה (חוג פתוח/סגור) – אנו נדרש ליצב את הרחפן לטיסה אוטומטית.
- הבנת אופן הפעולה של רכיב GPS כדי להבין איך לسانר בין GPS.
- ארדואינו – למידת השפה לצורכי כתיבת הקוד לבקר ESP.
- תקשורת להברת ידיאו – הבנת תחום האנטנות לצורכי העברת שידור וידיאו.
- אינטגרציה – ניתן לומר כי קיימים בפרויקט זה שני מיני פרויקטים, لكن נדרש לגרום להסתנכרון ביניהם על מנת שייעבדו יחדיו.

המטרות אותן נרצה להשיג הן:

- בניית רחפן מחלקי התחלתיים ושליטה בקרה שלו על מנת שהיא מוצבת באוויר.
- הבנת שפת התוכנות IDE.
- הבנה בסיסית של בניית אנטנות להברת וידיאו.

מטרת הפרויקט אינה ליצור מוצר חדשני היות ופתרונות הפרויקט קיימים בשוק, הפרויקטendum להוות אתגר הנדסי דרכו נוכל להשיג את מטרותינו המופיעות מעלה.

הגדרת יעדים:

- טיסה לנקודת ציון תור כדי לשמור על גובה מוגדר.
- עצירה בנקודת ציון נבחרת לצורכי ביצוע המשימה.
- זיהוי אזור נקודת הציון שנבחרה וביצוע המשימה.
- תיעוד כל מהלך המשימה כולל נקודת הציון.

מדדים להצלחה:

- יכולת טיסה של כ- 10 דקות למרחק של כ- 300 מטר.
- הגעה לנקודת ציון שנבחרה ברמת דיוק של 5-10 מטר.
- הפעלת מצלמה וזרוע על הרחפן לביצוע המשימה.
- רישום נקודת הציון שבה בוצעה המשימה.

הפרויקט עוסק ונוגע בתחומים רבים של הנדסה. אינטגרציית חלקים ובניה של מוצר, בקרה של כל טיסות על ידי בקרי PID, כתיבת קוד ותוכנות בסביבת UBODA IDE. אינטגרציית החלקים של הרחפן יעשו בקפידה על מנת לשמר את מרכז הכבד במרכזי של הרחפן בכמה שפותות משקל. בקרת הייצוב של הרחפן יבוצע על ידי שינוי פרמטרים בבקרי-h-PID. הפרויקט יעשה שימוש באנטנות שנבנו באופן ייעודי לביצוע המטרות שהוגדרו.

התוצאות של הפרויקט הינם:

- תוכר הפרויקט הינו דגם (א-טיפוס) של מערכת רחפן מונחה GPS והציג הנתונים באמצעות סימולציה טיסה בזמן אמיתי.
- ספר פרויקט – מתאר את תהליך התכנון ומסביר את מימוש הפרויקט עד לפרטיו הקטנים ביותר.

Executive Summary .3

This project has two main aims. The first one is the construction of a drone (including a camera to document the course of the mission), stabilization of it and the ability to fly autonomously to a pre-defined destination. The second aim is combination of a mechanical system operated by a controller and an addition GPS that knows how to detect the arrival of the drone to the waypoint and perform any pre-defined operation successfully.

The second aim is the synchronization of two GPS systems, when the first is activated by the flight controller for the purpose of navigating the drone to the selected waypoint and the second is operated by the ESP controller and is used to identify the selected destination where the mission will be performed. The ESP controller will have a polygon defined around the target set for the task, and when the GPS detects it, the command to perform the task will be given.

In order for this project to be defined as successful, we will need to acquire knowledge on the following topics -

- * Control (open/closed circle) – we have to stabilize the drone for automatic flights.
- * Understand the operation of a GPS component to understand how to synchronize between two GPS.
- * Arduino – learn the language to write the ESP controller code.
- * Communication for video transmission – understand the field of antennas for video transmission broadcast.
- * Integration – This project actually has two mini projects in it, so it is crucial to synchronize between them for them to work together.

The goals we want to achieve are –

- * Construction of a drone from its primary parts and control over its control so that it is stabilized in the air.
- * Understanding the IDE programming language.
- * Basic understanding of building video transmitting antennas.

The aim of the project is not to create an innovative product, since the project's products already exist in the market. The project is designed to be an engineering challenge through which we can achieve our goals listed above.

Setting goals –

- * Flight to a waypoint while maintaining a defined altitude.
- * Stop at a selected waypoint for the task.
- * Identify the selected landmark area and perform the task.
- * Document the entire course of the task, including the waypoint.

Measures for success –

- * Flight capacity of at least 10 minutes to a distance of about 300 meters.
- * Arrival at a selected waypoint with accuracy of 5-10 meters.
- * Activation of a camera and an arm on the drone to perform the task.
- * Registration of the waypoint where the task was performed.

The project deals with many areas of engineering. Part integration and product construction, control of aircraft by PID controllers, code writing and programming in IDE workspace. The integration of the drone parts will be done carefully in order to

keep the center of gravity in the center of the drone with as little weight as possible. The stabilization control of the drone will be performed by changing parameters in the PID controllers. The project will use antennas built specifically to accomplish the defined goals.

The products of the project are –

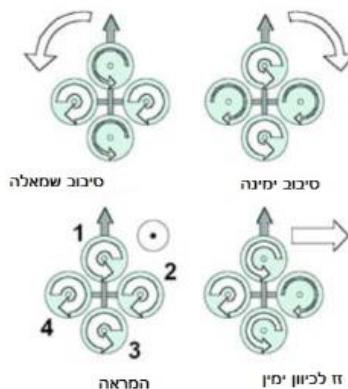
- * A model (prototype) of a GPS-guided drone system and the display of data using real-time flight simulation.
- * Project book – Describes the planning process and explains the implementation of the project down to the smallest details.

4. מילון מונחים

מספר מונח	מונח	תיאור
1	GPS	מערכת איכון עולמית
2	ESC	בקר מהירות מנוע
3	VSWR	משמש למדידת חוסר התאמת של עצבות בمعال חשמלי
4	Return Loss	מקדם החזרה של גל אלקטרו-מגנטי הפוגע במחסום
5	Radiation Pattern	התלות היזואית של עצמת גלי רדיו באנטנה
6	QuadCopter	רחפן בעל 4 מנועים
7	Telemetry	טכנולוגיה המאפשרת מדידה וдиוקה מרוחק של מידע באופן אוטומטי
8	Brushless Motor	מנוע DC ללא מברשות
9	I2C/ SPI	תקשורת טורית
10	Signal to Noise	היחס בין עצמת אות הרצוי לבין עצמת הרעש הכול
11	Channel Capacity	קיבול הערזץ של ערוץ תקשורת החשוף לרעש גאוסי
12	Wave Length	מדד למרחוק בין שתי נקודות סמוכות שווות מופע על הגל
13	Antenna Gain	פי כמה האנטנה מכונה את הקירינה לנקודה מסוימת ביחס לאנטנה איזוטרופית
14	Beam Width	רוחב אלומת הקירינה בנקודות 3dB
15	Efficiency	היחס בין ההספק בموقع הרכיב לבין ההספק בכניסה לרכיב
16	NTSC	תקן לאותות וידאו הנמצא בשימוש נרחב בשידורי טלוויזיה
17	Compass	מצפן – אחרראי על זיהוי תנועה ושدة מגנטי כך שנוכל לדעת לאן חzikת התקדמות מכוננת במרחב
18	Gyroscope	אחראי על מדידת המהירות היזואית בשלושה ציריהם
19	GFSK	שיטת אפנון הפעלת על שניי תדר הגל נושא
20	CDMA	שיטת ריבוב ערוצים באמצעות קוד

5. חכוא

רחפן הוא כלי טיס בלתי מאויש בעל שני מנועים או יותר היוצר עילוי באמצעות סיבוב מדחף בעל להבים, בדומה למסוק. השליטה בתנועת הטיסה של הרחפן מושגת על ידי שינוי המהירות היחסית בין הלהבים השונים, באופן המשפיע על הדחף והכוח של כל להב בנפרד.

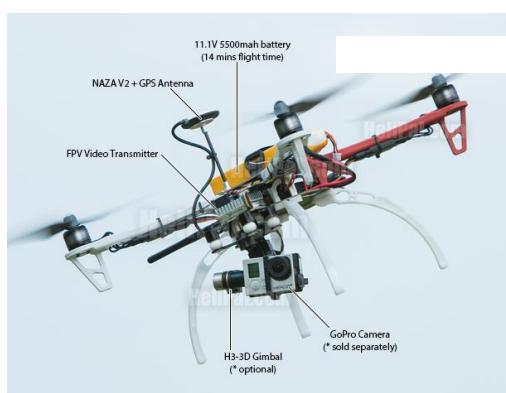


איור מס' 1 – הממחשת פעולה המנועים

הרחפנים הם כלי טיס בלתי-יציבים מבחינה אווירודינמית בהשוואה לסוגי 'כטב' מים אחרים, ונשלטים על ידי בקר טיסה, אוلوح בקרה, כדי לשמר על תנועה יציבה. כדי לשמר על דיקן מצב הטיסה וכיונה בקר הטיסה משלב נתונים של גירוסקופים ומדדי תאוצה. וברחפנים מתוחכמים יותר משולבים גם GPS מצפן וחישנים חזותיים למונעת היתקלות במכשולים. ברחפן מסווג קוואדרופטר, שני מנועים הממוקמים באலכסון מסתובבים לכיוון אחד, והשניים האחרים בכיוון הפוך. בתצורה כזו קל לשולוט בציר הגלגול או העילוץ (הגברת המהירות של שני מנועים מצד אחד והאטת שני המנועים האחרים מצד השני). נסיקה לגובה מבוצעת על ידי האצה של כל המנועים בו-זמנית, והנמוכה על ידי האטה של כולם.

שימושו הרבים של הרחפן מתבטאים בתחוםי שימוש שונים כגון: שימוש לצילום מהיר עברו גופי אבטחה, ייחדות ביטחון ומודיעין, איתור מפגעים ונעדרים לצורך חילוץ והצלה, תחקור אימונים ופעולות מבצעית, ביצוע משימות לעדים מוגדרים, ביצוע הדברה למזיקים בשדה חקלאי, איתור אטרים ארכיאולוגיים ואפילו תחרויות.

הרחפן הוא כלי תעופה בעל יכולות תנעה למרחב אווירי שיודיע לשמר על גובה נתון, להגיע לנקודה מוגדרת ולкан משמש כפלטפורמה המאפשרת ביצוע MERCHANTABILITYות רבות שתוכנו מראש. על הרחפן ניתן לשלב מערכות נוספות שחלקים משתמשות בתנונות שמספק הרחפן בתנועתו ומערכות עצמאיות שיכולות לבצע פעולה בתנאים מסוימים.



איור מס' 2 – יישום הרחפן למשימת צילום

פרויקט זה מציג את תכונות הבנייה לבניית מערכת רחפן המבוסס על איקון GPS. המערכת, כולל כל מרכיביה, נועדה לקבל נקודת ציון במרחב לטוטו אליה, לבצע משימה הטלה ובסיומה לחזור חזרה לנקודת הבסיס, כל זאת תוך כדי תיעוד וצילום באמצעות מצלמה אנלוגית המותקנת על גבי הרחפן.

6. מטרת הפרויקט

6.1 מטרות הפרויקט

- ביצוע משימה שלמה ואוטומטית בנקודת ציון נבחרת.

6.2 יעדיו הפרויקט

- טישה לנקודת ציון תוך כדי שמירה על גובה מוגדר.
- עצירה בנקודת ציון נבחרת לצורך ביצוע המשימה.
- זיהוי אזור נקודת הציון שנבחרה וביצוע המשימה.
- תיעוד כל מהלך המשימה כולל נקודת הציון.

6.3 מדדי הפרויקט

- יכולת טישה של כ- 10 דקוט לפחות למרחק של כ- 300 מטר.
- הגעה לנקודת ציון שנבחרה ברמת דיוק של 5-10 מטר.
- הפעלת מצלמה וזרוע מכנית על הרחפן לביצוע המשימה.
- רישום נקודת הציון שבה בוצעה המשימה.

6.4 בדיקת מדדי הפרויקט

- לפני הרכבת כל המכליים בוצעה הטסה של הרחפן בתנועה רציפה למשך כ-10 דקוט בשטח פתוח, בבדיקה מסלול הטיסה נמצא כי המרחק שעבר בעת הבדיקה הגיע לכ-300 מטר.
- תכנון מסלול טיסה עם נקודת ציון נבחרת, הגעה פיזית אל נקודת הציון וסימון המקום, ביצוע הטסה עם השהייה מעל נקודת הציון הנבחרת והטלה, בדיקת מרחק ההטלה ביחס לנקודת הסימון הפיזית.
- בדיקת המצלמה בזעעה על ידי צג המקלט שידור וידאו רציף ואמונות הפעלת הזרוע על ידי הטלה בנקודת הציון הנבחרת.
- בעת הגעת הרחפן לנחיתה וכיבוי המנועים בוצעה בדיקה של הצג המורכב על הרחפן להימצאות רישום אזור נקודת הציון הנבחרת.

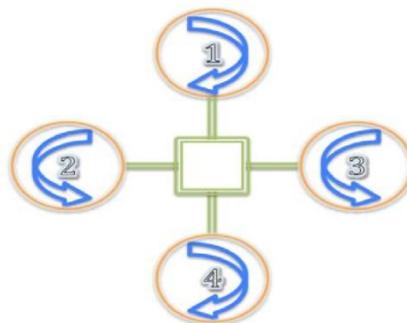
- ראה בפירוט את בדיקת מדדי הפרויקט בפרק 11.1 .

7. סקירת ספרות וסקיר שוק

7.1 סקירת ספרות

:QuadCopter Flight Dynamics 7.1.1

קוואדקוופטר הוא תצורה פופולרית של רחפן בעל 4 מנועים הפועל באמצעות שליטה על מהירות הסיבוב של ארבעת המנועים לצורכי שליטה על הهماראה ומונט הטיבוב. דחף הלהבים מלא תפקיד חשוב בתמרון ובשמירה על גובה הרחפן. גודלו הקטן ויכולת התמרון מהירה מאפשרת למטייס יכולת ביצוע שיגורי טיסה הcoliims תמרונים אויריים מורכבים. אך לצורך ביצוע תמרונים שכאלה נדרש זווית מדיקת של הרחפן. בסקירה זו אסביר כיצד יש לשנות את הסיבוב של ארבעת המנועים בו זמן קצר כדי להשיג ציון זווית נכוון ייחד עם פעולות טיסה בסיסיות כמו הهماראה, נחיתה וריחוף תוך כדי שמירה על גובה. קיימים בקר האחראי על כוונון הגובה של הרחפן, כאשר הבקר מקבל פעולה לנوع למשטה או למשטה, מהירות הלהבים מותאמים על מנת לעלות או להורד גובה. תוכנה זו משתמשת להهماראה / נחיתה או לצורך תיקון גובה בזמן הטיסה. כל מדחף דוחף אויר מטה ומיצר כוח שמרם את הרחפן כלפי מעלה. כל זוג מדחפים אלכסוניים מסתובבים באותה מהירות אבל בכיוונים שונים מהמדחפים האלכסון השני. כדי מספר זוגי של מדחפים, כך ששה"כ מספר המדחפים שמסתובבים עם ציון השעון שווה למספר המדחפים שמסתובב נגד ציון השעון. התנועה הזוויתית הכלול של הרחפן מתאפשר והרחפן רק יעלה וירד בהתאם למהירות המנועים. כאשר מהירות המנועים גדל המדחפים יגרמו לרחפן לעלות וכשהיא תקטן, יגרמו לרחפן לרדת. במהירות שבה כוח העילוי שווה למשקל הרחפן, הרחפן לא יעלה ולא ירד, אלא רק ירחב במקום. קיימת תוכנה נוספת לבקר אשר משתמש עבורה לשולוט על העילוד והgelol כדי לאפשר לרחפן לנוע קידמה , אחרת , ימינה או שמאליה. כאשר הבקר מקבל פקודה לנוע לכיוון מסוים , מהירות המנועים גדלה ביחס הפוך לכיוון בו נדרש מהබקר לנוע . למשל , אם הבקר מקבל פקודה לנוע ימינה , 2 המנועים השמאליים ינועו במהירות גבוהה יותר על מנת לספק תנופה ימינה.[[1](#)]

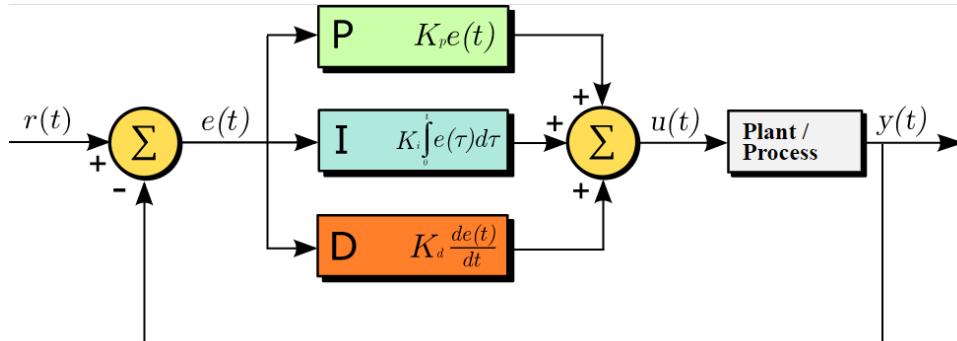


איור מס' 3 – ציון סיבוב המנועים במצב שמירת גובה

:PID CONTROLLER 7.1.2

כיום תחום הרחפנים הולך וגדל ומשמש אותנו במגוון תחומים שונים ולכך קיימת חישיבות רבה לשימוש בברker שליטה ייעיל אשר יביא לשילטה טובה יותר על הרחפן בתנאים שונים, בקר זה נקרא בקר PID. פועלתו מבוססת על קבלת נתונים ממד התאוצה אשר משמש לקריית הערכים של הצירים X,Y,Z המתאימים לתנועת הרחפן ושימוש באוטם ערכים לצורך יציבות הכלி בזמן משימה. ראשית התיבות בברker PID מייצגים : P- פרופורציונלי, I- אינטגרלי , D- דיפרנציאלי. בקר PID כיום נמצאים במגוון רחב של יישומים לבקרה תהליכי תעשייתיים. בברker זה יש יתרונות רבים כמו זמן עליה מופחת , זמן התיצבות מהיר ושגיאה נמוכה ביחס למערכת שליטה אחרת. בברker זה יש חישבות הרבה באופן שליטת הרחפן. הפרמטרים של בקר PID מחושבים באופן הבא: שלב ראשון מחשבים את השגיאה (e) באמצעות חישוב של ערך המוצא המצוין מערך הכנישה הרצוי. שלב שני , בקר P מוגדר להיות כ-

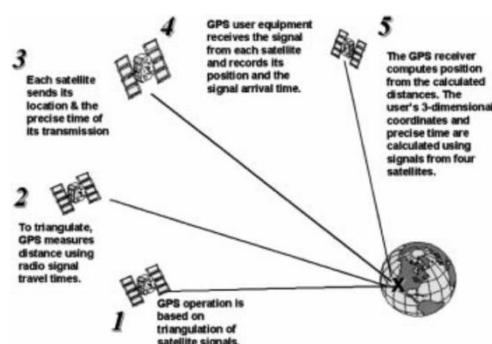
$K_d \frac{de(t)}{dt}$. שלב שלישי , בקורס D מוגדר להיות $K_d \int_0^t e(\tau) d\tau$. שלב רביעי , בקורס D מוגדר להיות $K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$. שלב חמישי , סוכמים את שלושת העריכים שחושו בשלושת השלבים הקודמים והסכום הוא הערך שנכנס אל תוך המונע. לאחר מכן מחסר שמבחן מציא ערך מציא כלשהו ובאמצעות לולאת משוב יחידה מוחזרים את ערך המונע המציא אל תוך מחסר שמבחן מציא חישור בין ערך הכניסה הרצוי לערך המונע המציא וכן הפעולה חוזרת חיליה עד אשר ערך השגיאה ($e(t)$) שואף לאפס. רחפן הקווואדקיופטר מורכב מארבעה מנועים , מה שהופך אותו למערכת מסדר רביעי עם זוג מנועים שמסתובבים עם כיוון השעון וזוג מנועים שמסתובבים נגד כיוון השעון , כאשר כל זוג מנועים הוא מערכת מסדר שני.[2]



איור מס' 4 – בקורס PID

:GPS – Global Position Satellite 7.1.3

GPS היא מערכת מיקום גלובלי מבוססת לוויינים לקביעת מיקום של אובייקט על פני כדור הארץ אשר תוכננה על ידי משרד ההגנה האמריקאי. מקלט GPS מספקים מידע על מיקום בקווי אורך, רוחב וגובה. מערכת GPS כוללת 24 לוויינים המKEEPים את כדור הארץ במסלולים מדויקים, כל לוויין חג בגובה של כ- 20,200 קילומטר ועשה הקפה מלאה של כדור הארץ בכל 12 שעות. חיים המערכת משתמשת הן את הצבא והן את האזרחים לצורכי קבלת מיקום, מהירות וזמן של אובייקט על פני כדור הארץ. עיקנון העבודה של GPS הוא באמצעות מדידת מרחקים של 4 לוויינים אל המקלט ובכך לקבע את מיקומו. כדי לקבל מיקום בשלושה מיידדים על GPS לקלוט 4 לוויינים המרוחקים אחד מהשני בזווית של 55 מעלות. מסלולי הלוויינים ידועים מראש ולכן באמצעות מדידת המרחוקים ארבעה לוויינים ניתן לקבל קו אורך, רוחב, גובה וזמן ובכך לקבע את המיקום של האובייקט על פני כדור הארץ. חישוב המרחוקים בין הלוויינים אל המקלט מתבצע באמצעות שילחת קוד אל המקלט וחישוב המרחק במקלט תוך התחשבות בזמן השילחה ובמהירות האל. לווייני GPS משדרים אותות בתדר 1.57542GHZ ובתדר 1.22760GHZ שנקרא L1 ו- L2. הנזונים נשלחים אל המקלט בשיטת CDMA כדי להבחין בין רצפי הקוד הייחודי של כל לוויין, אותן קודי GPS נוצרים בו זמנית גם על ידי הלוויינים וגם על ידי מקלט GPS. כאשר המקלט מקבל את קוד המידע של הלוויינים הוא מתאם בין האותות שהוא מקבל לאלו שהוא קולט מהלוויינים ובאמצעות חישור בין זמן השילחה בזמן הגעת האותות למקלט ניתן לקבל את הזמן. מכיוון שגלי רדיו נעים במהירות קבועה המקלט משתמש במהירות האור לצורך חישוב המרחק.[3]



איור מס' 5 – המחשבת פעולה ה-GPS

7.2 סקר שוק

בסקר שוק, אס考ר מערכות, שיטות ומוצרים הקיימים, תור ציון יתרונותיהם וחסרונותיהם.

:Amazon prime air 7.2.1

amazon פריים איר הוא שירות שלוחוי רחפנים שנמצא כתוב בפיתוח על ידי-amazon. הפעילות הייתה צפוייה להתחילה בערים נבחרות החל מישנת 2019 אך עם זאת על פי חודש מרץ 2020 השירות אינו הتمמש עדיין. פועלת הרחפן מבוססת על שימוש GPS לצורך הגעה אל היעד המבוקש. טענים אלו תור הרחפן חבילה ולאחר מכן הוא מנע על ידי מסילה אל מחוץ למבחן לאזור פתוח, כאשר הרחפן נמצא במקום בטוח להמראה, מarry לשמות וטס בזרה אוטונומית לחלוון אל נקודת הציון שהוגדרה לו בהזמנה. הרחפן מזהה את נקודת הנחיתה שלו ומבצע נחיתה ושחרור החבילה, לאחר שחרור החבילה מבוצעת, הרחפן חוזר באופן עצמאי אל נקודת הבסיס שממנה יצא. הרחפן יהיה מסוגל לטויס לגובה של כ-120 מטר, למרחק של עד כ-16 ק"מ ולשאת חבילה משקלה עד 2.25 ק"ג. [4]

יתרונות: שירות מהיר, הגעה לנקודות ללא גישה תחבורה, הוצאה תפעולית נמוכה.
 חסרונות: מרחק טיסה קצר, דרוש הכנה של נקודות נחיתה.



איור מס' 6 – Amazon prime air

7.2.2 רחפן לצורכי ריסוס והדבורה:

בחקלאות המשיכו לשלב טכנולוגיה חדשה ומפותחת ונמצאו את הרחפנים ככלי חינוך לחקלאים ברחבי העולם. באמצעות הרחפנים ניתן לבצע פיזור מדוקן ויעיל של חומרים מרכבים ומרוכבים ולהביא התקדמות משמעותית בתחום. בנוסף לכך יכולות הדיקוק ומהירותו של הרחפן חוסכות כוח אדם בשטח ובהרבה מן המקרים הם עדיפים על השימוש בטרקטורים וטוסים. נגישות הרחפנים גבולה יותר באזוריים רבים והפעלתם ירока ומאפשרת עבודה בקרבה לאזורי מגוריים בשונה מהשיטות הישנות. לרוב רחפני הריסוס מסוגלים לקחת בין 5-20 ליטר.

רחפן חדש של חברת AgriDrone פותר את בעיית פיזור חומרי ההדבורה על כל שטח השדה החקלאי. הרחפן יכול לטויס בכל שעות היום ובכל תנאי מזג האוויר. אחד מיתרונותיו של הרחפן הוא הריסוס המדוקן כמו כן יכולת שהוא באוויר של עד 45 דקות וכיסוי שטח של כ-60 דונם. הוא מסוגל לשאת עד כ-15 ליטר של חומרי ריסוס, שמאפשרים ריסוס נקודתי במקטעים שבין מטר ל-20 מטר. הרחפן הוא בעל יכולת הטסה אוטונומית - מסוגל לקבל משימה עם נקודות ציון ולבצע ריסוס בזרה עצמאית, בעל מגנון שיודיע לזרה מתי הסוללה / או חומר הריסוס עומד להיגמר, ומנווט עצמו חזרה לנקודת ההמראה למילוי מחדש.[5]

יתרונות: שימושי בכל מזג אוויר, יכולתritis של שטחים קטנים, הוצאה תפעולית נמוכה.
 חסרונות: מגבלה במשקל החומר שהרחפן מסוגל לשאת.



איור מס' 7 - רחפן ריסוס של חברת Agri drones

7.2.3 רחפן לפיזור הפגנות:

זה"ל על ידי מפא"ת ובשותפות עם חברות הביטחוןיות סימן לאחרונה לפתח רחפנים חדשים לצורכי טיפול בהפגנות בעיירה בחזית הדרום בגבול רצועת עזה בעלי יכולת של הטלת שקיות עם "מי באש" וזר מדמיע על אזור ההפגנה חלק משימושו כאמצעי אל הרג בהפגנות המוניות. הפעלת הרחפן מבוצעת על ידי מפעיל אשר מטיס אותו מעל המפגינים ומטייל את "מי הבואש" שהוא חומר נזיל בעל ריח רע. בנוסף הרחפן מצלם את האזור באופן שוטף ומאפשר שחרור מבוקר של גז מדמיע מתוך מיכל המחבר לתחתית הרחפן.[\[6\]](#)

יתרונות: נג Ishot גובהה לкрыт האוכלוסייה ללא חשש לפגיעה , יכולת דיקוק , הוצאה תפעולית נמוכה.
 חסרונות: זמן שהייה מוגבל באוויר.



איור מס' 8 - רחפן להטלת גז מדמיע לפיזור הפגנות

7.2.4 ריכוז סקייר שוק בטבלה:

שם חברת	מטרה	יתרונות	חסרונות
Amazon prime air	שירות שליחת חבילות באמצעות שימוש ברחפנים	<ul style="list-style-type: none"> • שירות מהיר הגעה לנקודות ללא גישה תחבורה ציבורית. • הוצאה תעולית נמוכה 	<ul style="list-style-type: none"> • מרחוק טיסה קצר • דורש הכנה של נקודות נחייה
Agridrones	רחפן לצורך ריסוס והדבירה	<ul style="list-style-type: none"> • שימושי בכל מגז אוויר • יכולת CISCO של שטחים קטנים • הוצאה תעולית נמוכה 	<ul style="list-style-type: none"> • מגבילה במשקל החומר שהרחפן מסוגל לשאת
מפא"ת	רחפן לפיזור הפגנות	<ul style="list-style-type: none"> • נגימות גבוהות לקרבת האוכלוסייה ללא חשש לפגיעה • יכולת דיק • הוצאה תעולית נמוכה 	<ul style="list-style-type: none"> • זמן שהוא מוגבל באוויר

טבלה 1 – ריכוז נתוני סקייר שוק

8. חלופות מערכתיות / טכנולוגיות

8.1 חלופות מערכתיות:

קיימים מגוון רחב של כלים טיס המסוגלים לבצע משימות אוטונומיות בנקודות ציון מוגדרות מראש, על כן ניתן מספר חלופות לבחירת האמצעי לביצוע המשימה אל מול שיקולי אינטלקט ותקציב:

1. ביצוע המשימה על ידי טיסן.
2. ביצוע המשימה יכולה להתבצע על ידי סוגים שונים של רחפנים. ביום קיימים מגוון רחב של רחפנים שונים החל מרחפן בעל 3 מנועים עד לרחפן בעל 8 מנועים אשר מסוגלים לשאת משקלים שונים והתקנים שונים ובעל יכולת תמרון ושליטה טובים מאוד. ניתן לרכוש אותם ולהפעילם באופן עצמאי.
3. ביצוע המשימה על ידי עיבוד תמונה.
4. ביצוע המשימה על ידי איכון GPS.

רכיבן חלופות מערכתיות:

כלי הטסה:

חלופה	יתרונות חסרונות	חסרונות
טייס	<ul style="list-style-type: none"> טייסה בmahירות גבוהה. יכולה טייסה במצבים מצג אוויר משתנים. 	<ul style="list-style-type: none"> חוסר יכולת ריחוף מעל היעד. קושי בתמרון בשטחים קטנים ובפניות חדות. טעינת ציוד דורשת נחיתה והמראה מלאה. מחיר. <p>כל ההתקנים צריכים להיבנות כמכלולים פנימיים במטרה כדי לשומר על מבנה אוירודינמי.</p>
רחפן	<ul style="list-style-type: none"> יכולה ריחוף מעל יעד. תמרון טוב בשטחים קטנים ופינויות חדות. יכולהטעינת ציוד באוויר, ללא כל צורך בנחיתה מלאה. יכולה העמשה גדולה. מחיר. 	<ul style="list-style-type: none"> קושי קל ביצוב טייסה במצבים מצג אוויר משתנים. marsh ח'י סוללה קצרים. טיסה בmahירות נמוכה.

טבלה 2 – יתרונות וחסרונות של כלי הטיס השונים

אמצעי ניוטן:

חלופה	יתרונות חסרונות	חסרונות
עיבוד תמונה	<ul style="list-style-type: none"> גבولات תא השטח יותר מדויקים. יכולה זיהוי מדויקת של המיקום המבוקש. יכולה הטסה במקומות סגורים. 	<ul style="list-style-type: none"> זמן לימוד ארוך ומורכב של תא השטח הרצוי לפני כל שימוש. חייב להיות שניי בתא השטח הרצוי מול תא שטח סטוכים. מרחק ביצוע משימה קצר עקב הצורך באיתור המיקום המדוייק. בזבוז ח'י סוללה לאיתור המיקום, דבר הגורם בזמן טיסה קצר.
GPS	<ul style="list-style-type: none"> יכולה ביצוע משימה למרחק רב. יכולה שינוי יעד באופן פשוט לכל משימה ללא כל צורך בלימוד מקדים. אינו צורך משאבי סוללה לצורך איתור היעד המבוקש, דבר המאפשר ניהול ח'י סוללה מרבי לצורך ביצוע המשימה. 	<ul style="list-style-type: none"> תיתכן סטייה קטנה בין מיקום היעד הפיזי לבין המיקום שהתקבל במקלט GPS. חייב קליות לוינינס על מנת לאקן את המיקום.

טבלה 3 – יתרונות וחסרונות של אמצעי הניות

קריטריון	משקל	חלופה א': רחפן	חלופה ב': טיסן
מחיר	0.15	8	8
כושר תנועה	0.25	7	6
דיק ביצוע המשימה	0.6	4	9
ציון	1	8.1	5.35

טבלה 4 – מתן ציון לכל חלופה מעריכית של כלי הטיס

כלי הטיס שנבחר לביצוע המשימה בפרויקט זה הינו רחפן בשל כושר התנועה הטוב שיש לו לצד יכולת גבואה של דיק ביצוע המשימה הכלול עבירה מעלה יעד מבודק, והטלת חפץ כלשהו ביעד זה.

קריטריון	משקל	חלופה א': עיבוד תמונה	חלופה ב': GPS
מחיר	0.1	4	9
יכולת זיהוי היעד	0.25	9	7
משך זמן הגעה ליעד	0.35	3	9
סיבוכיות	0.3	4	8
ציון	1	4.9	8.2

טבלה 5 – מתן ציון לכל חלופה מעריכית של אמצעי הניווט

אמצעי הניווט שנבחר לביצוע המשימה בפרויקט זה הינו GPS. בחירה זו נובעת מהצורך להגיאם במדויקות קרוב ככל האפשר אל היעד המוגדר, לעצור מעלי ולבצע את המשימה. בנוסף, השימוש במקלט GPS הינו פשוט, קל לתכנות ונוח לשימוש.

8.2 חלופות טכנולוגיות:

1. חלופות ליחידות בקרים (מיקרו בקר) - קיימים מספר סוגי עיקריים של בקרים: Raspberry Pi סולר Arduino Esp32/8266. שיקול בחירת הבקר יהיה בהתאם לפונקציונליות, יתרונות וחסרונות ייחידת הבקרה בהתאם לדרישות הביצוע.
2. חלופות ליחידות בקר טיסה - קיימים מספר סוגי של בקרים טיסה כמו Naza , ArduCopter , Pixhawk . שיקול בחירת הבקר יהיה בהתאם לפונקציונליות, תקציב והתאמתו לרחפן.
3. מיפוי של תא שטח ללא שימוש ברכיב GPS אפשרי על ידי הצבת סימון במקומות הרצויים על ידי חישנים או משדרים אשר נקלטים בכל הטייס. חלופה זו מחייבת הגעה לכל מקום וסימון תא שטח, משימה נוספת שלא תמיד ניתנת לביצוע.

4. حلופות לתוכנת ניהול הטיסה – קיימות מספר תוכנות של ניהול בקר הטיסה כגון: CleanFlight, MissionPlanner, BetaFlight וhayesair לבקר הטיסה.

5. حلופות לתוכנות התקנים- על הרחפן מותקנים רכיבים נוספים כגון: אג, זרוע מכנית, GPS.

נוסף. קיימות מספר שפות תוכנות לכנתית קוד תוכנה לניהול ההתקנים כגון: C, Phyton.

6. حلופות למערכת תקשורת וידאו – קיימות מספר שיטות להעברת וידאו מכל' הטיס אל ייחידת הבסיס כגון: תקשורת WiFi ותקשורת אנלוגית.

רכיבן חלופות טכנולוגיות:

פתרונות	פירוט בתוך הolution	פתרונות	פתרונות
הchèlonot	'תרונות	הchèlonot	הchèlonot
בקר טיסה	ArduCopter	• מחיר. • תוכנה פתוחה.	• לא נתמך יותר בגרסאות חדשות של תוכנה. • קושי בכיוול בקר ה-PID באורה מיטבית. • בעל כוח עיבוד נתונים מחלש של 8 ביט.
Naza	• בקר טיסה פופולרי המיוצר על ידי חברת הענק DJI. • בקר טיסה מסווג Plug & Play. • בקר פופולרי לשימוש למי שלא הוצה להתעסק עם תוכנות חמורה.	• תוכנה סגורה. • לא בקר אידיאלי עבור סטודנטים באוניברסיטה. • מחיר.	
Pixhawk	• בעל כוח עיבוד נתונים חזק של 32 ביט. • תוכנה פתוחה. • בעל כניסה מרובות אשר מאפשרות תקשורת עם בקר חיצוני. • בקר טיסה פופולרי בעולם הרחפנים. • יחסית בקר זול לאפשרויות שהוא מציע.	• בקר טיסה מושן.	
טיסה ניהול טיסות	MissionPlanner	• תומך במספר רב של בקרים טיסה. • מכיל אלגוריתמי בקרה מתقدמים מאוד. • תומך במגוון רחב של כלי טיס. • תוכנה חינמית. •מצוין להטסה אוטונומית.	• תוכנה חינמית – לא מקצועית. • לא בחירה טוביה למישוריצה לבנות רחפן.
	BetaFlight	• תומך בכל בקר טיסה autopilot. • קהילת משתמשים רחבה. • נתון ביצועים מעולים למי שמעוניין בהטסה ידנית.	• לא ישים להטסה אוטונומית של רחפנים.
	CleanFlight	• תומך בכל בקר טיסה autopilot. • קהילת משתמשים רחבה.	• לא ישים להטסה אוטונומית של רחפנים.

		<ul style="list-style-type: none"> נתון ביצועים מעולים למי שמעוניין. בהתסה ידנית. 		
מיקרו-בקר	Arduino	<ul style="list-style-type: none"> משמעותי לארטיקום מחיישנים ושליטה על מנועים. קל לתכנות. בעל מדרכים רבים באינטרנט. מחיר. 	<ul style="list-style-type: none"> מיכון כוח חישוב היעדר כוח חישוב ומערכות הפעלה. 	
Rasberry pi	Esp8266	<ul style="list-style-type: none"> אפשרויות שימוש רבים בזכות כוח עיבוד גבוה. לא יכול לקרוא ערבים של חיישנים אנלוגיים. מסובך לתכנות. 	<ul style="list-style-type: none"> אפשרות שימוש רבים בזכות כוח עיבוד גבוה. הרצה של מספר תוכניות באותו הזמן. 	
Esp32	T-Journal ESP32 Camera (IP Camera)	<ul style="list-style-type: none"> כוח עיבוד גובה של 32 ביט. תמייה במגון רחב של פרוטוקולי תקשורת. WIFI פנימי. מחיר. 	<ul style="list-style-type: none"> כוח עיבוד גובה של 32 ביט. תמייה במגון רחב של פרוטוקולי תקשורת. WIFI פנימי. מספר רב של כניסה אנלוגיות. 	<ul style="list-style-type: none"> מחיר יקר יותר ביחס ליתר המיקרו-בקרים האחרים.
מערכת תקשורת וידיאו	ImmersionRc + LawMate (Analog Video)	<ul style="list-style-type: none"> יכולת WIFI פנימי, קישוריות לפוי. O. גודל פיזי קטן של המודול. קל ופשוט לימוש. מחיר. 	<ul style="list-style-type: none"> יכולת שידור וידיאו לאנalog לרוחק רב. גודל משדר קטן. קל ופשוט לימוש. 	<ul style="list-style-type: none"> יכולת WIFI פנימי, קישוריות לפוי. גודל פיזי קטן של המודול. קל ופשוט לימוש.

טבלה 6 – יתרונות וחסרונות של הצליפות הטכנולוגיות

קריטריון	משקל	חלופה א': ArduCopter	חלופה ב': Naza	חלופה ג': Pixhawk
מחיר	0.1	9	3	7
כוח עיבוד	0.2	3	9	9
פופולריות	0.3	5	9	9
תוכנה פתוחה	0.4	9	0	9
ציון	1	6.6	4.8	8.8

טבלה 7 – מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של בקר טיסה

בקיר הטיסה שנבחר לפרויקט זה הוא Pixhawk לאחר ובקיר זה בעל יכולת עבודה גבוהה, קל לתפעול, בעל תוכנה חינמית, פתוחה ונוחה לשימוש. בנוסף מכיוון שבקר זה פופולרי בשוק, קיימים מדריכים רבים עליו.

חלופה ג':	חלופה ב':	חלופה א':	משקל	קריטריון
CleanFlight	BetaFlight	MissionPlanner		
7	6	9	0.3	נוחות שימוש
4	4	8	0.3	התאמת לדרישות הפרויקט
8	9	8	0.3	פופולריות
9	9	9	0.1	תוכנה פתוחה
6.6	6.6	8.4	1	ציון

טבלה 8 – מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של תוכנת ניהול טיסה

התוכנה שנבחרה לפרויקט זה היא Mission Planner מאחר ותוכנה זו מספקת יכולת תכנון משימה אוטומטית לצורה נוחה למשתמש ובעל פונקציונליות רבה.

חלופה ד':	חלופה ג':	חלופה ב':	חלופה א':	משקל	קריטריון
Esp8266	Esp32	Raspberry Pi	Arduino		
9	9	5	9	0.4	נוחות שימוש
8	7	4	8	0.1	מחיר
8	8	8	8	0.3	פופולריות
7	8	9	5	0.2	כוח עיבוד
8.2	8.3	6.6	7.8	1	ציון

טבלה 9 – מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של מיקרו בקר

המיקרו-בקר שנבחר לפרויקט זה הוא ESP32 מאחר והתכונות בו קל ופשוט, בקר זה בעל יכולת עיבוד יחסית גבוהה ביחס לשאר הבקרים. מחירו של הבקר זול וקיימת הדרכה רבה לגבי ברשות.

חלופה ב':	חלופה א':	משקל	קriterion
ImmersionRc + LawMate (Analog Video)	T-Journal ESP32 Camera (IP Camera)		
9	9	0.1	נוחות שימוש
4	8	0.05	מחיר
10	2	0.5	מרחק שידור
8	8	0.35	משקל משדר
8.9	5.1	1	ציון

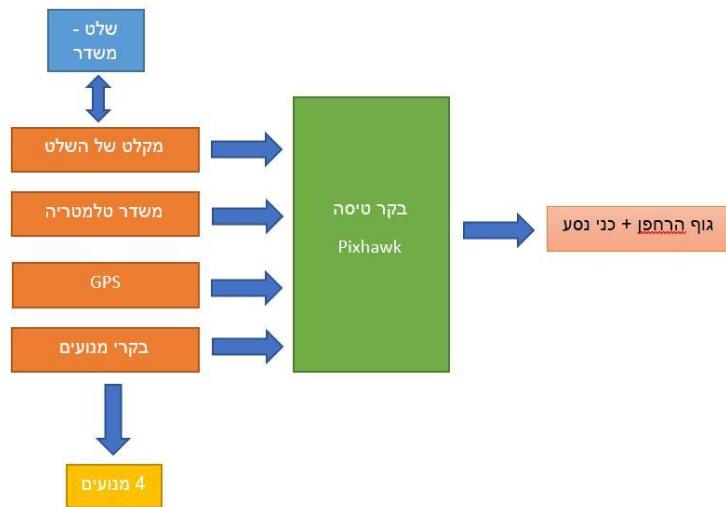
טבלה 10 – מתן ציון לכל חלופה טכנולוגית של מערכת הווידיאו האנלוגית

מערכת התקשרות לשידור וקליטת וידאו שנבחרה בפרויקט זה היא מערכת אנלוגית מכיוון שיש לה יכולת שידור וידאו למרחק רב ביחס לשידור וידאו ב-WIFI.

9. תקן הנדסי מפורט

9.1 חלק 1 – יחידת ניהול מהלך הטיסה האוטומטי

דיאגרמת בלוקים של יחידת הטיסה:



איור מס' 9 – דיאגרמת בלוקים של יחידת הטיסה

9.1.1 גוף הרחפן:

מסגרת הרחפן זהה המבנה המחזיק את כל הרכיבים האלקטרוניים ייחדי. המסגרת צריכה להיות חזקה, נוקשה ולמנוע רעדות מהמנועים. גוף הרחפן מורכב משלושה חלקים עיקריים:

- מרכז המסגרת – החלקعلוי נמצאים הרכיבים האלקטרוניים והסוללה. בפרויקט זה, מרכז המסגרת עשוי מאלומיניום.
- זרועות – מחברים בין מרכז הרחפן למנועים, צרים למנוע מתנדות שמוקורן במנועים להשפיע זה על זה ועל מרכז הרחפן. בפרויקט זה, הזרועות עשויות פלסטיק קשיח.

- כני נסע – נשאים את משקל הרחפן כאשר הוא על הקרקע, מונעים מלכלוך וצמחים להגעה אל המנועים. בפרויקט זה, כני הנסע עשויים מפלסטיק קשיח.

פרמטרים של גוף הרחפן:

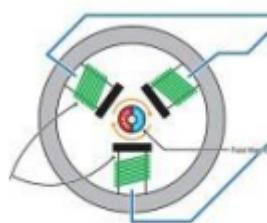
- שם מודל – F450
- משקל – 282g
- אורך בסיס אלכסוני – 450mm

9.1.2 מנועים/מדחפים:

בפרויקט זה הרחפן פועל באמצעות מנועים ללא מברשות (Brushless Motor), סוג מנוע זה משתמש בסילילים קבועים שיוצרים שדה צפוני בעת סיבוב המנועים.

מנוע זה מורכב מ-2 חלקים:

- מערכת מגנטים פנימית (Inrunner)
- מערכת מגנטים חיצונית (Outrunner)



איור מס' 10 – מבנה פנימי של מנוע Brushless

מנועים ללא מברשות מגיעים במגוון סוגיים. כאשר בוחרים מנוע צריך לשים לב למשקל המנוע, גודלו, האם הוא מתאים למדחף בו אנו רוצחים לשימוש, צריכה הזרם ומהירותו לכלי וולט. בחירת דירוג KV – זהו נתון על המנוע אשר מציין על מספר הסיבובים שיכול מנוע מסוים לעשות בדקה (RPM) עבור כל 1 וולט מתח שישפכו לו. את סך הסיבובים בדקה שיעשה המנוע מחשבים לפי הכפלת הדירוג KV במספר הוולטים אותם נספק למנוע:

$$RPM = KV * V$$

נוסחה 1 – חישוב מספר סיבובים לדקה

פרמטרים של המנוע:

- שם מודל – Eagle Power GA2316
- דירוג KV – 1250
- גודל מנוע – 32x28.2mm
- משקל – 69g

9.1.3 פרופולרים:

גודל המדחף נמדד על פי הקוטר שלו וזווית הפסיעה שלו. לרוב הכל שהמדחף גדול יותר כך הוא יכול ליצור יותר דחף אבל דורש יותר כוח כדי להניע אותו. זווית הפסיעה של המדחף נמדדת על פי כמה אינצ'ים המדחף מתקדם בכל סיבוב. ככל שזווית הפסיעה יותר גדולה כך המדחף מייצר יותר דחף. לקבלת מהירות נבחר מדחף בעל פסיעה גדולה יותר ולקבלת כוח נבחר מדחף בעל קווטר גדול.

פרמטרים של המדחף:

- סוג חומר – פלסטיק
- קוטר המדחף - 9 אינץ'
- זווית הפסיעה של המדחף- 4.7 אינץ'

9.1.4 בקריה מהירות:

במנועים ללא מברשות ישנים מספר סילילים, באם כל הסילילים במנוע יקבלו זרם בביטחון המנוע לא יסתובב כלל. על מנת להניע את המנועים דרושים בקרים שינויו את תזמון העברת הזרמים בין הסילילים. ככל שהבקר ישנה את חלוקת הזרמים מהר יותר כך המנוע יסתובב מהר יותר. צריכה הזרם אל המנועים נקבעת על ידי המנועים עצם, ככל שייתור קשה למנוע להסתובב כך הוא ידרש יותר

זרם. בבחירה בקרי המגוועים חשוב להתאים את הבקרים עצם לגוועים כך שיוכלו לתמוך בצריכת הזרם המקורי שלמהנו יכול לדרש, אחרת נשרוף את הבקרים. חזק הבקר נמדד באמפרים – ככל שמספר האמפרים גבוה יותר כך הבקר מסוגל להעביר יותר זרם למגוועים.

פרמטרים של בקר המהירות:

- שם מודל – SunRise Model BLHELI MULTI
- זרם מירבי – 30A
- גודל – 17x46mm
- משקל – 18g

:GPS מקלט 9.1.5

מקלט ה-GPS קולט תדרורות לוויינים ומחשב את מיקומו למרחב על ידי פתרון משוואות המיקום. מקלט ה-GPS מותקן בדרך כלל במרחק כלשהו מהסוללה או ממקורות זרם גבוהים היכולים ליצור השראות מגנטית. מקלט GPS בכל טיס בדרך כלל מספק שני נתונים – מיקום ומהירות.

פרמטרים של ה-GPS:

- שם מודל – RadioLink SE100 M8N
- הספק קליטה מינימלי - -167dBm
- שבח אנטנה – 2.5dBi
- רמת דיק מיקום – 50[cm]
- גובה עבודה מירבי – 50,000m
- מהירות עבודה מירבית – $515\frac{m}{s}$
- רמת דיק מהירות – $0.1\frac{m}{sec}$
- שיטת ריבוב - CDMA
- מכיל מצפן העובד בפרטוקול תקשורת I2C

чисובים:

נניח טמפרטורת מקלט $T=300^{\circ}K$.

נניח רוחב סרט של $B=1[KHz]$.

את החישובים נבצע לפי הספק קליטה ממוצע של $-140dBm$.

יחס אותן לרעש:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{KTB} = \frac{10^{-17}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10^3} = 3.8dB$$

נוסחה 2 – חישוביחס אותן לרעש

קצב העברת נתונים:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 1 \cdot 10^3 \cdot \log_2 (1 + 10^{0.38}) = 1.76Kbps$$

נוסחה 3 – חישוב קצב העברת נתונים בערך לפי שנון

9.1.6 מערכת שליטה: **FlySky Fs-i6- מושדר**

משקל [g]	שיטת אפנון	הספק שידור	רוחב סרט [KHz]	טווח תדרי עבודה [GHz]	מספר ערוצים
392	GFSK	<20dBm	500	2.4055 – 2.475	10

טבלה 11 – נתוני השלט (מושדר)

- בוצע לשילט שדרוג תוכנה מ-6 ערוצים ל-10 ערוצים.

מקלט – FS-IA10B

משקל [g]	שיטת אפנון	הספק קליטה מינימלי	רוחב סרט [KHz]	טווח תדרי עבודה [GHz]	מספר ערוצים
17.6	GFSK	-105dBm	500	2.4055 – 2.475	10

טבלה 12 – נתוני המקלט

חישוב תאורי של מרחק השידור:
מרחק השידור בין המושדר למקלט מבוצע על ידי נוסחת FRIIS:
בනחת שידור בשטח פתוח עם קשר עין בין האנטנות, $\lambda=0.125$.
האנטנת מקלט ומושדר היא אנטנת חוט, لكن נניח שבב $0dB$.

$$R = \sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * P_r}} = \sqrt{\frac{10^{-1} * 10^0 * 10^0 * 0.125^2}{(4\pi)^2 * 10^{-13.5}}} = 17.7 * 10^3 [m] = 17.7 [km]$$

נוסחה 4 – חישוב תאורי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קו ראייה

נניח טמפרטורת מקלט $K=300^\circ K$.

יחסאות לרעש:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{KT_B} = \frac{10^{-13.5}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 500 \cdot 10^3} = 15.3 dB$$

נוסחה 5 – חישוביחסות לרעש

קצב העברת נתונים:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 500 \cdot 10^3 \cdot \log_2 (1 + 10^{1.53}) = 2.6 Mbps$$

נוסחה 6 – חישוב קצב העברת נתונים בערך לפי שנון

9.1.7 מערכת תלמטריה: **מושדר \| מקלט –**

משקל המקלט [g]	משקל המושדר [g]	שיטת ריבוב ערוצים	הספק קליטה מינימלי	הספק שידור	Baud Rate	קצב העברת מידע באוויר	תדר עבודה [MHz]
16	14	FHSS	-121dBm	<20dBm	57600	<250kbps	433

טבלה 13 – נתוני מערכת התלמטריה

חישוב תאורטי של מרחק השידור:

מרחק השידור בין המძר למקלט מבוצע על ידי נוסחת FRIIS:
בහנחת שידור בשטח פתוח עם קשר עין בין האנטנות, $n=2$.
נניח שאנטנת השידור שביחד הרחפן בעלת שבח של 3dBi .

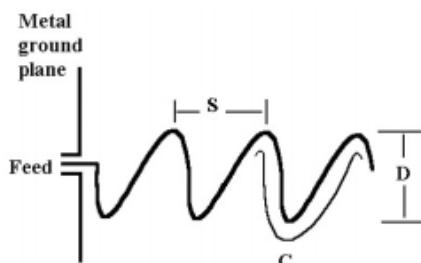
$$R = \sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * P_r}} = \sqrt{\frac{10^{-1} * 10^{-0.3} * 10^0 * 0.69^2}{(4\pi)^2 * 10^{-15.1}}} = 436 * 10^3 [m] = 436 [km]$$

נוסחה 7 – חישוב תאורטי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קו ראייה

אנטנת הטלמטריה שביחד הבסיס:

תיאור כללי של מבנה אנטנת סליל עם משטח אדמה (אנטנת הליקס):

אנטנת הליקס מורכבת מתיל נחושת בעל מספר ליופים הנמצא מעל משטח אדמה. זהה אנטנה קלת משקל במיוחד עם קווטוב מעגלי כמעט מושלם. עיקומת הקירינה המתקבלת דומה לעקומת קירינה של מונופול. היתרון של אנטנת הליקס באופן הפעולה זה שהאנטנה קצרה יותר באופן משמעותי מאנטנת מונופול.



איור מס' 11 - תיאור מבנה כללי של אנטנת הליקס

האנטנה מורכבת מדיפול באורך כולל של 360mm בעל 7 ליופים הנמצא מעל משטח אדמה בגודל של $80 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$. באנטנה שבניתה, השתמשתי במשטח אדמה לצורך הגדלת השבח של האנטנה. אורך גל λ של תדר 433MHz הוא 690mm.

מטרת האנטנה:

האנטנה תיושם בתור אנטנה למערכת טלמטריה בתדר 433MHz של רחפן.

תוצאות מדידה:

• תוצאות מכשיר ה-NetWork Analyzer



איור מס' 12 - בדיקת תיאום אימפרנסים במכשיר NetWork Analyzer

בתדר 433MHz מקבלים ערך של $B_{dB} = -9.8$:-

בתדר זה מקדם החזרה להספק הינו:

$$|\gamma| = 10^{-0.98} = 0.105 = 10.5\%$$

נוסחה 8 – חישוב מקדם החזרה להספק

מה שאומרים שרק 10.5% מהספק המשודר חוזר בחזרה ו- 89.5% מהספק משודר לאוויר.
מקדם החזרה למתח הינו:

$$|\gamma| = 0.105^{0.5} = 32.4\%$$

נוסחה 9 – חישוב מקדם החזרה למתח

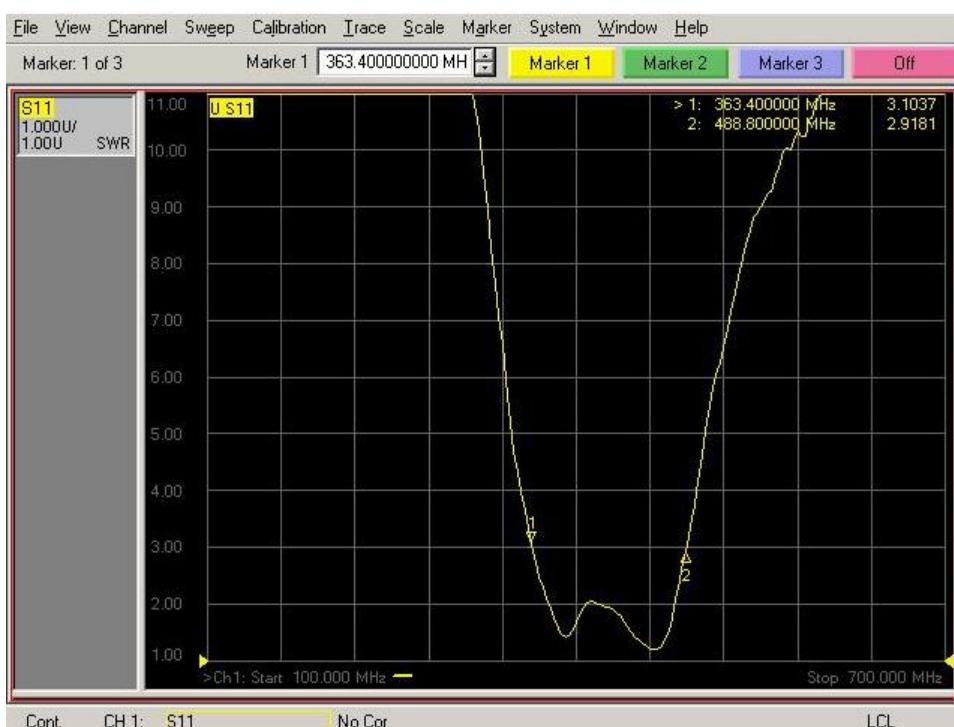
יחס גלים עומדים של אנטנה זו בתדר 433MHz הינו:

$$VSWR = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|} = \frac{1 + 0.105^{0.5}}{1 - 0.105^{0.5}} = 1.96$$

נוסחה 10 – חישוביחס גלים עומדים

מתוך החישובים הללו אנו רואים כי אנטנת הלייקס מתואמת בצורה די טובה בתדר 433MHz.

מדידת רוחב סרט של האנטנה:



איור מס' 13 - בדיקת רוחב סרט של האנטנה במקש"ר NetWork Analyzer

נניח כי מספיק מקדם החזרה להספק של $B_{dB} = -6$ לצורך מדידת רוחב הסרט.

$$|\gamma| = 10^{-0.6} = 0.25 = 25\%$$

נוסחה 11 – חישוב מקדם החזרה להספק

כלומר נסתפק שבתחום התדרים סביב 433MHz רק 25% מהספק המשודר יחזור בחזרה ו- 75% מהספק משודר לאוויר.

מכאן , מקדם ההחזרה למתח הוא:

$$|gamma| = 0.25^{0.5} = 0.5 = 50\%$$

נוסחה 12 – חישוב מקדם החזרה למתח

כלומר , יחס גלים עומדים יהיה:

$$VSWR = \frac{1 + |gamma|}{1 - |gamma|} = \frac{1 + 0.5}{1 - 0.5} = 3$$

נוסחה 13 – חישוב יחס גלים עומדים

לאחר שמצאתי את היחס גלים עומדים, ביצעת הציג של היחס גלים עומדים במקשיר ה- *NetWork Analyzer* ושמתי 2 מרכיבים בנקודה 3. ועל ידי כך מצאתי שרוחב הסרט של האנטנה הוא:

נוסחה 14 – חישוב רוחב הסרט של האנטנה

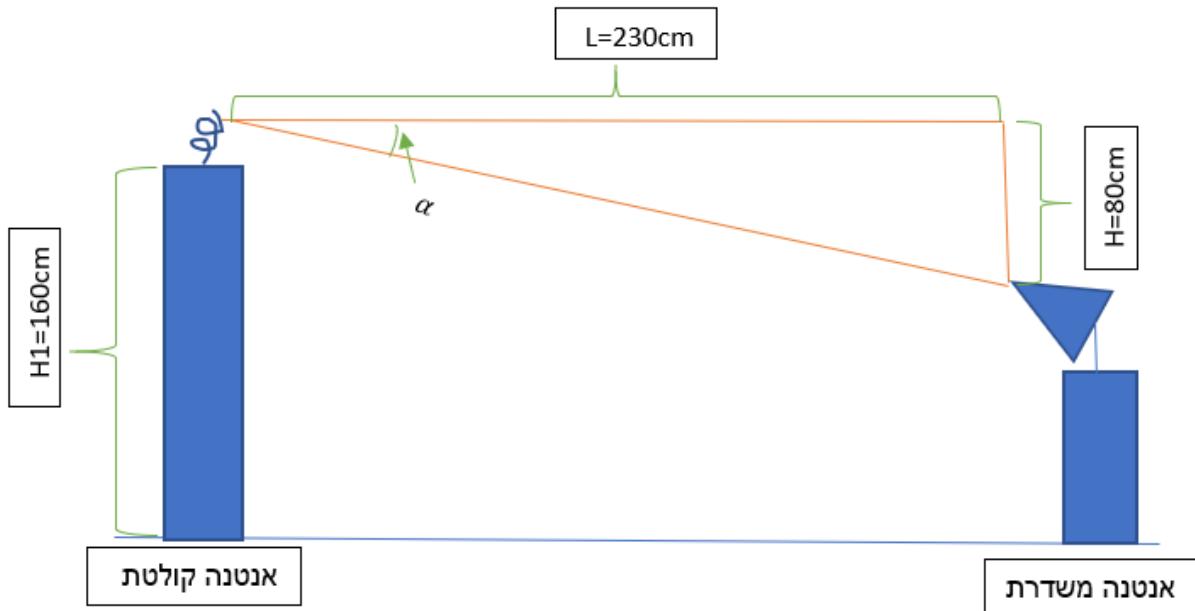
ביצעת 2 מדידות שונות באזימוט במתווך האנטנות:

1. כאשר האנטנה משדרת מתחת לקו האופק - הפרש הגבהים בין האנטנה הקולית והאנטנה המשדרת הוא 80cm.

2. כאשר האנטנה משדרת בקו האופק - הפרש הגבהים בין האנטנה הקולית והאנטנה המשדרת הוא 0cm.

המרחק בין האנטנות שבמטווך הוא 230cm

מקרה 1 – אנטנה משדרת מתחת לאופק



איור מס' 14- אנטנה משדרת מתחת לקו האופק



איור מס' 15 - גראף קרטיז של מדידת האנטנה בחתך אנכי (איזימוט) עבור תדר 433MHz

מתוך הגרפּ הקייטזִי ניתן לראות אדום בצבע אדום את המדייה של האנטנה כאשר הכבּל הקואקסיאלי מלוּוף מעט ויוצר עייפות של עקום הקיינְה. בצבע ורוד ניתן לראות את המדייה של האנטנה כאשר הכבּל מישר וכן מתכּבל שיפור ניכר בעקום הקיינְה. בצבע השחור ניתן לראות את המדייה של האנטנה כאשר חיבורת צ'וקר על הכבּל הקואקסיאלי. שימוש בצ'וקר נתן עקום קריינה כל כיונייפה ביחס.

כארש הפרש הגבהים בין האנטנות הוא 80cm מתקבלים שצווית הפתיחה בין האנטנות הוא:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{the height difference}}{\text{distance between the antennas}} = \frac{80\text{cm}}{230\text{cm}}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{80\text{cm}}{230\text{cm}}\right) = 19.2^\circ \cong 20^\circ$$

נוסחה 15 – חישוב זווית הפתיחה בין האנטנות

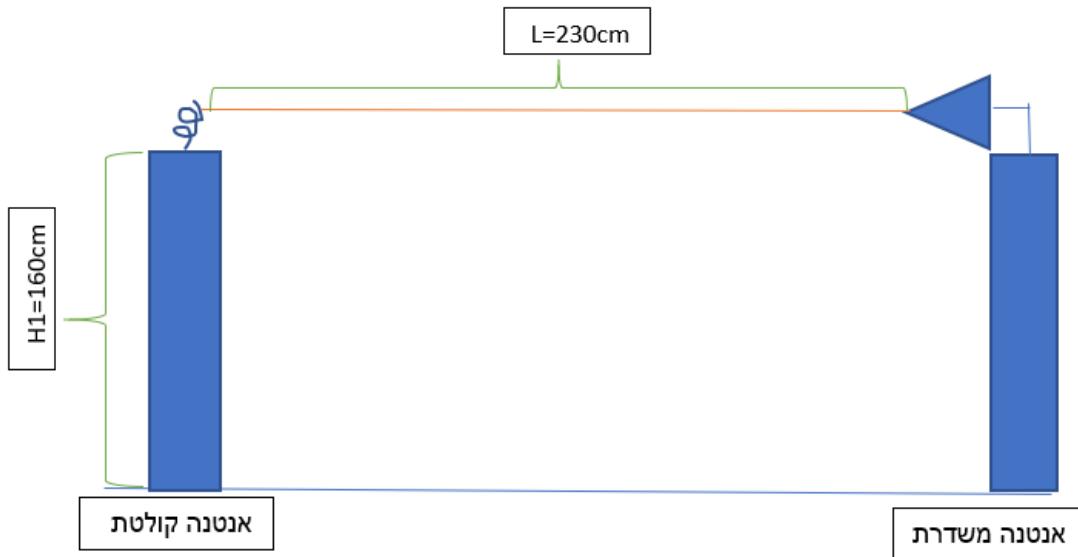
לאחר מכן, ביצעת מידה של האנטנה בשלושה תדרים שונים כאשר היצ'קר מחובר לקבל היקואקסיאלי על מנת לראות האם שינוי בתדר גורם לשינוי בעוקם הקירינה של האנטנה.



איור מס' 16 - גרפ' קרטזי של מדידת האנטנה בחתך אנכי (אדיםוט) עבור שלושה תדרים שונים

ניתן לראות מתוך בגרף הקרטזי של המדידה, כי כאשר מددתי את האנטנה בשלושה תדרים שונים של 430MHz, 433MHz, 436MHz לא נגרם שינוי לעקום הקרינה של האנטנה. לכן ניתן להבין כי שינוי קטן בתדר לא משנה לנו על עוקם הקרינה של האנטנה הנ"ל.

מקרה 2 – אנטנה משדרת בקו האופק



איור מס' 17 - אנטנה משדרת בקו האופק

במקרה זה, הפרש הגבהים בין האנטנה המשדרת לבין האנטנה הקולטת הוא 0cm. ולכן הזרווית פתיחה היא 0°. זאת שהאנטנות באותו הגובה ביצעתו מדידת שבח של האנטנה שבנית.

על מנת לדעת את שבח האנטנה שבניתה נדרש לבצע מדידה של אנטנתה יייחוס שאת השבח שלה אנו יודעים מראש, שבח אנטנתה היייחוס הוא 3dBi. לאחר מדידת אנטנתה היייחוס, נציב את הגוף הקרטזי של אנטנתה היייחוס על הגוף הקרטזי של האנטנה שבניתה ובודק מהו השבח המתקבל לאנטנה שבניתה.



איור מס' 18 - גוף קרטזי של מדידת אנטנתה יייחוס (ורוד) והאנטנה שבניתה (אדום) בחתך אנכי (Azimuth) בתדר MHz 433

אנו יודעים כי שבח אנטנתה היייחוס הוא 3dBi, لكن מתוך הגוף הקרטזי ניתן לראות שבח האנטנה שבניתה הוא $0 \text{dBi} \pm 2 \text{dBi}$. ככלומר במקסימום האנטנה בעלת שבח של 2dBi ובמינימום האנטנה בעלת שבח של -2dBi.

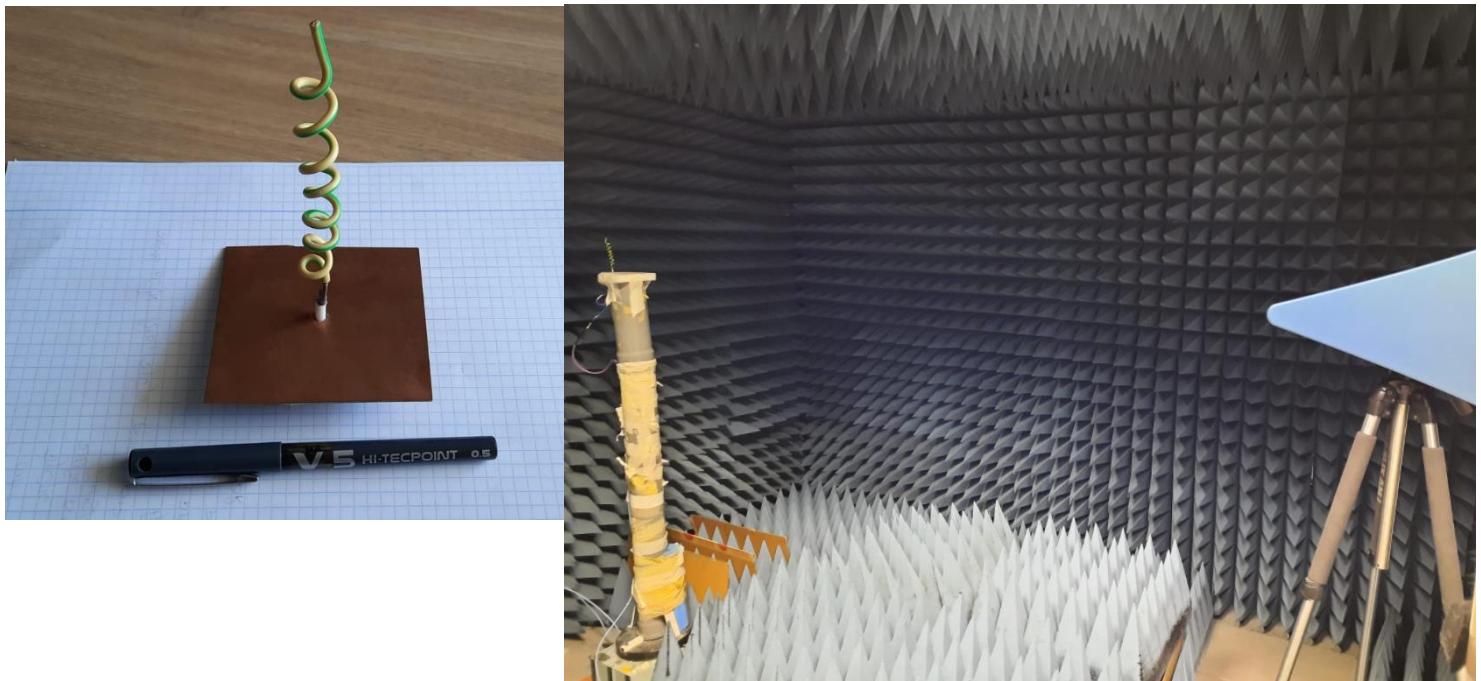
רכיבז נתוני האנטנה בטבלה:

תדר עבודה	433MHz
שבח אנטנתה היייחוס	3dBi
שבח האנטנה הבניתה	$0 \text{dBi} \pm 2 \text{dBi}$
רוחב אלומה באזימוט	360°
VSWR	1.96
רוחב סרט של האנטנה	125.4MHz
העבודה בכבל	50Ω
משקל	30gram
אורך אנטנה	12.5cm

7.8 x 8.5 cm ²	גודל משטח אדמה
SMA נקבה	סוג חיבור

טבלה 14 – ריכוז נתונים של אנטנתה ההליקס שבנהה

צלום האנטנה:



איור מס' 19- צילום האנטנה (משמאל) והאנטנה במתוח אנטנות (מימין)

9.1.8 סוללה:

בפרויקט זה נעשה שימוש בסוללות LiPo, סוללות ליתיום-פולימר.
 יתרונותיהן:

- קלות מרובה הסוללות בגין קיבולת שלחה.
- בעלות קצב טעינה ופריקה גבוהה.

חסרונותיהן:

- טיפול לא נכון עלול להרוויס אותן.
- עלולות להתפוצץ עקב טיפול לא נכון.

לכל סוללה יש מקדם C (Capacity) משלها והוא זהה למספר האמפר לשעה של הסוללה. בפריקה – לכל סוללה ישנו ערך פריקה מסויל והוא מגדר כמה זרם הסוללה יכולה להוציא. החישוב של כמות הזרם שסוללה יכולה להזרים היא:

$$(Discharge Rate) * (C Coefficient)$$

נוסחה 16 – חישוב כמות הזרם המרבי שסוללה יכולה להזרים

הפרמטרים של הסוללות:

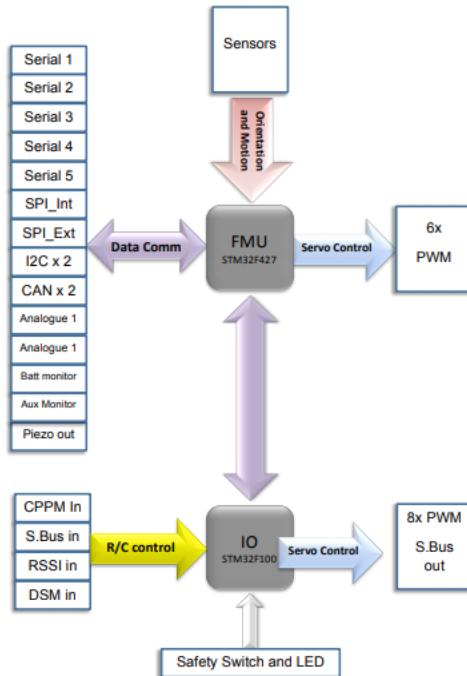
שם מודל	מספר תאים	מתח [V]	קצב פריקה[mah]	קיבולת[mah]	מקדם C	משקל [g]	מימדים [cm^3]
Infinity	4	14.8	65C	3300	3.3	352	13.5x4x2.8
Infinity	3	11.1	5C	3000	3	168	9x2.7x2.5
Infinity	3	11.1	70C	550	0.55	54	5.5x3x1.6

טבלה 15 – נתונים הסוללות

9.1.9 בקר טיסה:

בקר הטיסה זהו "המוח" של מערכת הטיסה. בתוכו נמצאים יחידות עיבוד, חישונים ורכיבים נוספים המספקים בקרה על תהליכיים שונים ויציבות לרוחפן. מכיוון שהיכולת שלו אדירה, נדרש לעורק לא מעט ניסוי טיסה על מנת לכידל את ערכי הבקרים המובנים אצלם לרחוף הספציפי שתוכן בפרויקט זה. תחילתה נטיס את הרוחפן באמצעות שלט ידני ותוך כדי טיסה ידנית נכידל את בקרים הטיסה של הרוחפן עד לקבלת תוצאה מספקת.

בקר הטיסה שיפורם בפרויקט זה הינו Pixhawk , בקר זה מורכב מ-2 יחידות מרכזיות:



איור מס' 20 – היחידות המרכזיות של בקר הטיסה

1. (FMU) Flight Management Unit: יחידה זו היא מרכיב מרכזי באוינוניקת הרוחפן.

מפורט טכני:

- מעבד 32 ביט מסוג M4 Cortex בעל זיכרון flash של 2MB לשיליטה על הטיסה ותקשורת.
- מד תואזה (MPU6000) בעל מדידה של שלושה צירים לקביעת מיקום וקבלת השפעות חיצונית.
- מצפן (LSM303D).
- חיישן לחץ ברומטרי (MS5611) לקביעת הגובה.
- בעל כניסה GPS.
- בעל כניסות – (RSSI, MicroUSB, SPI, I2C, PPM, UART(serial ports), RSSI, MicroUSB, SPI, I2C, PPM, UART(serial ports)).

(MPU6000) מד תואזה/Gyroscope 1.1

תפקיד – מדידת המהירות היחסית והתואזה בשלושה צירים לצורך ייצוב הרוחפן.

מפורט טכני:

רמת דיווק: 16bit

טוחני מדידת מהירותים זוויתית: $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ [deg/sec]

טוחני מדידת תאזה: $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ [g]

צורת תקשורת: SPI

תדר עבודה: 20MHz

1.2 מזגן (LSM303D)

תפקיד – זיהוי תנובה ושדה מגנטי כך שנוכל לדעת לאן חzikת הרחפן מכוונת במרחב.

מפורט טכני:

רמת דיווק: 16bit

טוחח מדידה מגנטי: [gauss] ±2, ±4, ±8, ±12

טוחח מדידה לתאוצה לינארית: [g] ±2, ±4, ±6, ±8, ±16

צורת תקשורת: SPI

תדר עבודה: 400kHz

1.3 מד לחץ ברומטרי (MS5611)

תפקיד – מד לחץ אוויר, בעזרתו מדידת לחץ האוויר ניתן לחשב את גובה הרחפן מעל פני הים.

מפורט טכני:

רמת דיווק: 24bit

דיוק גובה מירבי: 10cm

צורת תקשורת: SPI

תדר עבודה: 20MHz

2. Input Output (IO)

מתאים הקלט/פלט מייצגים תת מערכת שלמה לאיסוף ובקרה נתונים.

מפורט טכני/יכולות:

מייקרו בקר שמתממשק לייחידת ה-FMU.

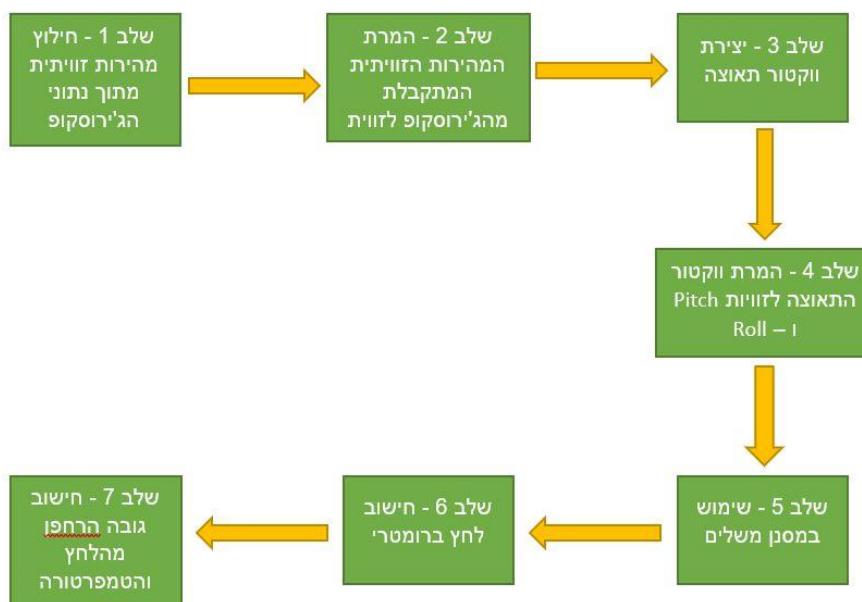
חיבור הסוללה ישירות אל היחידה, כך שניהול הכוח לא יהיה על ייחידת ה-FMU.

8 יציאות PWM.

מספר סוג כניסה מסוג PPM-SUM/SBUS-PPM

9.1.10 אלגוריתם בקר הטיסה:

סכימת בלוקים של אלגוריתם בקר הטיסה Pixhawk

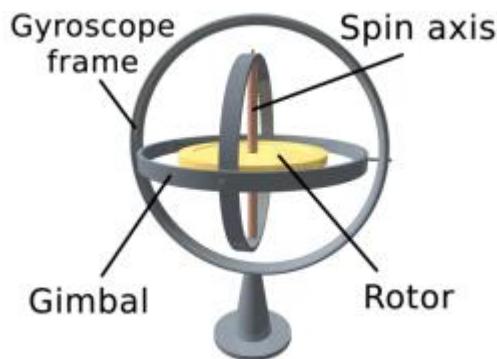


איור מס' 21 – סכימת בלוקים של אלגוריתם בקר הטיסה

הסבר שלבי אלגוריתם בקר הטיסה Pixhawk

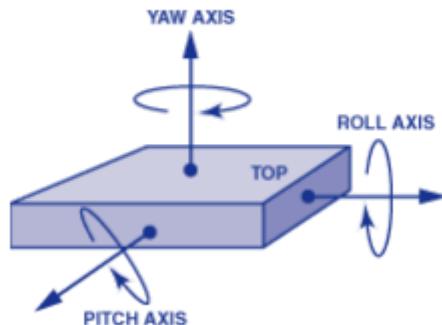
שלב 1 – חילוץ מהירות הזוויתית מתוך הג'ירוסקופ

ג'ירוסקופ הוא מכשיר המשמש לממדידה או שמירה של יציבות, תוך התבבסות על עקרונות שימור התנועה הזוויתית. אחד השימושים הנפוצים של מכשיר זה הוא מדידת הזווית שבין גוף הנמצא בתנועה לגוף במצב אופקי, כאשר המצב האופקי בדרך כלל הוא הקירע של כדור הארץ.



איור מס' 22 – תיאור רכיב הג'ירוסקופ

הג'ירוסקופ הדיגיטלי המורכב בקר הטיסה מסוגל לתרגם את תנועת הגוף שעליו הוא מותקן למהירות זוויתית סיבוב אותו הציר שהגוף נוע.



איור מס' 23 – תיאור גלגול, עלהוד וסיבוסוב ביחס לכל ציר

המהירות הזוויתית, ω , נמדדת ביחידות של מעלות לשנייה ($\frac{deg}{sec}$) סיבוב כל אחד משולשת הצירים – עלהוד, סיבוסוב וגלגול. תוצאת המדידה של הג'ירוסקופ היא 3 מהירויות זוויתיות, מהירות זוויתית לכל ציר.

שלב 2 – המרת מהירות הזוויתית המתקבלת מהג'ירוסקופ לחזיות

המדידות המתבלות מהג'ירוסקופ מספקות מהירות זוויתית. על ידי ביצוע אינטגרציה על המהירות הזוויתית נקבל את החזית של הרחפן ביחס לחזית ההתחלהית שלו.

$$\omega = \frac{\Delta\theta_{Gyro}}{\Delta t}$$

נוסחה 17 – חישוב מהירות זוויתית

לאחר ביצוע אינטגרציה, נקבל:

$$\theta_{Gyro} = \int_{t_0}^t \omega dt + \theta_0$$

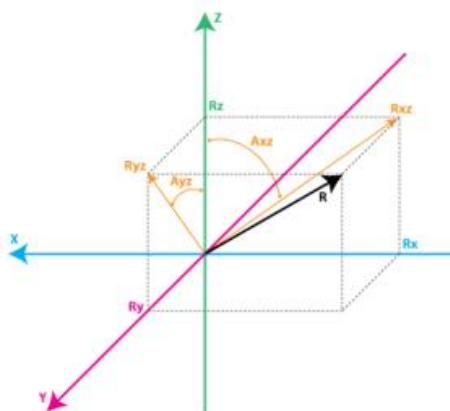
נוסחה 18 – חישוב הזוויות של הרחפן ביחס לזוויות ההתחלתית

כאשר:

- θ_{Gyro} - הזוויות של הרחפן המחשבת מתוך נתוני הג'ירוסקופ.
- ω - המהירות הזוותית המתקבלת מתוך המדידה של הג'ירוסקופ.
- θ_0 - הזוויות ההתחלתית של הרחפן.

שלב 3 – ייצור וקטור התאוצה

מד התאוצה המורכב על הרחפן יכול למדוד את גודל התאוצה המורגן בכל ציר ביחידות של g , כאשר g היא תאוצה הגוף החופשית - $[m/s^2]$.

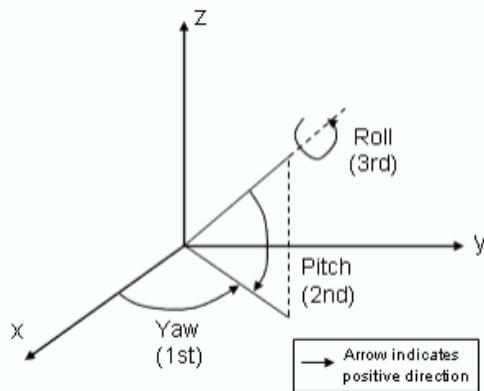


איור מס' 24 – תיאור ייצור וקטור התאוצה

ניתן לראות מתוך האיור כי הערכים המתוקבלים מתוך המדידות של מד התאוצה הם הערכים: R_x , R_y , R_z . מתוך הערכים הללו ניתן לחלץ את וקטור התאוצה R במרחב. במידה והרחפן במצב של שווון כוחות כך שלא מופעלת עליו שום תאוצה חזק מהתאוצה הגוף החופשית, g , אז נקבל כי גודל וקטור התאוצה יהיה קבוע, כלומר $R=g$.

שלב 4 – המרת וקטור התאוצה לזוויות Roll – Pitch

הזוויות Roll – Pitch משמשות לייצוג הרחפן ביחס למישור האופק:



איור מס' 25 – תיאור פריסת הזוויות Roll – Pitch במרחב

מאחר שוקטור התאוצה תמיד מצביע לכיוון מרכז כדור הארץ ביחס למישור האופקי, ניתן לחשב את זווית ה- Pitch ו- Roll של הרחפן ביחס לאופק על ידי חישוב טריגונומטרי פשוט. נניח שמדידות מד התאוצה - R_x , R_y , R_z שהתבצעו לפני כן הן מדידות התאוצה בכל ציר ממך התאוצה. נחשב תחילה את גודלו של וקטור התאוצה R של הרחפן במרחב:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

נוסחה 19 – חישוב גודלו של וקטור התאוצה R

לאחר חישוב וקטור התאוצה R, ניתן לחשב את סינוס הזווית באמצעות חישוב היחס בין כל אחת מקריאות מד התאוצה לבין וקטור התאוצה המשוקל R:

$$\sin(\theta_{AccRoll}) = \frac{R_y}{R} = \frac{R_y}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}}$$

$$\sin(\theta_{AccPitch}) = \frac{R_x}{R} = \frac{R_x}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}}$$

נוסחה 20 – חישוב סינוס הזווית בין כל אחת מקריאות מד התאוצה לבין וקטור התאוצה המשוקל R

נחלץ את הזווית עבר ציר X וציר Y:

$$\theta_{AccRoll} = \text{arcSin}\left(\frac{R_y}{R}\right)$$

$$\theta_{AccPitch} = \text{arcSin}\left(\frac{R_x}{R}\right)$$

נוסחה 21 – חישוב הזווית עבר צירים X ו-Y

שלב 5 – שימוש במסנן משלים

על מנת ליצור מדידת זווית מדויקת, $\theta_{CompFilter}$, משתמש במסנן משלים שלו נכניס את הזווית המคำשבת בג'ירוסקופ ואת הזווית המคำשבת באמצעות מד התאוצה:

$$\theta_{CompFilter} = w * \theta_{Gyro} + (1 - w) * \theta_{Accel}$$

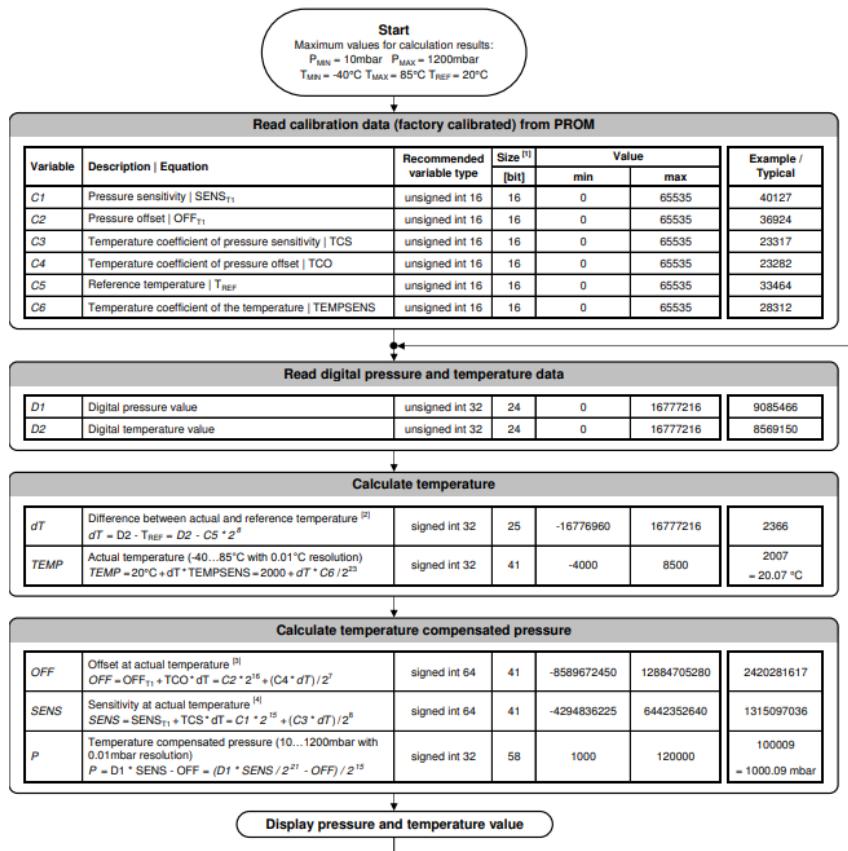
נוסחה 22 – מדידת זווית מדויקת על ידי שימוש במסנן משלים

סכום המשקלים במסנן זה הוא 1. ניתן למדידת הג'ירוסקופ משקל גבוה ביחס למשקל של מד התאוצה. כך נקבל מצב שמדידת הג'ירוסקופ תקבע את ערכי הזווית短时间内 קצר, ומדידת מד התאוצה תקבע את ערכי הזווית לארוך זמן.

שלב 6- חישוב לחץ בברומטר

על מנת למדוד את גובה הטישה, בקר הטישה מכיל בתוכו מד לחץ (ברומטר) דיגיטלי. מכיוון של לחץ מושפע מאוד מטמפרטורה, מד הלחץ כולל בתוכו גם מד טמפרטורה. התרשימים הבא מציג את תהליך קריית הברומטר:

PRESSURE AND TEMPERATURE CALCULATION



איור מס' 26 – תהליך קריית הברומטר

בשלב בו מתבצע קריית הלחץ והטמפרטורה מהברומטר, הברומטר מבצע המירה של הערך הנמדד מהחישון באמצעות ADC של 24 ביט שמניר את מדידת החישון לערךBINAIRI מכומת. עבור הרזולוציה הגבוהה ביותר, זמן המירה של ה-ADC הוא 8.2ms. מכיוון שעבור כל מדידת לחץ יש לבצע 2 המירות נקבע שזהה"כ הזמן החדש לקריית הלחץ הוא:

$$T_{Conv} = 2 * T_{ADCconv} = 2 * 8.2 * 10^{-3} = 16.4[msec]$$

נוסחה 23 – חישוב הזמן הדרוש לקריית הלחץ

זהו זמן המירה המובייח על ידי היצרך ולפי זמן זה ניתן יהיה לדגם את החישון בקצב של:

$$f_s = \frac{1}{T_{Conv}} = \frac{1}{16.4 * 10^{-3}} = 61[Hz]$$

נוסחה 24 – חישוב תדר הדגימה של החישון

שלב 7 – חישוב גובה הרחפן מהלחץ והטמפרטורה המתקבלים

הנוסחה לחישוב גובה הרחפן ביחס לגובה פני הים הוא:

$$h = \frac{\left(\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{5.257}} - 1\right) * (T + 273.15)}{0.0065} [m]$$

נוסחה 25 – חישוב גובה הרחפן ביחס לגובה פני הים

כאשר:

p_0 – לחץ בגובה פני הים [mb]

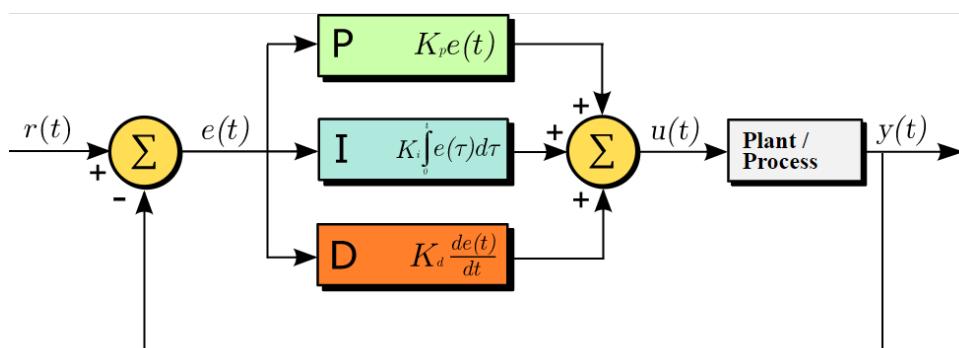
p – לחץ בגובה נוכחי של הרחפן [mb]

T – טמפרטורה במעלות צלזיוס.

באמצעות הנוסחה הנ"ל בקר הטיסת מחשב את גובה הרחפן מעל פני הים.

9.1.11 אלגוריתם הבקרה:

- ראה הסבר מקדים על בקר PID בסעיף 7.1.2 .

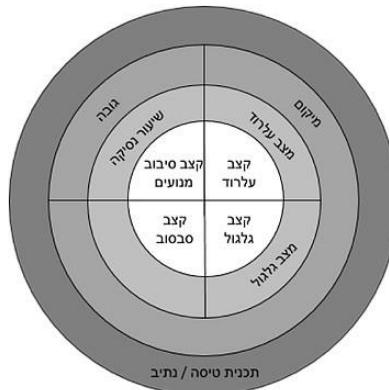


איור מס' 27 – סכימה של בקר PID

בבראשית השולט על ציר הגלגל, הערך הפרופורציוני יהיה המתוח למנוע עבור כל מעלה שגיאיה. לדוגמה, עבור כל 5 מעלות הטיה בין פיקוד לדיווח הعلاה / הפחת את המתוח בוולט אחד. הערך האינטגרלי יהיה כמות המתוח למנועים עבור השגיאה שהצטברה במשך זמן. ערך הנגזרת יהיה בעצם הפחתה התלויה בקצב ההתקרכבות לערך הרצוי. על ידי כך אם יהיה שינוי ואנו מתקרבים לערך הרצוי, אין סיכוי לעבור אותו גם אם ההתקרכבות מתבצעת בקצב מהיר מידי.

במערכת בקרה, נהוג לסווג חוגים בקרה כחוגים עליים ותחתיים. חוגים תחתיים הם בדרך כלל חוגים המשמשים בחישונים בסיסיים ומבקרים על פעולות פשוטות. לדוגמה, קצב גלגול או עלרוד, מצב גלגול או עלרוד. וחוגים עליים מבצעים פעולות מורכבות, אוסףם נתונים רבים על מנת לקבוע את הפיקוד ולרובי מזינים בפקודות את החוגים התחתיים.

אפשר להבין את בקרת הטיסת של הרחפן באמצעות מעגל חוגי בקרה. במעגל זה החוגים התחתיים נמצאים באמצעות וככל שעולים למעלה או יוצאים החוצה, עולה במערכות החוגים.

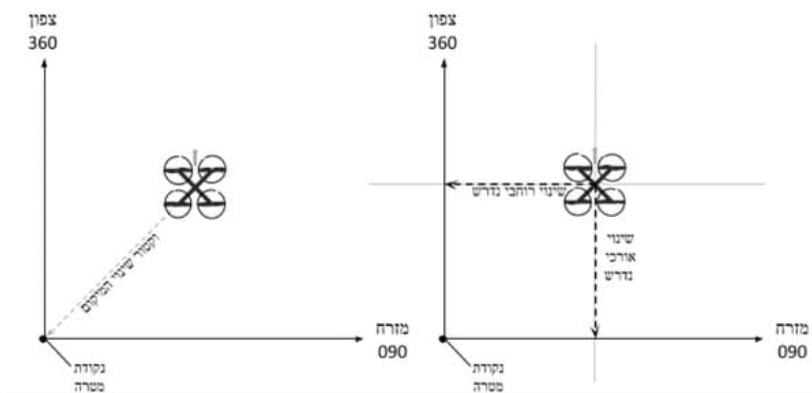


איור מס' 28 – חוגי הבקרה השונים

מעגל חוג הבקרה המעניין אותנו בעבודה זו הוא חוג מיקום (רמה 3) וחוג תכנית טיסה/נתיב(רמה 4):

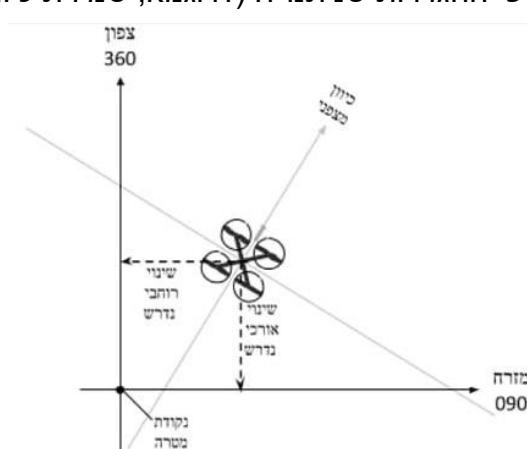
רמה 3 – חוג מיקום

החוג השלישי ברמה הוא חוג מיקום. ככלומר, אנו פוקדים לכלי הטיס על המיקום או על שינוי המיקום, וכל הטייס מוצא את המיקום שלו וטס למיקום החדש לפי נתוני-GPS. כדי לעשות זאת, חוג המיקום מחלק את המרחב ל-X ו-Y ביחס לאף כלי הטיס. ככלומר, הוא מתקן את שגיאת המיקום על ידי פירוק ווקטור.



איור מס' 29 – תיאור פעולה של חוג המיקום במקרה שאף הרחפן מיושר עם מערכת הצירים

אפשר לראות מתוך השרטוט כי מצד כל' הטיס נמצא במקום ספציפי, עם אף שפונה צפונה ונפקד עליו להגיע למטרה שנמצאת בראשית הצירים. כדי לסגור את החוג, כל' הטיס יבצע את המתואר הצד ימין. ככלומר, יפרק לשגיאת אורכית ורוחבית כאשר לכל אחד מהצירם הלו ישנו בקר PID משלו, ויבצע תיקון לשגיאת על ידי פיקוד גלגול וולרד. במקרה ומדובר במצב בו אף כל' הטיס אינו מיושר עם מערכת הצירים, כל' הטיס מבצע פירוק ווקטור לפי מערכת הצירים שלו ולפי ההגדרות שניתנו לו (לדוגמא, שמירת ציון האף).



איור מס' 30 – תיאור פעולה של חוג המיקום במקרה שאף הרחפן לא מיושר עם מערכת הצירים

יש לשים לב כי בניית מערכת הצירים של כל' הטיס במרחב וחישוב הווקטורים של השגיאה והתקין מתבצעים באמצעות המagnetometer.

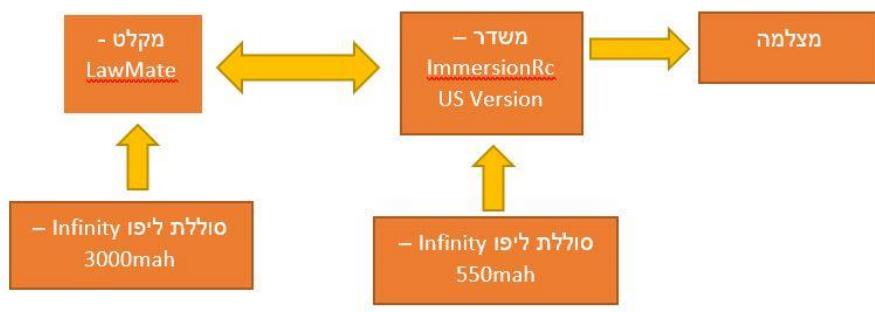
רמה 4 – תוכנית טיסה/נתיב

החוג הרביעי ברמה הוא פיקוד על רצף של מיקומים ותהליכי הטיסה ביניהם. בחוג זה מתבצעת תוכנית טיסה הכוללת נקודות ציון רבות, וכל פעולה אחרת הכוללת יותר מנקודות ציון אחת.

9.2

חלק 2 – ייחידת תיעוד מהלך הטיסה

דיאגרמת בלוקים של מערכת התקשרות לשילחה וקבלת וידאו מהרחפן



איור מס' 31 – דיאגרמת בלוקים של ייחידת התיעוד

– ImmersionRc US Version 9.2.1

משקל [g]	תקן שידורי טלוויזיה	הספק שידור	תדרי ערוצים [MHz]	מספר ערוצים
22	NTSC	700mW/28.5dBm	2396 , 2410 , 2430	3

טבלה 16 – נתוני המשדר האנalogi

– LawMate 9.2.2

משקל [g]	תקן שידורי טלוויזיה	הספק קליטה מינימלי	תדרי ערוצים [MHz]	מספר ערוצים
135	NTSC/PAL	-95dBm	(Switch A) 2413,2432,2451,2470 (Switch B) 2410,2430,2450,2470,2370, 2510,2390,2490	8

טבלה 17 – נתוני המקלט האנalogi

чисובים תאורטיים:

чисוב נצילות המשדר:

$$\eta(\%) = \frac{P(RF)}{P(DC)} = \frac{700mW}{3W} * 100\% = 23.3\%$$

נוסחה 26 – חישוב נצילות המשדר

רואים מהחישוב של הנצילות הולך לחום ורק 23.3% מההספק יוצא החוצה. מכיוון שהוא הרבה יותר לחום הרכיב, השתמשתי בצלעות קירור בגודל [cm^3] $1.5 \times 3.5 \times 3$ על מנת לפחות את החום שעל הרכיב ולמנוע נזקים למשדר כאשר הרחפן עומד במצב סטטי על הקירקע.

חישוב תיאורטי של מרחק השידור:

מרחק השידור בין המשדר למקלט מבוצע על ידי נוסחת FRIIS:
בנהנחת שידור בשטח פתוח עם קשר עין בין האנטנות, $\eta=1$.

$$R = \sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * P_r}} = \sqrt{\frac{10^{-0.15} * 10^{1.1} * 10^{0.6} * 0.125^2}{(4\pi)^2 * 10^{-12.5}}} = 105.4 [km]$$

נוסחה 27 – חישוב תיאורטי של מרחק השידור בשטח פתוח עם קשר ראייה

נניח טמפרטורת מקלט $K=300^\circ$.
טמפרטורת מקלט $T=300^\circ$.

נניח רוחב סרט לפי תקן סטנדרטי של שידורי טלוויזיה NTSC : $B=6[MHz]$.

יחסואות לרעש:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{KTB} = \frac{10^{-12.5}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 6 \cdot 10^6} = 11dB$$

נוסחה 28 – חישוביחסואות לרעש

קצב העברת נתונים בערוץ לפי חסם שנון:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 6 \cdot 10^6 \cdot \log_2 (1 + 10^{1.1}) = 22.6Mbps$$

נוסחה 29 – חישוב קצב העברת נתונים בערוץ לפי חסם שנון

קצב העברת נתונים של הערוץ לפי נתונים סטנדרטיים של שידורי טלוויזיה NTSC:

נניח קצב פריימרים של $30Hz$.

נניח כמות ביטים סטנדרטית לתמונה של $480x720$.

$$Rate = (\text{number of bits per image}) * (\text{Frame Rate}) = 720 * 480 * 30 = 10.4Mbps$$

נוסחה 30 – חישוב קצב העברת נתונים בפועל בערוץ

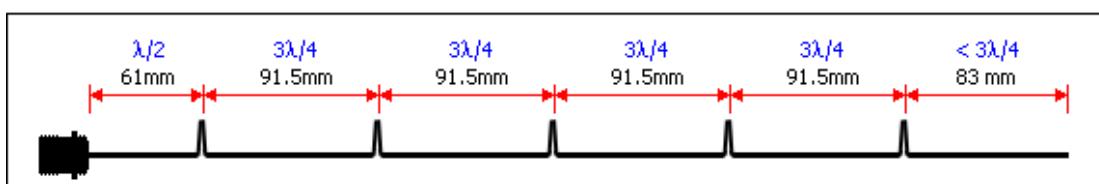
כלומר ניתן לראות שאנו עובדים בקצב של בערך 46% מהחסם שנון.

9.2.3 האנטנות שנבנו ליחידת תיעוד המשימה:

האנטנה המשדרת- אנטנת colinear בnockחות משטח אדמה – 2.4GHz

תיאור כללי של מבנה אנטנת colinear:

אנטנת קוליניינר מורכבת מתיל נחושת בעל מספר לוילאות הממוקמות במקומות ספציפיים היוצרים חיצזה בין דיפול אחד לשני.



איור מס' 32 - תיאור מבנה כללי של אנטנת קוליניינר בתדר $2.4GHz$

אורכו של החלק התחתון ביותר הוא חצי אורך גל, החלקים המרכזיים בעלי אורך של $3/4$ אורך גל והקטע העליון ביותר בעלי אורך של מעט פחות מ- $3/4$ אורך גל על מנת להפחית את השפעת הקיבוליות. על ידי שינוי קוטר הלולאות ניתן לשנות בזווית שבו מקבל השבח המרבי. המיקם"ש האנaloggi עובד בתווות תדרים של 2.45GHz - 2.5GHz , כך שעבור תדר מרכזי של 2.45GHz חצי אורך גל הוא 61mm ו- $3/4$ אורך גל הוא 91.5mm .
באנטנה שבניתה, השתמשתי במשתח אדמה קטן לצורך הגדלת השבח של האנטנה.

דיפול בודד בנוכחות משטח אדמה:

- לనוכחות משטח אדמה בסמוך לדיפול יש שימושים רבים מבחינת הקירינה. בdifpolים קטנים משתמשים במשטח אדמה (מתכתי) על מנת להגדיל את הcyionיות. בעיקרונו משטח אדמה מגביל את הcyionיות בעוד 8dBi - 5 (יציר שיקוף של עוד difpol וכן מכון את הקירינה לחצי מרחב בלבד, דבר הגורם להגדלת השבח).

מטרת האנטנה:

האנטנה תישם בתור אנטנה של מצלמה אנלוגית המורכבת על גבי הרחפן. מכיוון שלאנטנה זו יש שבח מרבי של 6dBi המתקבל בזווית של 30 מעלות מעלה האופק, האנטנה תחבר בצורה הפוכה על גבי הרחפן ובכך ניתן יהיה לנצל בצורה אופטימלית את השבח המרבי שלו.
ברצוני להבהיר ידיואו אנלוגי העבודה בתדר 2.4GHz , لكن בנייתו את האנטנה כך שתעבד בתדר זה.

תוצאות מדידה:

• תוצאות מכשיר ה-NetWork Analyzer :



איור מס' 33 - בדיקת תיאום אימפרנסים במכשיר NetWork Analyzer

בתדר 2.5GHz מקבלים ערך של -16.64dB :
בתדר זה מקדם החזרה להספק הינו:

$$|\gamma| = 10^{-1.664} = 0.022 = 2.2\%$$

נוסחה 31 – חישוב מקדם החזרה להספק

מה שאומר שרק 2.2% מההספק המשודר חוזר בחזרה ו- 97.8% מההספק משודר לאוויר.
מקדם החזרה למתח הינו:

$$|\gamma| = 0.022^{0.5} = 14.8\%$$

נוסחה 32 – חישוב מקדם החזרה למתח

יחס גלים עומדים של אנטנה זו בתדר 2.5GHz הינו:

$$VSWR = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|} = \frac{1 + 0.022^{0.5}}{1 - 0.022^{0.5}} = 1.35$$

נוסחה 33 – חישוב יחסי גלים עומדים

בתדר 2.4GHz מתקבל ערך של **-15dB** :
בתדר זה מקדם החזרה להספק הינו:

$$|\gamma|^2 = 10^{-1.5} = 0.032 = 3.2\%$$

נוסחה 34 – חישוב מקדם החזרה להספק

מה שאומרים שרק 3.2% מהספק המשודר חוזר בחזרה ו- 96.8% מהספק משודר לאויר.
מקדם החזרה למתח הינו:

$$|\gamma| = 0.032^{0.5} = 17.9\%$$

נוסחה 35 – חישוב מקדם החזרה למתח

יחס גלים עומדים של אנטנה זו בתדר 2.4GHz הינו:

$$VSWR = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|} = \frac{1 + 0.032^{0.5}}{1 - 0.032^{0.5}} = 1.43$$

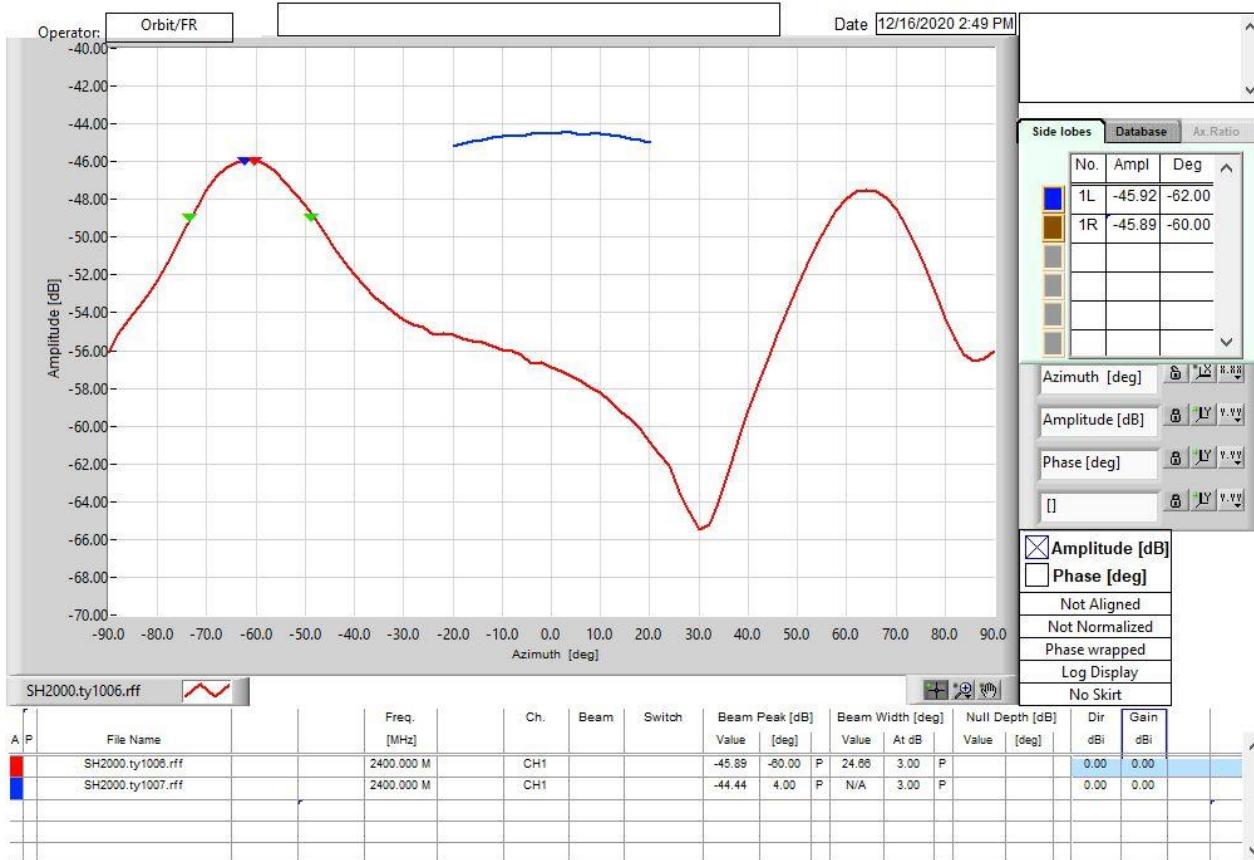
נוסחה 36 – חישוב יחסי גלים עומדים

מתוך החישובים הללו אנו רואים כי אנטנת הקוליניאר שנבנתה מתואמת בצורה טוביה ביותר בתחום התדרים 2.4-2.5GHz.

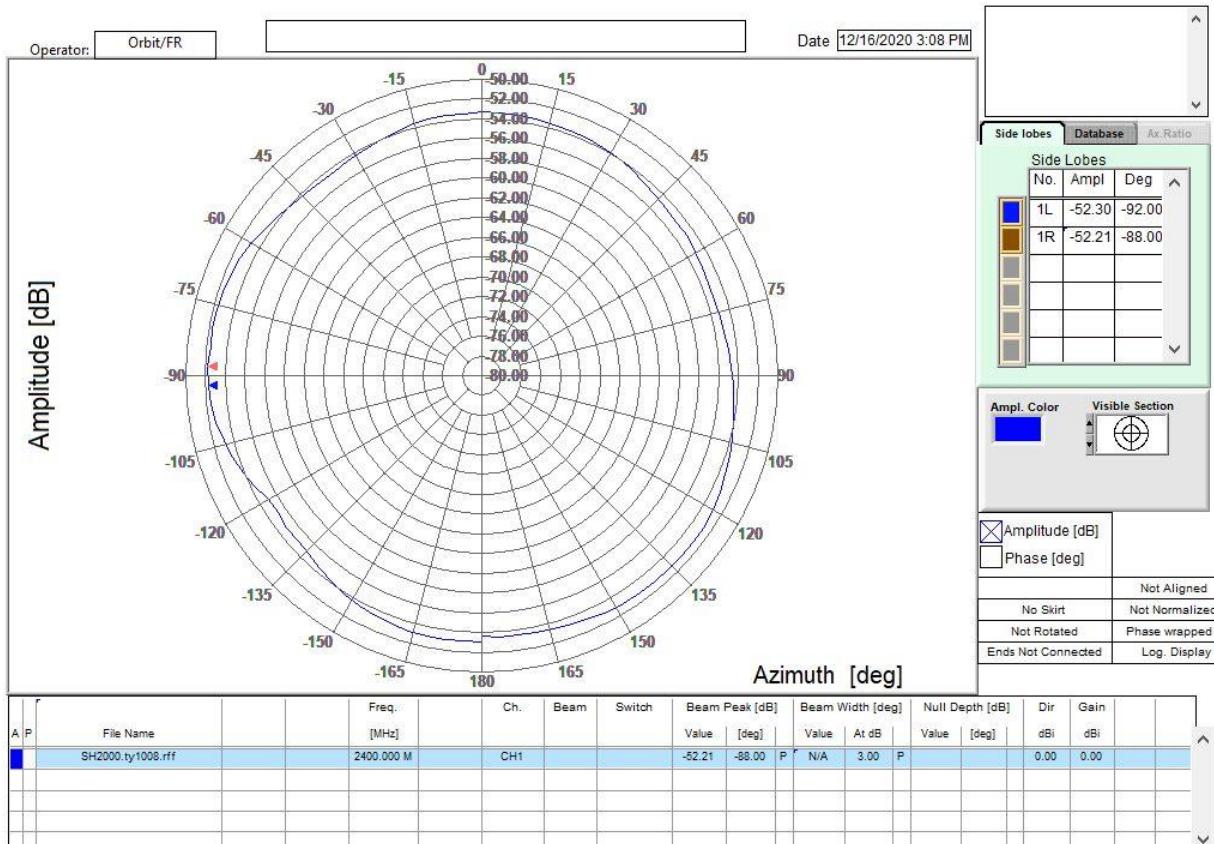
פרמטרים של האנטנה:

- גודל:
משטח אדמה: .30mm x 30mm
אורך כולל: .523mm
- משקל: .19g.
- חיבור SMA נקבה.
- 3 לולאות – קוטר כל לולאה 20mm.

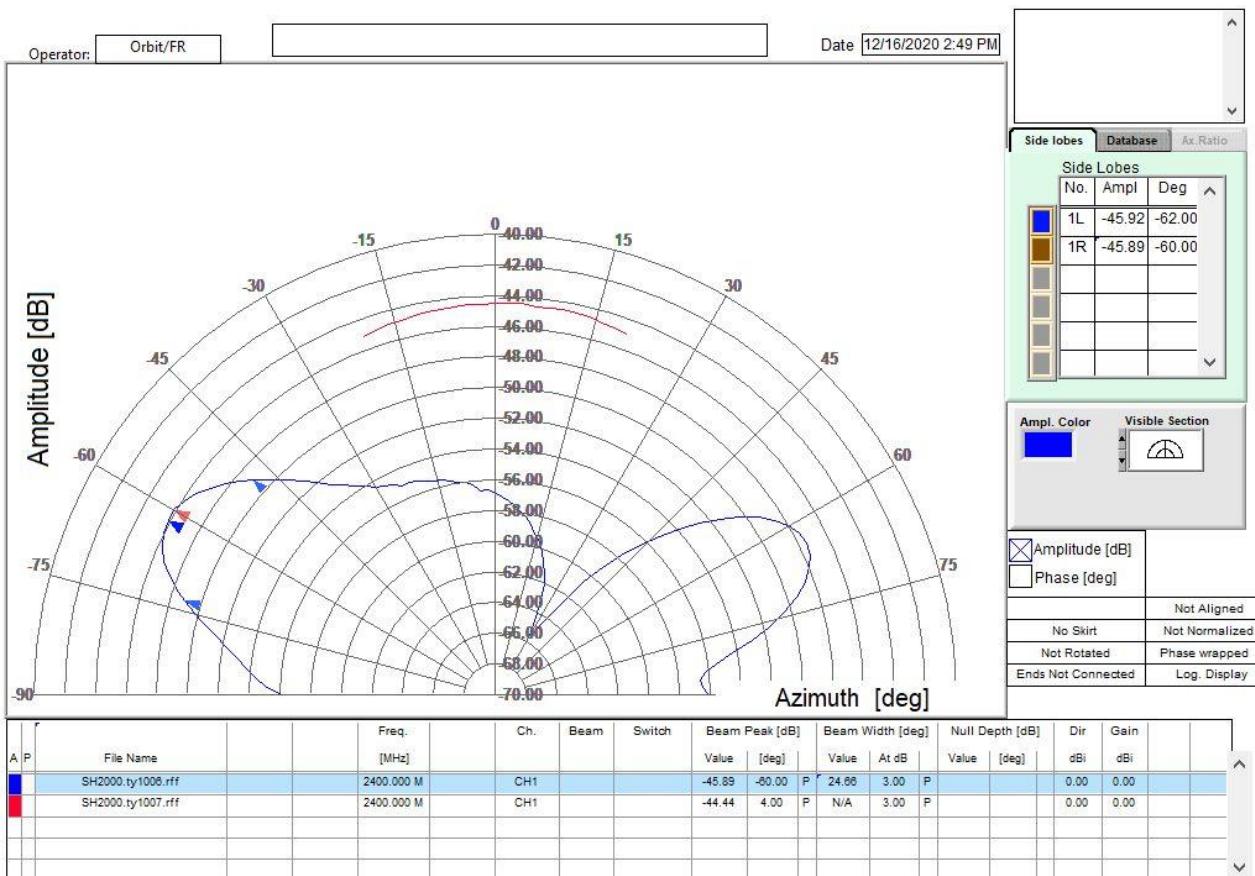
**תוצאה של מדידת האנטנה במתווך אנטנות:
בתדר 2.4GHz**



איור מס' 34 - גרפ' קרטזי של מדידת האנטנה בחתר אופקי (הגבהה-אדום) ואנטנת "יחוס" (כחול) עבור תדר 2.4GHz

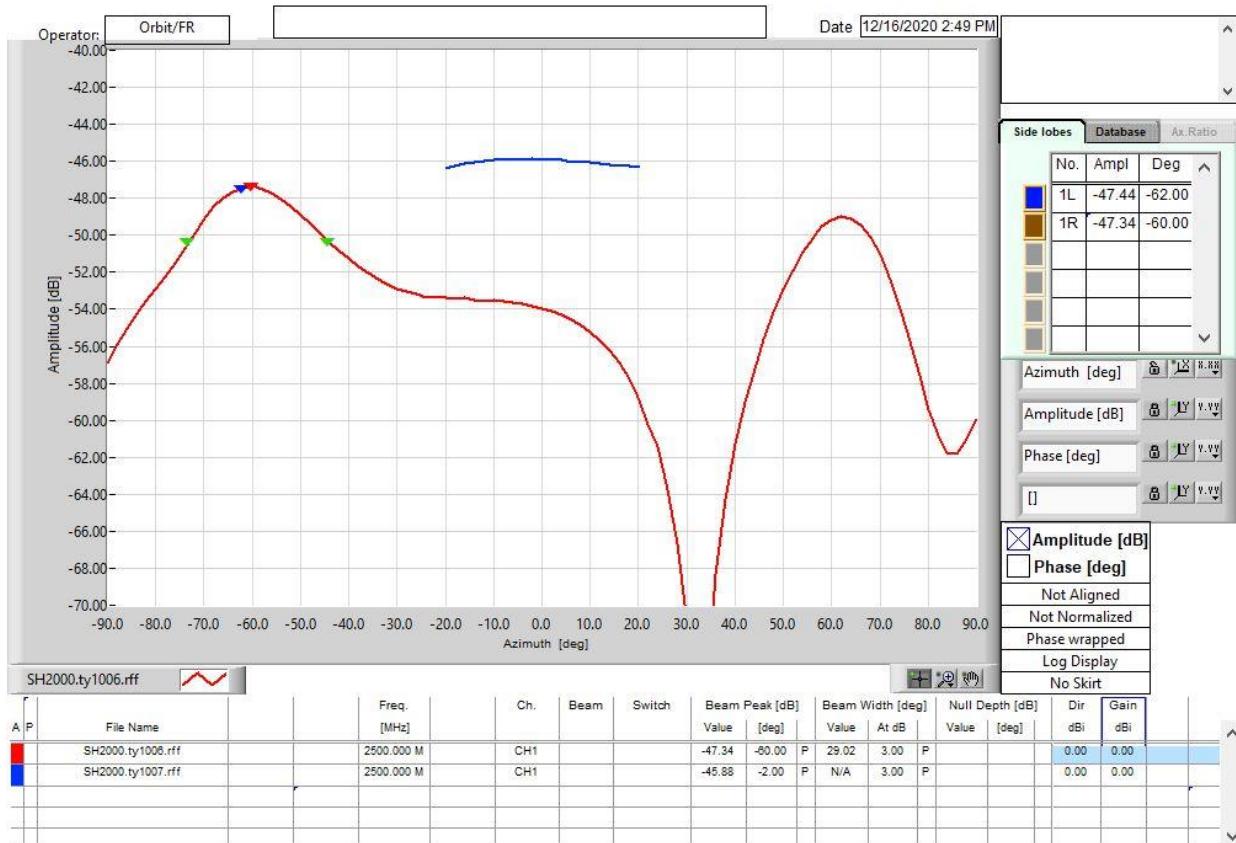


איור מס' 35 - גרפ' פולרי של מדידת האנטנה בחתר אנכי (איזימוט) עבור תדר 2.4GHz

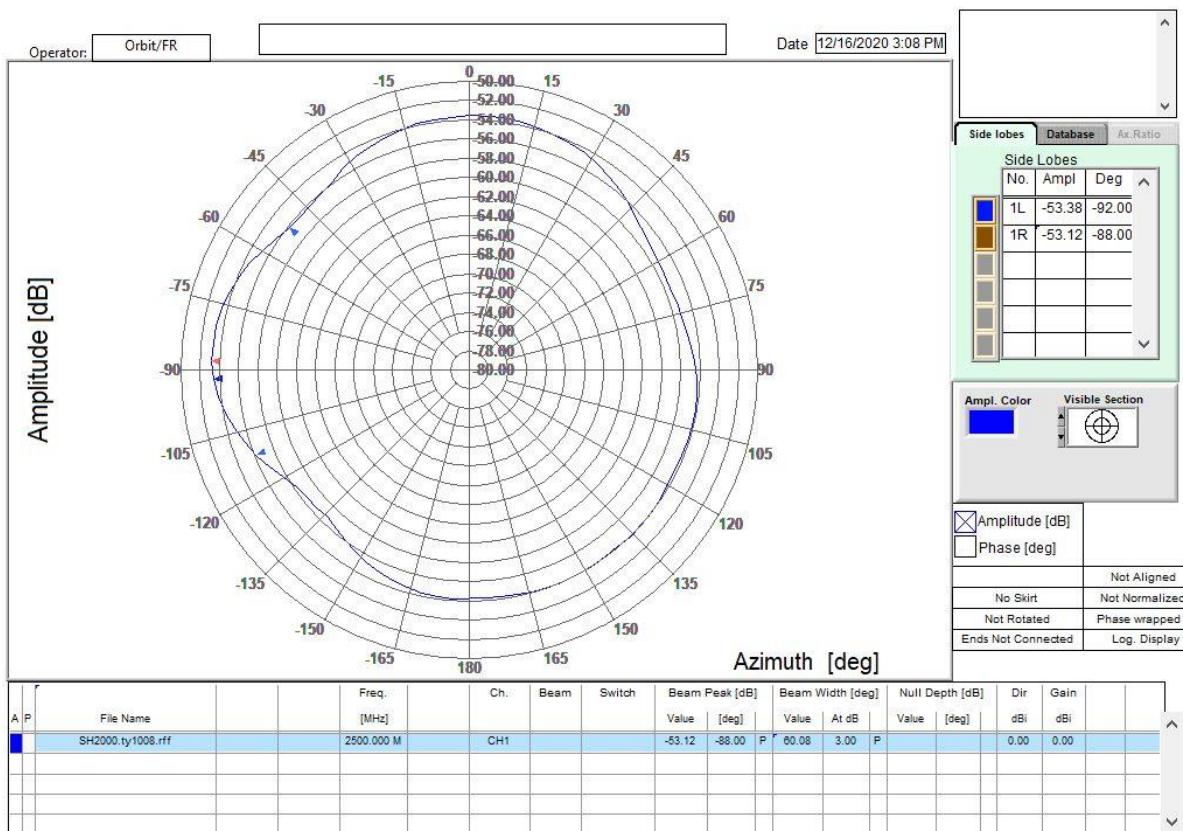


איור מס' 36 - גרפ פולרי של מדידת האנטנה בחתך אופקי (בגבהה) עבור תדר 2.4GHz ניתן לראות את אנטנת הייחוס (באדום) ואת האנטנה הבנונית (בכחול).

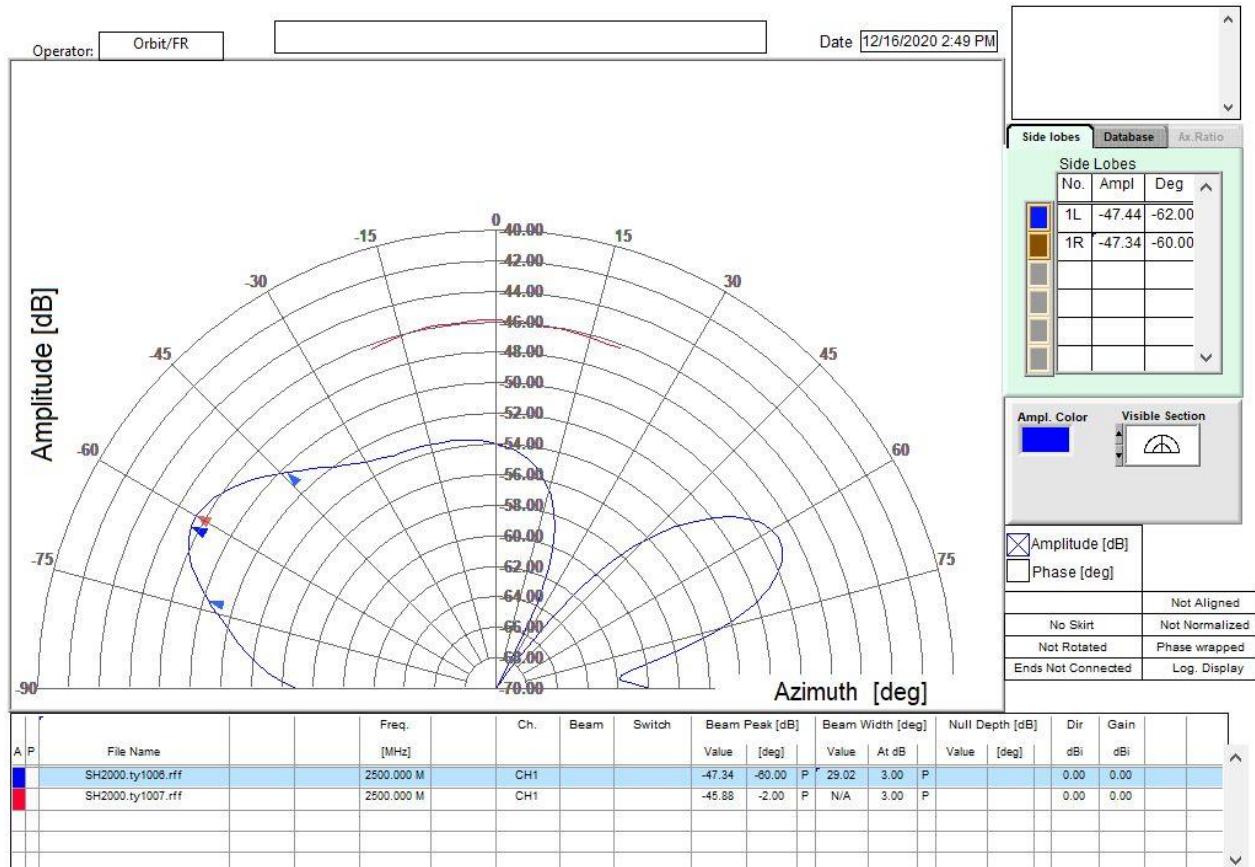
:2.5GHz בתדר



איור מס' 37 - גרפ קרטזי של מדידת האנטנה בחתך אופקי (הגבהה-אדום) ואנטנת ייחוס (כחול) עבור תדר 2.5GHz



איור מס' 38 - גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתך אנכי (Azimuth) עבור תדר GHz 2.5



איור מס' 39 - גרף פולרי של מדידת האנטנה בחתך אופקי (הגבבה) עבור תדר GHz 2.5

- ניתן לראות את אנטנתה הייחוס (באדום) ואת האנטנה הבנוייה (בכחול).

רוחב אלומה באזימוט	רוחב אלומה בاهגבהה	שבח אנטנה בבנייה	שבח אנטנת "יחסו"	תדר [GHz]
360°	25°	6dBi	7dBi	2.4
360°	29°	6dBi	7dBi	2.5

טבלה 18 – השוואה בין תוצאות שני התדרים שנבדקו

צילום האנטנה:



איור מס' 40 – אנטנת קוילינייר בתדר 2.4GHz

האנטנה הקולית – אנטנת יאגי אודה בתדר 2.4GHz

תיאור האנטנה:

אנטנת יאגי אודה מורכבת משלושה חלקים שונים:

- אלמנט מזין (אקטיבי) שלוו מחברים את המשדר/מקלט. בדרך כלל אלמנט זה הוא דיפול מקופל בעל אורך של חצי אורך גל עם אימפדנס קרינה אופני של $\Omega = 300$.
- רפלקטור – אלמנט מחריז שהוא מוט מתכתי באורך גדול במקצת מחצי אורך גל המוצב במקביל לאלמנט המזין ובמקרה רביע גל ממנו.
- דירקטורים – שורה של אלמנטים מכוכנים (פסיביים) שהם עשויים ממוטות מתכת ללא חיבור חשמלי בין אחד לשני. אורך כל דירקטור הוא כربع אורך גל והם מוצבים במקביל לאלמנט המזין (אקטיבי).

שבח האנטנה תלוי במספר האלמנטים המכוכנים (דיםקטורים) וערך נוע בתחום של 8-16dBi, קיטוב האנטנה הוא ליניארי ותלוי בכיוון ההצבה של האלמנט המזין.

מטרת האנטנה:

האנטנה תIOSם בתור אנטנה של מקלט וידאו אנלוגי. אנטנה זו תכוון אל עבר הרחפן ותיצור הגדלת טווח קליטת אות הוידיאו אשר נשלח מצלמת הרחפן.

תוצאות המדידה:
• תוצאה מכשיר ה- NetWork Analyzer



איור מס' 41 - בדיקת תיאום אימפדינסים במכשיר ה-NetWork Analyzer

בתדר 2.5GHz מתקבל ערך של -17.5dB
בתדר זה מקדם החזרה להספק הינו:

$$|\gamma| = 10^{-1.75} = 0.018 = 1.8\%$$

נוסחה 37 – חישוב מקדם החזרה להספק עבור תדר 2.5GHz

מה שאומרים שרק 1.8% מהגליים המשודרים חוזרים בחזרה לאנטנה ו- 98.2% מהגליים משודרים לאויר.
 ומকדם החזרה למתח הינו:

$$|\gamma| = 0.018^{0.5} = 13.4\%$$

נוסחה 38 – חישוב מקדם החזרה למתח עבור תדר 2.5GHz

יחס גלים עומדים של אנטנה זו בתדר 2.5GHz הינו:

$$VSWR = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|} = \frac{1 + 0.018^{0.5}}{1 - 0.018^{0.5}} = 1.3$$

נוסחה 39 – חישוביחס גלים עומדים עבור תדר 2.5GHz

בתדר 2.4GHz מתקבל ערך של -12dB
בתדר זה מקדם החזרה להספק הינו:

$$|\gamma| = 10^{-1.2} = 0.063 = 6.3\%$$

נוסחה 40 – חישוב מקדם החזרה להספק עבור תדר 2.4GHz

מה שאומרים שרק 6.3% מהגליים המשודרים חוזרים בחזרה לאנטנה ו- 93.7% מהגליים משודרים לאויר.
 ומוקדם החזרה למתח הינו:

$$|\gamma| = 0.063^{0.5} = 25.1\%$$

נוסחה 41 – חישוב מקדם החזרה למתח עבור תדר 2.4GHz

יחס גלים עומדים של אנטנה זו בתדר 2.4GHz הינו:

$$VSWR = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|} = \frac{1 + 0.063^{0.5}}{1 - 0.063^{0.5}} = 1.67$$

נוסחה 42 – חישוביחס גלים עומדים עבור תדר 2.4GHz

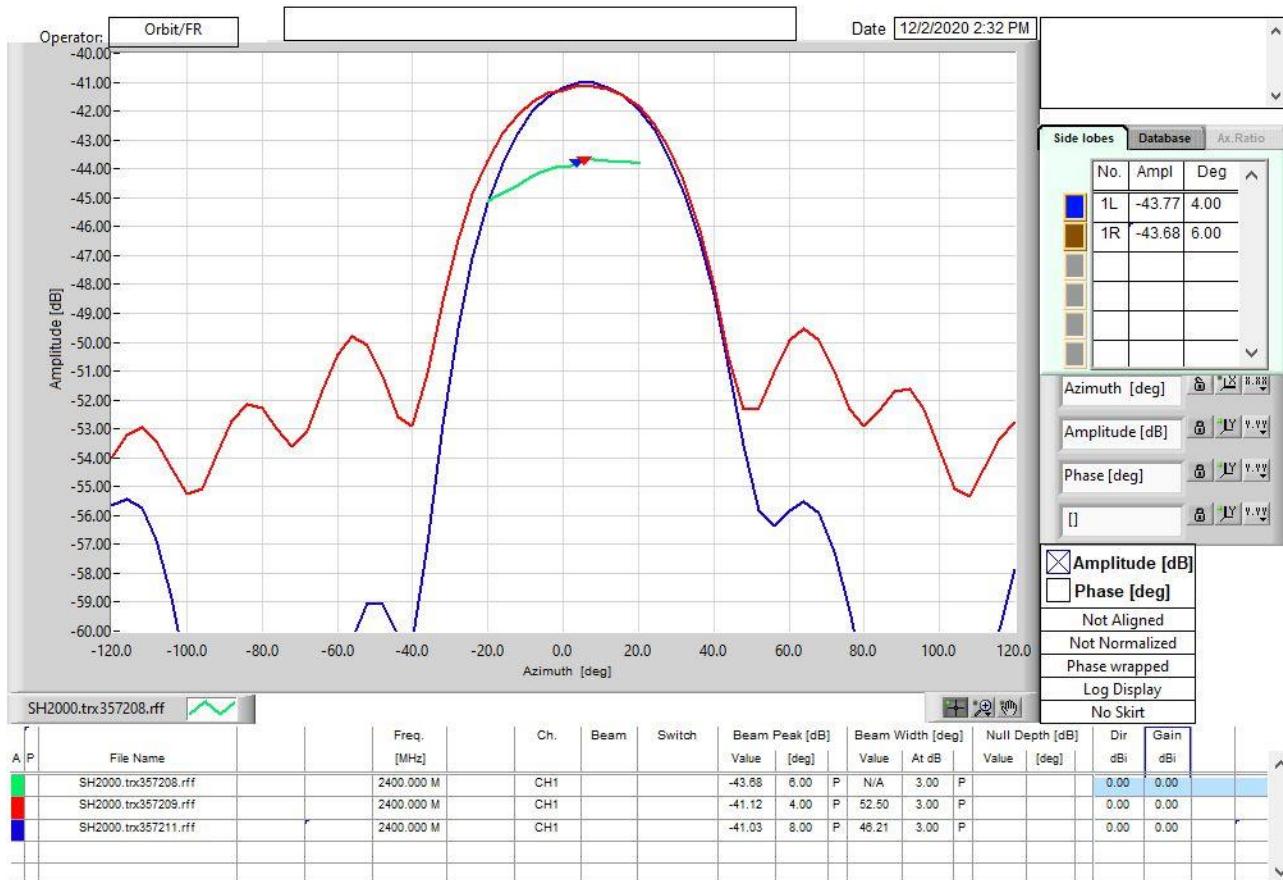
מתוך החישובים הללו אנו רואים כי אנטנת היגי אודה שנבנתה מותאמת בצורה טובה ביותר בטוויה התדרים [GHz] 2.4 - 2.5.

פרמטרים של האנטנה:

- גודל: 270mm x 87mm
- משקל: 48g
- חיבור SMA נקבה.
- 6 דירקטורים.
- מרחק בין דירקטורים – $\lambda/0.28$
- מרחק בין מזין לדירקטור ראשוני – $\lambda/0.152$
- מרחק בין רפלקטור למזין – $\lambda/0.152$

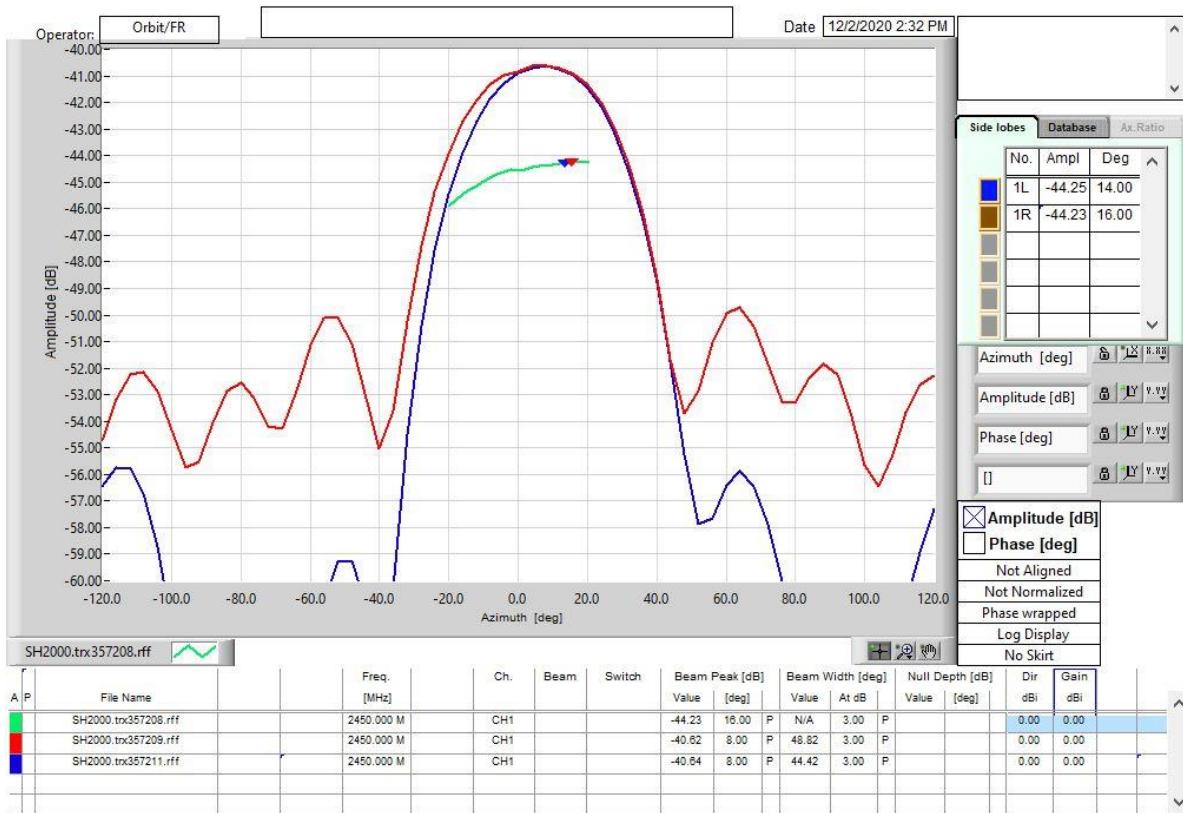
תוצאה של מדידת האנטנה במתווח אנטנות:

:2.4GHz

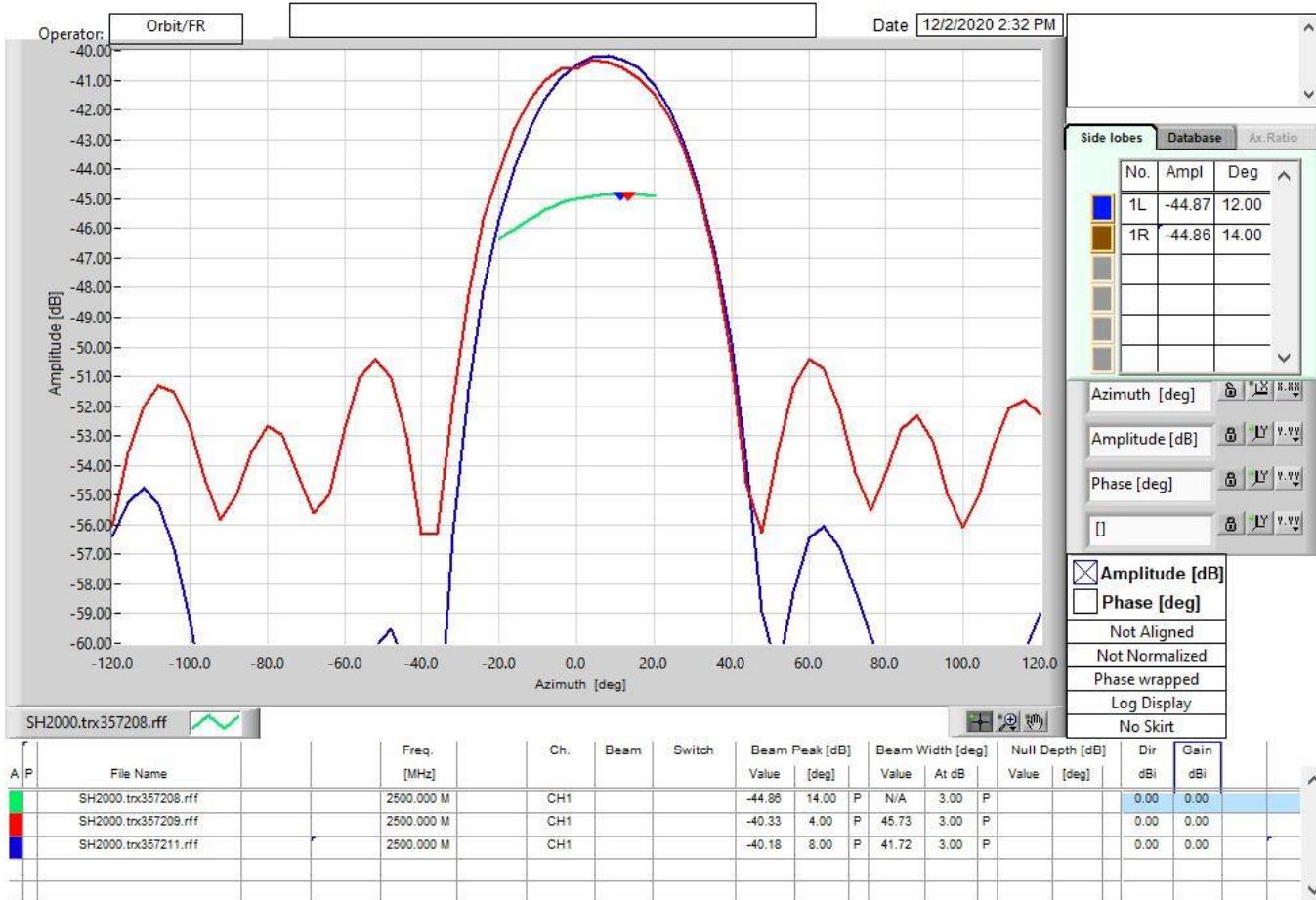


איור מס' 42 – מדידת האנטנה בחתך אנכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנת ייחוס (ירוק) בתדר 2.4GHz

בتردد :2.45GHz



איור מס' 43 – מדידת האנטנה בחתך אנכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנת ייחוס (ירוק) בתדר GHz :2.5GHz

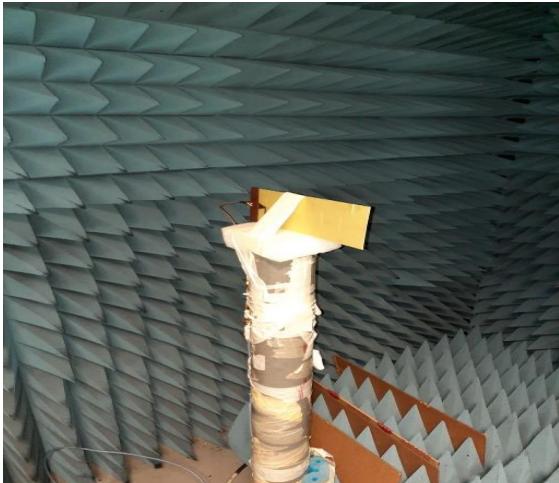


איור מס' 44 – מדידת האנטנה בחתך אנכי (אדום) ובחתך אופקי (כחול) ואנטנת ייחוס (ירוק) בתדר GHz :2.5GHz

רוחב אלומה באזימוט	רוחב אלומה בהגבלה	שבח אנטנה בנייה	שבח אנטנתן ייחוס	תדר [GHz]
46°	52°	10dBi	7dBi	2.4
44°	49°	11dBi	7dBi	2.45
42°	46°	12dBi	7dBi	2.5

טבלה 19 – השוואה בין תוצאות שלושת התדרים שנבדקו

צלומי האנטנה:



איור מס' 45 – אנטנת יאגי אודה בתדר 2.4GHz

9.2.4 מצלמה:

בפרויקט זה נעשה שימוש במכשיר אנalogית פשוטה בעלת רזולוציה של 700TVL העובדת לפי תקן שידורי טלוויזיה NTSC.

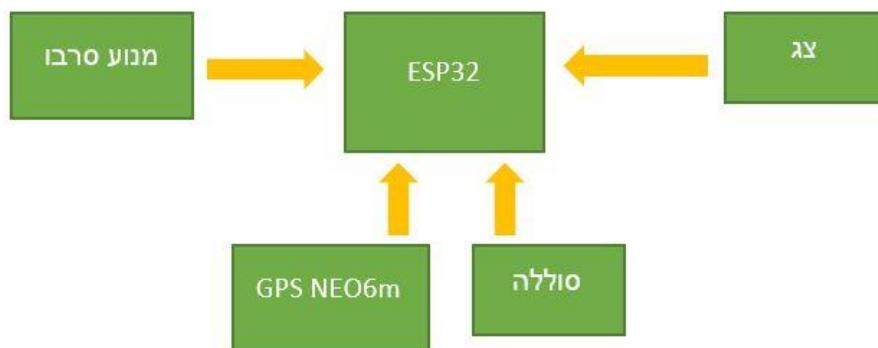


איור מס' 46 – מצלמה אנalogית

מפורט טכני:

- תקן שידורי טלוויזיה – NTSC
- רזולוציה אופקית – 700TVL
- יחס אות לרעש < 48dB
- טמפרטורת עבודה - $-20^{\circ}C$ – $60^{\circ}C$
- משקל – 101g
- מידות – 35mm x 35mm x 10mm

9.3 – חלק 3 – ייחdet הציד הייעודי לביצוע המשימה דיאגרמת בלוקים של הציד הייעודי לביצוע המשימה:



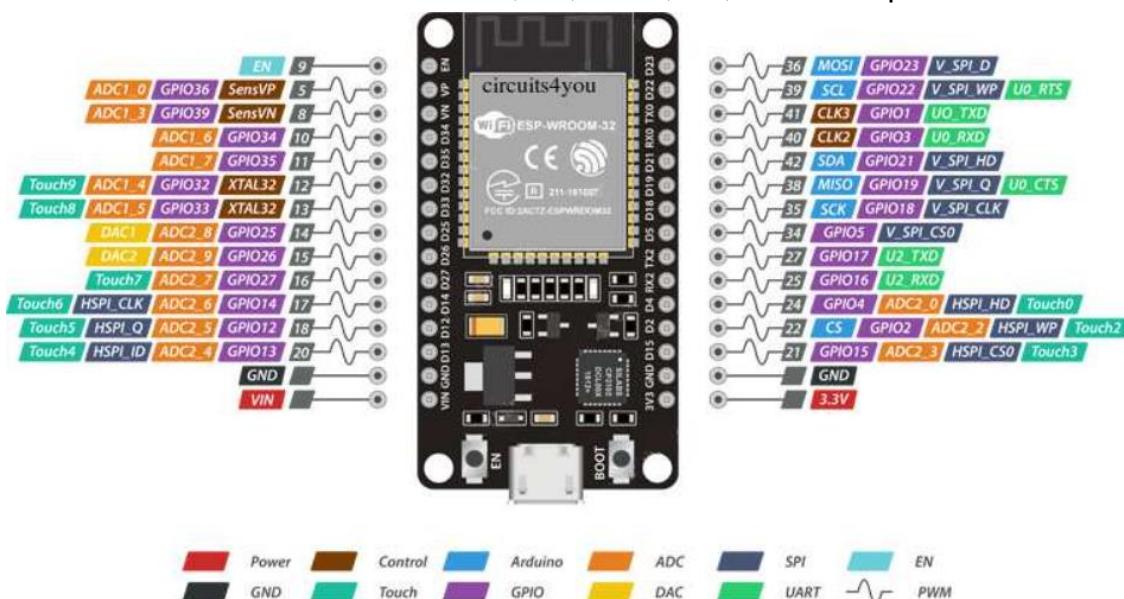
איור מס' 47 – דיאגרמת בלוקים של ייחdet ביצוע המשימה

9.3.1 – בקר ESP32

זהו לוח פיתוח עצמאי הנitinן לתכונות עם פקודות מיקרו-פיטון, C ותוכנת ארדואינו. בפרויקט זה הקוד יכתב לבקר ה-ESP באמצעות תוכנת ארדואינו.

פרט טכני:

- מעבד 32bit
- זיכרון SRAM 520KB
- 25 כנימות GPIO, מתוכם 15 כנימות ADC
- חיבור Bluetooth
- חיבור Wifi העובד ב프וטוקולי תקשורת ח/g/b
- בעל אנטנת PCB עם שבב 3dBi
- סוגי תקשורת – CAN,I2S,USART,I2C,SPI



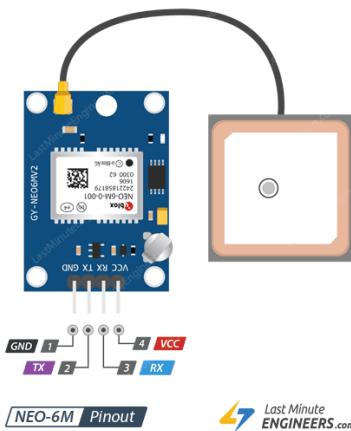
ESP32 Dev. Board / Pinout

איור מס' 48 – תיאור הכנימות של בקר 32

- GPS NEO6m 9.3.2

מפורט טכני:

- תדר עבודה – 1575.42MHz
- רמת דיווק מיקום – 2.5m
- הספק קליטה מינימלי – -161dBm
- שיטת ריבוב – CDMA
- קצב העברת מידע – $4800-230400$
- טמפרטורת עבודה – $-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$



איור מס' 49 – תיאור הכנסות של GPS

чисובים:

נניח טמפרטורת מקלט $T=300^{\circ}\text{K}$.

נניח רוחב סרף של $B=1[\text{KHz}]$.

נבצע את החישובים לפי הספק קליטה ממוצע של -140dBm .

יחסאות לרעש:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{KTB} = \frac{10^{-17}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^3} = 3.8\text{dB}$$

נוסחה 43 – חישוב יחס אות לרעש

קצב העברת נתונים:

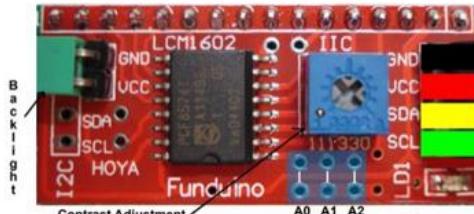
$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 1 \cdot 10^3 \cdot \log_2(1 + 10^{0.38}) = 1.76\text{Kbps}$$

נוסחה 44 – חישוב קצב העברת נתונים בערך לשנתי

- LCD 1602 + I2C גג 9.3.3



איור מס' 50 – הציג שימושם ביחידת ביצוע המשימה



Pin #	Name	Type	Description
1	GND	Power	Supply & Logic ground
2	VCC	Power	Digital I/O 0 or RX (serial receive)
3	SDA	I/O	Serial Data line
4	SCL	CLK	Serial Clock line
A0	A0	Jumper	Optional address selection A0 - see below
A1	A1	Jumper	Optional address selection A1 - see below
A2	A2	Jumper	Optional address selection A2 - see below
Backlight		Jumper	Jumpered - enable backlight, Open - disable backlight
Contrast		Pot	Adjust for best viewing

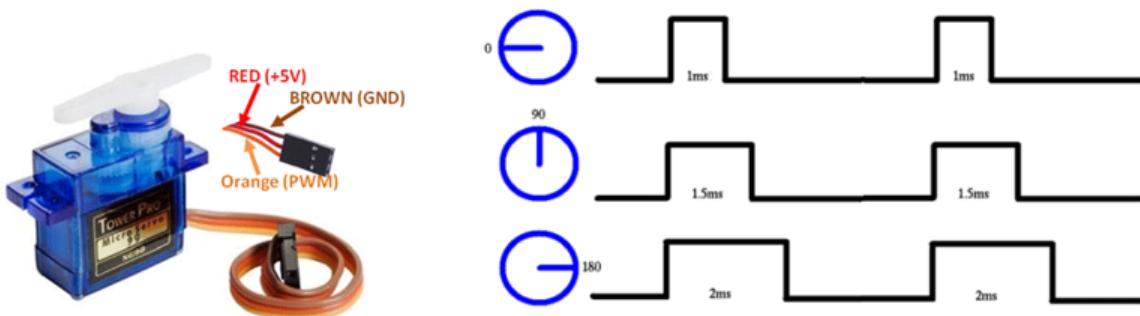
איור מס' 51 – תיאור רכיב התקשרות I2C שמחובר לצג

מפורט טכני:

- פרוטוקול תקשורת – I2C
- מתח עבודה – 5Vdc
- גודל – 80mm x 36mm x 20mm

מנוע סרו – 9.3.4

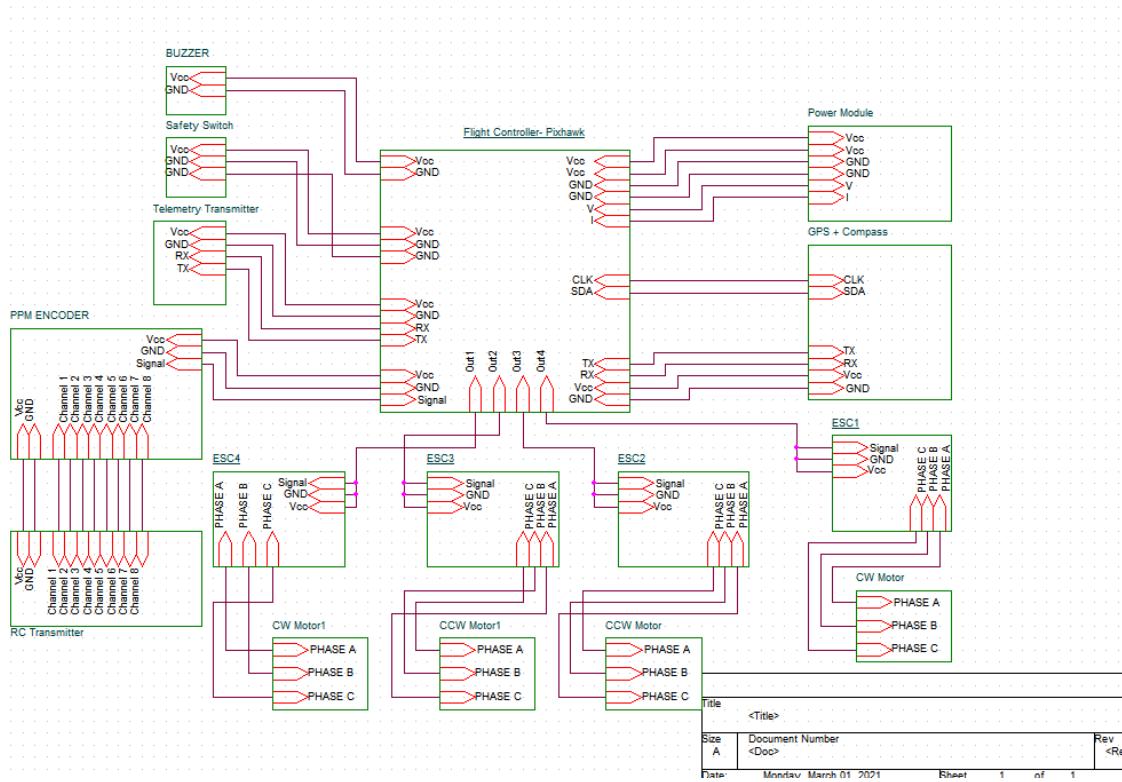
מנוע סרו הוא מנוע זרם ישיר (DC Motor) בעל מערכת תמסורת פנימית של גלאי שינוי ובקרה אלקטרוניות על מיקום המנוע. שליטה במנוע מבוצעת על ידי שליחת גל מרובע אל המנוע, כאשר רוחב הפולס של הגל הוא זה שקבע את הזוויות אליה ינוע המנוע. מנועים אלו נעים לרוב בתווות: 0-180 מעלות.



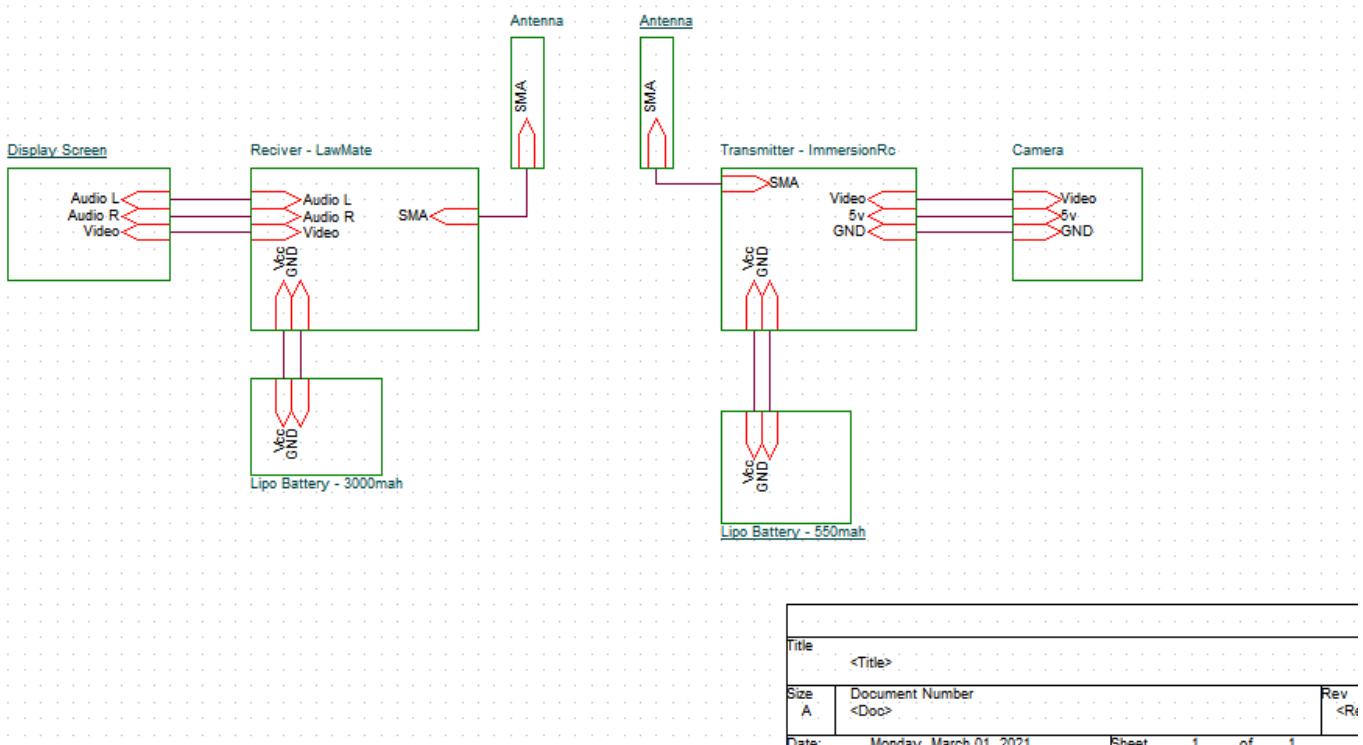
איור מס' 52 – אופן הפעולה של מנוע מיקרו סרו ותיאור כניסה

פרט טכני:

- $\frac{0.12}{60} \left[\frac{\text{sec}}{\text{degree}} \right]$ מהירות ללא עומס - •
אות בקירה – אנלוגי •
מתוח עבודה – 3 – 6V •
 $-30^{\circ}\text{C} – 60^{\circ}\text{C}$ – טמפרטורת עבודה - •
משקל – 9 [g] •
 מידות – 22mm x 11.5mm x 22.5mm – •

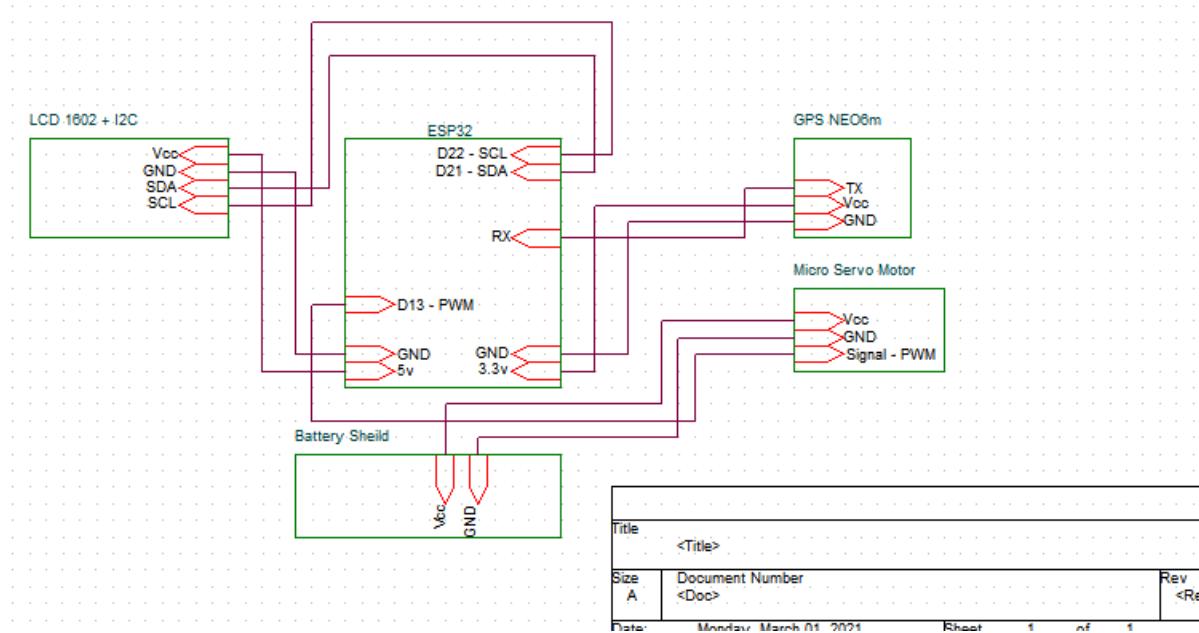
9.4.1 יחידת ניהול מהלך הטיסה האוטומטי

איור מס' 53 – שרוטוט חשמלי של יחידת ניהול מהלך הטיסה האוטומטי

9.4.2 יחידת תיעוד מהלך המשימה

איור מס' 54 – שרוטוט חשמלי של יחידת התיעוד

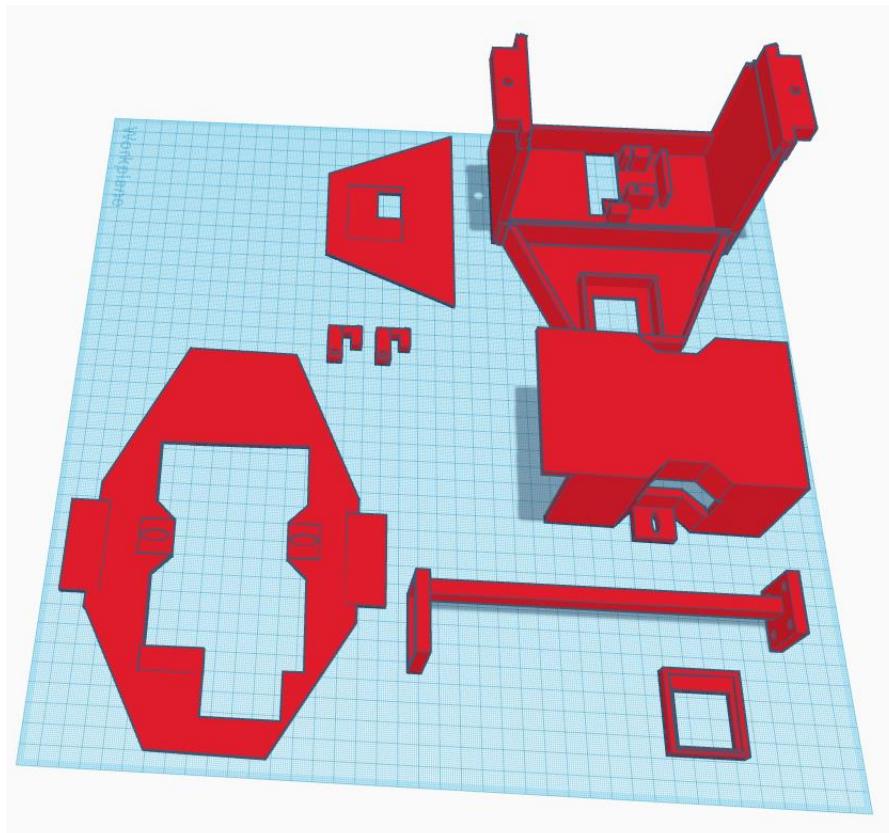
9.4.3 הציגו הייעוד לביצוע המשימה:



איור מס' 55 – שרטוט חשמלי של יחידת ביצוע המשימה

9.5 מידול חלקים בתלת מימד:

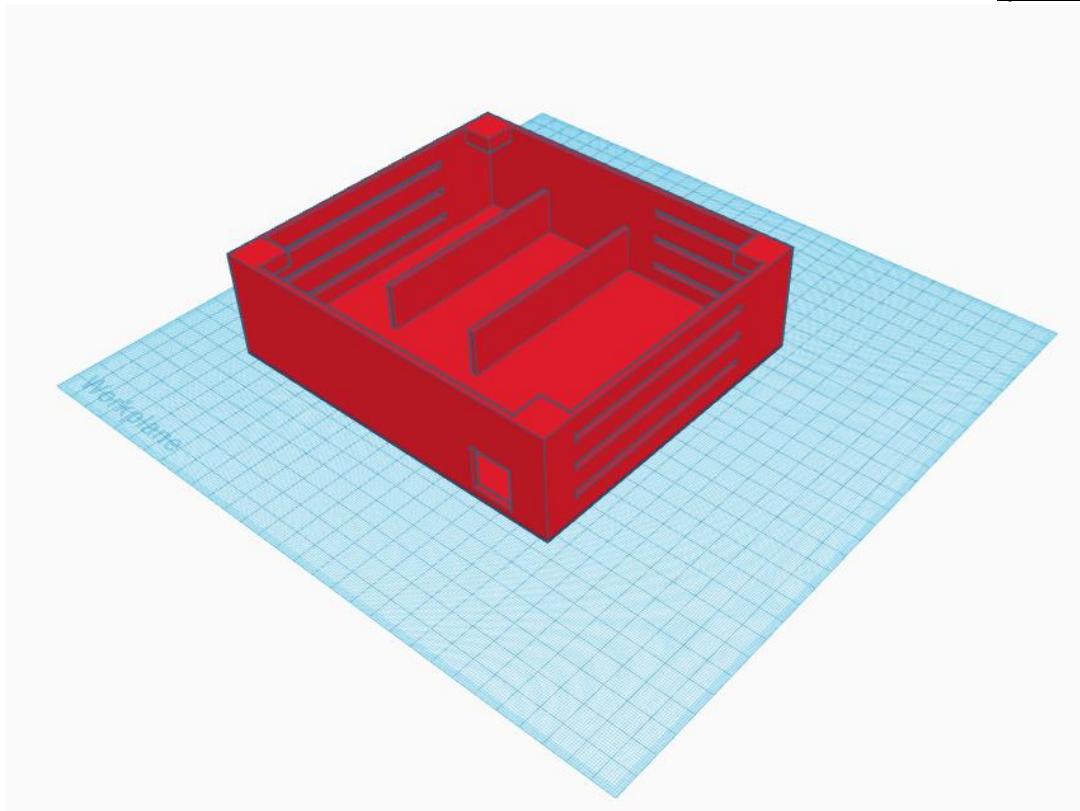
בפרויקט זה ביצעתן מידול לחלקים שונים בתוכנת THINKECAD, העברתם בתוכנת CURA והדפסתם במדפסת תלת מימד ביתית.
החלקים שמודלו והודפסו:



איור מס' 56 – החלקים המודולים המורכבים על גבי הרחפן

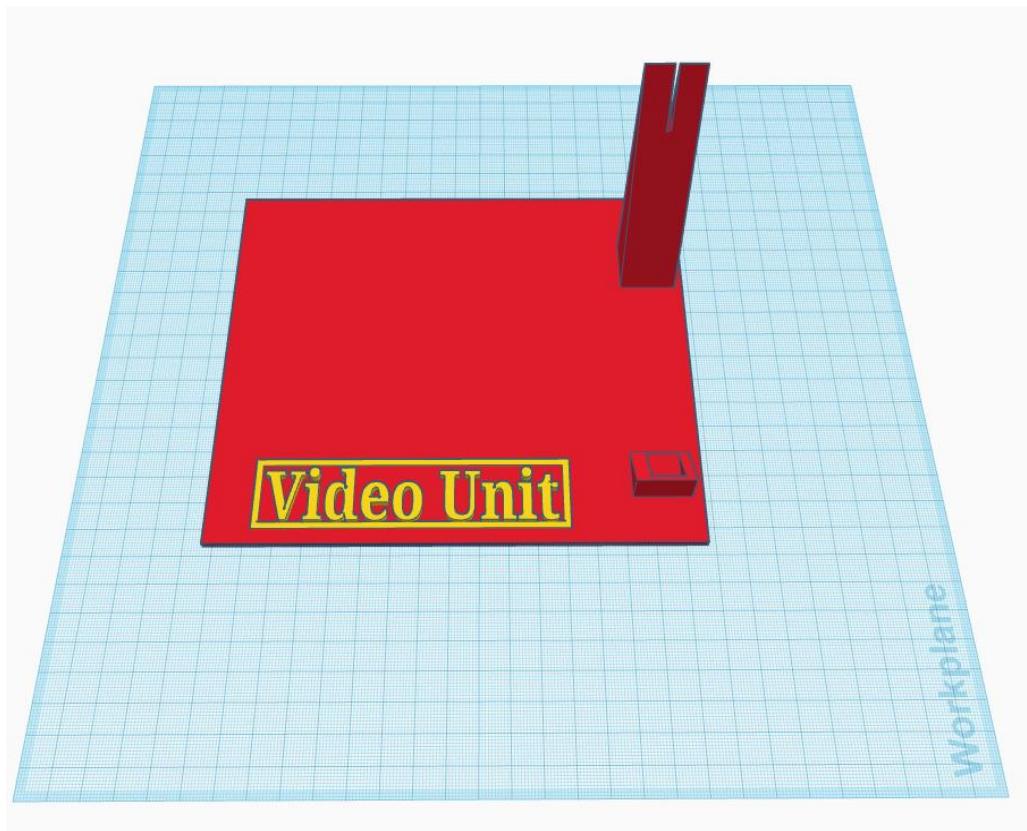
מארח ייעודי ליחידת הרתיעוד ביחידת הבס'ו:

חלק תחתון:



איור מס' 57 – החלק התחתון של המארח הייעודי של יחידת הצלום שבתחנת הבס'ו

כיסוי עליון:



איור מס' 58 – החלק העליון של המארח הייעודי של יחידת הצלום שבתחנת הבס'ו

התוצר: 10.

התוצר הסופי של הפרויקט הוא דגם אב טיפוס של רחפן מונחה GPS בעל יכולת נשיאה והטלה חבילה בנקודת ציון נבחרת מראש תוך כדי שידור וידאו אנלוגי בזמן אמיתי ורישום נקודת הציון שבה הוטלה החבילה על גבי צג דיגיטלי שמורכב על גבי הרחפן. בחלקו העליון של הרחפן מרכיבים שני בקרים – האחד בקר טיסה והשני בקר ESP32 לשיליטה על הזרוע, שני מקלט GPS, מושדר טלמטריה, מושדר וידאו אנלוגי, מקלט של יחידת השיליטה, בקר המנועים, צג דיגיטלי, זזם וסוללה של בקר-ה-ESP. בחלקו התחתון של הרחפן מותקנים מערכות תיעוד הטיסה – מצלמת וידאו אנלוגית, היחידה המכנית לביצוע המשימה וה솔לות של כל היחידות. בפרויקט זה מודלו והודפסו חלקים שונים המרכיבים על גבי הרחפן ובתנתן הבסיס כגן: מעמד לאנטנת שידור הוויידיאו האנלוגי, CISIO מגן לבקר הטיסה המשמש גם ככמען להרכיבים המרכיבים על חלקו העליון של הרחפן, מעמד למכמת הוויידיאו, גחון בעל מקום ייעודי לצרוע, מארץ ייעדי ליחידת הקליטה של הוויידיאו האנלוגי הכוללת מעמד לאנטנת הקליטה ומוקם אחסון לסוללות.

ביצוע הפרויקט עומדים בדרישות כפי שהוגדרו במסמך-h-SOW. קיימים שלושה סרטונים המראים את אופן הפעולה של הרחפן המבצע מסלול הגעה אל נקודת ציון נבחרת מראש והטלה כולל רישום הנקודה של הטלה בשלושת הקישורים הבאים:

<https://www.youtube.com/watch?v=1Pi9a24c3OI>

<https://www.youtube.com/watch?v=MWNcDIUXv9c>

<https://www.youtube.com/watch?v=-mhLxws-1Pw>

תמונה של התוצר הסופי:



איור מס' 59 – תמונה של התוצר הסופי

11.1 בדיקת מדדים:

מדד 1 – יכולת טיסה של כ-10 דקות למרחק של כ-300 מטר.

בדיקה המדד – לפני הרכבת כל המכולולים בוצעה הטסה של הרחפן בתנועה רציפה למשך כ-10 דקות בשטח פתוח, בבדיקה מסלול הטיסה נמצא כי המרחק שעבור בעת הבדיקה הגיע לכ-300 מטר.

הבדיקה נעשתה כדי לבחון את יכולת הטיסה הבסיסית של הרחפן ואת זמן העבודה של הסוללה. לאור הבדיקה הראשונית החלתית להחליף את המנועים הראשוניים חמוצים יותר ואת הסוללה הראשונית בסוללה בעלת קיבולת גבוהה יותר אשר נתנה זמן עבודה של כ-10 דקות.

מדד 2- הגעה לנקודת ציון שנבחרה מראש ברמת דיוק של 10-5 מטר.

בדיקה המדד – לצורך סנכרון בין 2-GPS הלכתי מסלול מלא באופן עצמי תוך החזקת הרחפן ובבדיקה נתוני שני-GPS במיקום ההטלה (בוצע מספר פעמים). לאור נתוני ה-GPS שהתקבלו בניתי פוליגון אשר משקף את הסטיה הממוצעת בין שני-GPS באופן צזה שהגעה אל הנקודה שנבחרה בתוכנית הטיסה תופיע בתוך הפוליגון של ה-GPS האחראי עלפתיחת הזרווע בהסתה שלא עליה על מרחק של 10 מטר.

מדד 3 – הפעלת מצלמה וזרוע מכנית על הרחפן לביצוע המשימה.

בדיקה המדד –

1. הפעלת המצלמה – המצלמה מופעלת מרגע קבלת מוקור מתח ומשדרת באופן רציף למסך

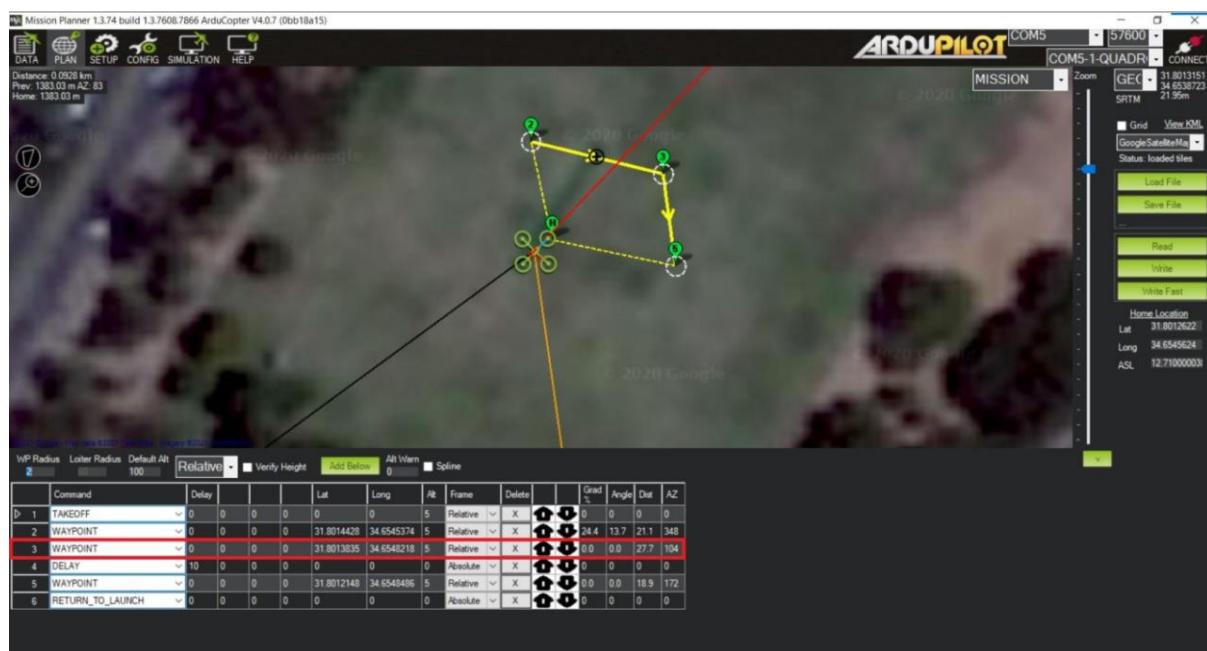
שנמצא ביחידת הבסיס. השידור נמשך לכל אורך המשימה.

2. הפעלת הזרווע – הזרווע מקבלת הוראה לפתיחה על ידי בקר ה-ESP עם זיהוי מיקום ה-

GPS בתחום הפוליגון שהוגדר מראש בברקים למקום ההטלה הנבחר.

מדד 4 – רישום נקודת הציון שבה בוצעה המשימה.

בדיקה המדד – בעת הגעה אל היעד הנבחר והפעלת הזרווע, נרשם מיקום ה-GPS על גבי צג דיגיטלי שהותקן על הרחפן. מידע זה נשמר עד הגעתו ונוחיתה של הרחפן בנקודת הבסיס.



איור מס' 60 – נקודת הציון שנבחרה בתוכנת Mission Planner



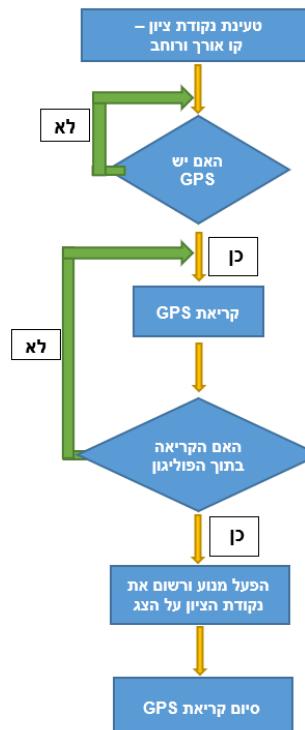
איור מס' 61 – נקודות הציון שנקלטה בזג הדיגיטלי של הרחפן

סטייה בין הערכים	נקודות הציון שנקלטה בזג הדיגיטלי של גבי הרחפן בעת הגעתו אל היעד	נקודות הציון שנבחרה בתוכנת ניהול הטיסה	
0.0000043	31.8013878	31.8013835	קו רוחב
0.0000366	34.6547852	34.6548218	קו אורך

טבלה 20 – השוואת בין נקודות הציון הנבחרת לבין נקודות הציון שנקלטה בפועל

11.2 אלגוריתם:

פותח אלגוריתם לבקר ה-ESP לניהול המשימה אשר מותנה ב-GPS שונה מה-GPS הראשי של יחידת ניהול הטיסה. השוני חייב בניתה של פוליגון אשר יאפשר סנכרון ביניהם באופן המדיוק ביותר. לאחר מספר רב של ניסויים נמצא הפוליגון המתאים שהוא הסט של 0.0000500 ± 0.0000500 מנקודות הציון הנבחרת.



איור מס' 62 – דיאגרמת בלוקים של האלגוריתם לבקר ה-ESP

בנית רחפן לצורכי טיסה אוטומטית בשטח פתוח והגעה לנקודות ציון שנבחרה מראש וביצוע משימת הטלה בנקודה זו על ידי סנוורן של GPS נספף המזהה את אזור הנקודה, היוותה אתגר טכנולוגי מעניין, מלמד ורוי בהתמודדות טכנולוגיות לאורך ח' הפרויקט.

אתגר ראשון שהתמודדתי עמו היה גיבוש הקונספט לבניית המערכת המשולבת. אתגר זה הושג בזכות חלוקת הפרויקט ל-3 מרכיבים אשר נבנו באופן סדרתי כאשר כל אחד מהם הוסיף את הנדרש שלהם. יחד-עם-זאת, בחירת הרכיבים המתאימים חייבה למידה מינימלית של כל רכיב ורכיב ממונעים, מערכות מכניות, מיקרו-בקרים, יחידות GPS, תכנון ערכי תקשורת ומידת תוכנת ניהול הטיסה על כל מרכיביה. תובנה מרכזית שעזרה לי להתקדם ולבחור רכיבים מתאימים היא הגדרת עקרון מנחה לאורך כל הפרויקט והוא עקרון הפשטות. עקרון הפשטות נועד לפחות ככל הנינתן את המערכת החל מבחרת רכיבים וכלה באינטגרציה וכטיבת תוכנית הפעלה מתאימה. הוקם המנהה הזזה בפרויקט, עזר לי להתמקד במהות ולסנן אלמנטים שאינם חיוניים לעמידה בדיידי הפרויקט. לדוגמה, הבחירה בסוג המנווע עבור יחידת הטלה. מנווע צעד יאלץ הוספה דרייברים (חומרה) במערכת כמו דוחפי זרם לטופות שליטה על כיווני המנווע יציבותו. בשונה מmono צעד, שילוב מנווע סרוו במערכת אינו מחייב הוספה חומרת דרייבר ובכך תורם לחיסכון במשקל של הרחפן לשאת. אתגר נוסף, היה לתכנן את תווך התקשרות ולבנות אנטנות מתאימות שייעמדו בדרישות על מנת לתת מענה לתקשרות עם יחידת הבסיס לשילטה ובקרה על כל מהלך הטיסה ולהעביר את שידור הוויידיאו מהמצלמה של הרחפן אל יחידת הבסיס בזרה הטובה ביותר שנייתן להשיג.

לצורך ביצוע המשימה בחרתי במנועים בעלי דירוג KV גבוהה ופרופולרים בעלי זווית פסיעה גדולה על מנת לקבל יכולת טיסה ונשייה מקסימלית עבור גוף הרחפן שנבחר.

בהתאם ליעדים ומדים נדרש משור ומקלט וידיאו אנלוגי לטייעוד הטיסה. מקמ"ש הוויידיאו האנלוגי שנפוץ בארץ בקרוב מטיסי רחפנים הוא בתדר 5.8GHz, אך מכיוון שהזוהו תדר לא חוקי לשימוש בארץ נאלצתי לחפש מקמ"ש וידיאו אנלוגי בתדר 2.4GHz שבו קשה להשגה עקב מיעוט המטיסים שמשתמשים בו וכן מחירו יקר בהתאם.

במהלך הפרויקט נתקلت בבעיות אינטגרציה של רכיבי המערכת. השימוש בשני GPS שונים חייב ניסוי ובדיקה של רמות התיאום והדיוק בינם. תוכנית הטיסה משתמשת ב-GPS הראשי תוכננה לביצוע הטיסה באופן מדויק ורציף, לעומת זאת GPS של יחידת הטלה שדרש מספר רב של ניסויים בשטח לקביעת גודלו של הפוליגון המינימלי שיאפשר הטלה למרחק הקרוב ביותר לנקודות הציון שנבחרה בתוכנית הטיסה בשאייה לדיווק מרבי.

במהלך הפרויקט אירעו תקלות טכניות שונות כגון: כשל של בקר טיסה ובקרים מנועים שהגיעו עם תקלת ייצור מסין וגרמו לביעوت המראה, נחייתה, י Cobb הרחפן במהלך טיסה ואף להתרסקות. בנוסף, נתקلت בעיית דיווק של ה-GPS הראשי שאחראי על ניהול הטיסה, לאחר החילפות ב-GPS מדויק יותר קיבלתי טיסה טובה יותר אל נקודות הציון הנבחרת ובחזרה אל נקודות הבסיס.

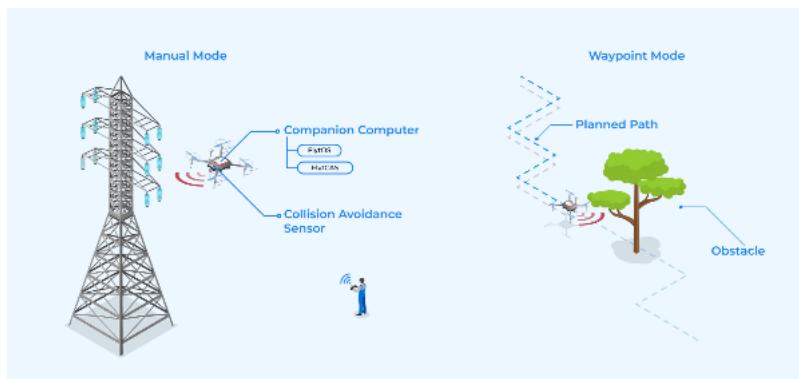
בפרויקט זה ביצעת מיידול והדפסה של חלקים שונים המורכבים על גבי הרחפן ואלייהם הותקנו רכיבים שונים כגון: בקרים, מנווע סרוו, אנטנות, זמזם, כפטור הפעלה, מצלמה וכו'. נרכשה מדפסת תלת מימד ובוצע מחקר לבחירת סוג החומר להדפסה שייהיה חזק וקל ככל הנינתן ובכך ישמש כמעט לרכיבים השונים ולא יפגע בתפקודו של הרחפן בעת הטיסה.

לסיכום, בנית רחפן לביצוע משימה אוטומטית מותנת GPS הושגה בהצלחה. היכולת להגעה אל המטרה, לזהות אותה על ידי שני רכיבי GPS נפרדים ולבצע את הטלה וכל אלה עם תיעוד וידיאו רציף על ידי מצלמה שמורכבת על גבי הרחפן הושגה בהצלחה.

13. הצעה לעובדת המשר:

ישן מספר פיתוחים שנייתן להוסיף לפרויקט זה לעתיד:

1. שימוש בחישון קירבה שמזזה מכשולים עוקף אותם ווחזר למסלול באופן אוטומטי.
שייפור זה יאפשר לרחפן לבצע משימות גם באזוריים לא פתוחים.



איור מס' 63 – תיאור פעולה חישון הקירבה על גבי רחפן

2. שימוש במודול סלולרי התומך ברשות דור 4 אשר ישלח הודעה SMS לטלפון כאשר הרחפן מגיע אל היעד ומבצע את פעולה הטעלה.

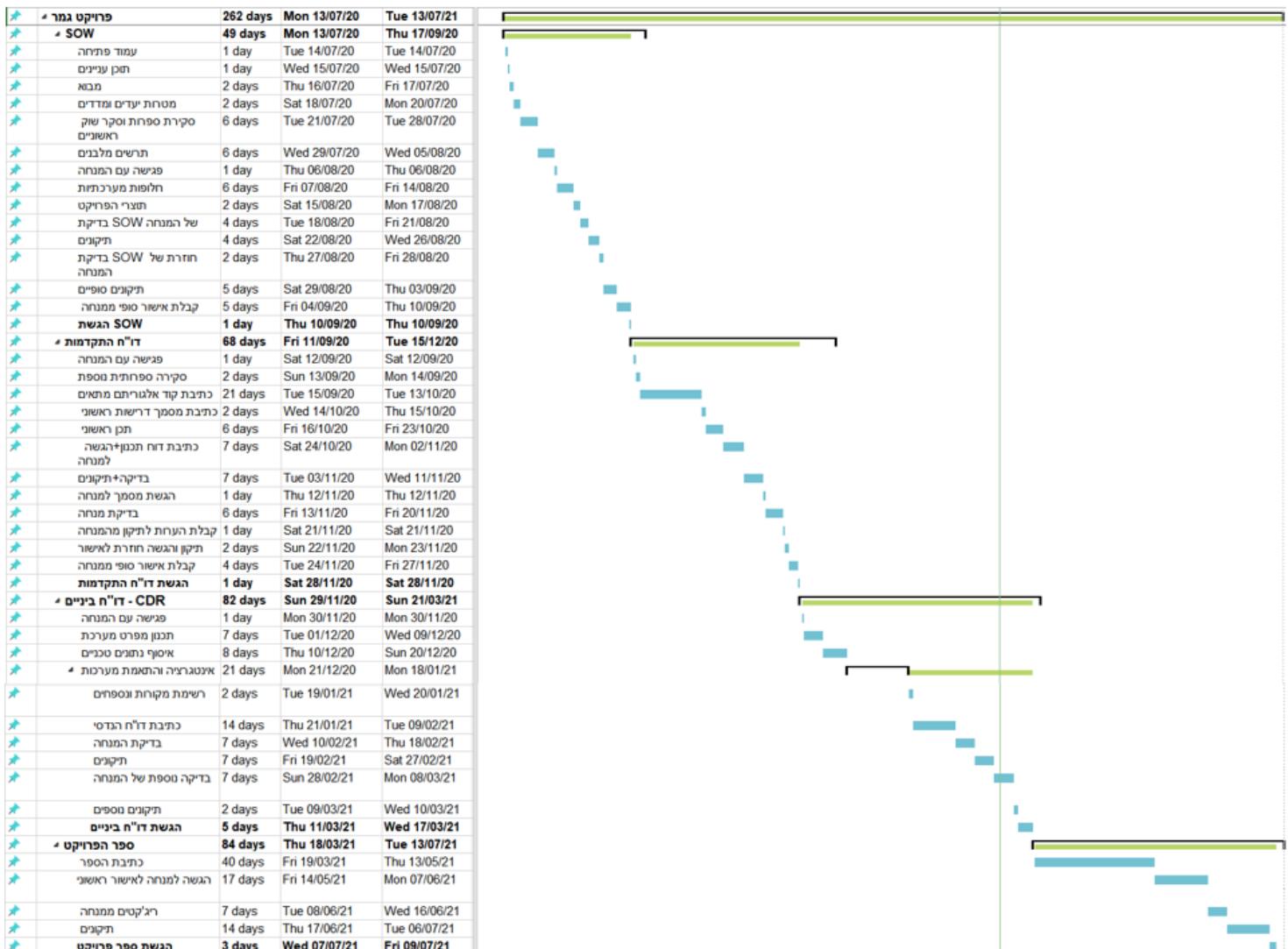


איור מס' 64 – מודול סלולרי התומך ברשות דור 4

3. ניתן ליישם את הפרויקט לאונה מטריה על גבי פלטפורמת גוף רחבן יותר המכילה אפשרות של הרכבת מנועים חזקים יותר וחיבור מקבילי של מספר סוללות ובכך לאפשר לרחפן לשאת משקלים גדולים יותר ונפח מטען גדול יותר ואפשרות למשר זמן טיסה ארוך יותר.



איור מס' 65 – תיאור רחפן בעל פלטפורמת גוף גדולת

14.1 תוכנית עבודה סופית:

איור מס' 66 – דוח התקדמות הפרויקט

14.2 ריכוז שינויים:

לא בוצעו שינויים מאז כתיבת המסמך הראשוני.

14.3 ניהול סיכוןים ודרך התמודדות:

נזק לרחפן בגל ריסוק:

הבעיה: במהלך טיסות הניסוי קיימ סיכון רב להתרסקות של הרחפן. הריסוק יכול לגרום להרס של המדחסים ואף לפגוע בברק הטיסה עצמו.

פתרונות: המדחסים הינם רכיב זול יחסית ולכן נדאג לרכוש מבעוד מועד כמות של מדחסים לצורך החלפה שוטפת. על מנת להגן על ברק הטיסה מפגיעה של התרסקות, ניתן לתכנן ולהדפיס בתמלת מיינד מארץ שיגן על הברק טישה במקרה של ריסוק.

סכנה לאיבוד תקשורת בין הרחפן לשולט:

הבעיה: בגלל שקיימות הפרעות רדיו בסביבת הטיסה, קיימ סיכוי לכשל תקשורת בין השולט לרחפן. במקרה זה אם הרחפן ימשיך בבחירה הפקודה האחרונה שהוא קובל, קיימ סיכוי שהרחפן ימשיך לטוס לכיוון הטיסה האחרונה שהוא היה בה, דבר זה יגרום לאיבוד קשר עין מהרחפן ואיבודו.

פתרונות: ניתן להגיד בתוכנת בקר הטיסה כי כאשר ישנו אובדן תקשורת בין השולט לרחפן, הברק טישה יפסיק במידה את רצף הפקודות ויבצע במקום זאת פעולה של חזרה לנחיתה ביחידת הבסיס או נחיתה ישירה בנקודה בו הוא נמצא.

עומס רב על הזרוע המכנית העולול לגרום לנזק:

הבעיה: בעת הרמה של חפץ כלשהו, קיימ החשש של שבירת הזרוע בעקבות העמסת משקל גדול מדי. שבירה פתאומית של הזרוע המכנית בזמן טיסה באוויר עלול לגרום לרחפן לאבד אייזון ואף להגיע להתרסקות על הקruk. כמו כן, אי ביצוע המשימה.

פתרונות: ביצוע יכול של בקר ה-DID בזורה מיטבית ייתן יציבות טישה עם המטען ולאחר הפלתו. בדיקה מקדימה של יכולת העמסה של הזרוע למניעת משקל יתר.

מאמראים:

- [1] Khan, M. (2014). Quadcopter flight dynamics. *International Journal of Science and Technology Research*, 3(8), 130-135.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.636.9532&rep=rep1&type=pdf>

- [2] Hassan, D. K. H., Ms, K. A. R. N. S., & Jayalakshmi, K. P. Design and Self-Stabilization of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using PID Controller.

https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/59460704/design-and-self-stabilization-of-unmanned-aerial-vehicle-uav-using-pid-controller-IJERTV8IS05046020190530-67565-1mbdfdk.pdf?1559285335=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIJERT+Design+and+Self+Stabilization+of+U.pdf&Expires=1624795119&Signature=YPfTmRsFMagriAVdfzA2H6ahlkLCqYB11WLQd5bclj3c0h2~pl6WRHbfblEkhHdsfzMfc2ZHh83RSJU389iUdXknpfGquqcLgMKqllmQPBTxZJiUD0nTHZfVOZZDedG-V7IW1cr7vAEeSh4ut4atyQwuhBloBiOTjh9nPbcq5luwfrHymkmubNooKpnL9sJML02h8dyixT~yMheAVVBXIKjTYBhZEIHStSex0yh7djyhRIVUwgTv4gWwX0GPA8hI2KolvIn0O958OQ1A1tXjSA2THf2wHcecPjkJ4dnkshipIraG5qGf1bNpnBVRYvCrbZOQYGWjzNiwtLXKVFBsg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- [3] Carter, C. (1997). Principles of GPS. *A Brief Primer on the Operation of the Global Positioning System*, ALLEN OSBORNE ASSOCIATES.

https://www.mouser.de/pdfdocs/GPS_facts_principles_of_gps.pdf

 כתבות:

- [4] Amazon Prime Air Delivery,(2016)

https://www.amazon.com/b?node=8037720011&ref_=aa_art_btn&pf_rd_r=PBCHPHZ7294P1HN8JWA7&pf_rd_p=c507fba8-5301-4f03-8293-6be2bb6cc10b

במקום מטו ריסוי-רchip שמרסס שדות (2018) , YNET [5]

<https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5329624,00.html>

רchip ה"שוקן" שטטי שקיות סרחות: הסיט של המפינים ברכזעת עזה (2018) , WALLA [6]

<https://news.walla.co.il/item/3158487>

[1] Flight Controller – Pixhawk

<https://store.mrobotics.io/Genuine-PixHawk-Flight-Controller-p/mro-pixhawk1-minkit-mr.htm>

[2] GPS RadioLink SE100

https://www.robotshop.com/media/files/pdf2/radiolink_se100_gps_user_manual2016.7.13.pdf

[3] Eagle Power 1250kv brushless motor

https://www.dennisxl.com/products/eagle-power-ga2316-kv1250-1250kv-brushless-rc-motor-2s-3s-for-fixed-wing-uav-rc-airplane-racing-drone_1591347

[4] Radio Telemetry 433MHz

<https://drones.altigator.com/radio-telemetry-kit-a-for-pixhawk-433mhz-p-42334.html>

[5] Radio Transmitter – FlySky Fs i6

<https://www.flysky-cn.com/fsi6>

[6] Radio Receiver – 10 Channels

<https://robokits.co.in/multirotor-spare-parts/radio-control-tx-rx/flysky-fs-ia10b-10ch-2.4ghz-receiver-rx>

[7] ImmersionRc - Analog Video Transmitter

<https://www.getfpv.com/immersionrc-2-4ghz-700mw-a-v-transmitter-us-version.html>

[8] LawMate – Analog Video Receiver

https://beta.ivc.no/wiki/index.php/Lawmate_Mods

[9] Micro Controller - Esp32

<https://components101.com/microcontrollers/esp32-devkitc>

[10] Micro Servo Motor

<https://components101.com/motors/servo-motor-basics-pinout-datasheet>

[11] GPS NEO 6m

<https://lastminuteengineers.com/neo6m-gps-arduino-tutorial>

[12] Serial LCD Module 1602 + I2C

<https://opencircuit.shop/resources/file/da88acc1702a90667728fcf4ac9c75c455475706466/I2C-LCD-interface.pdf>

קוד סופי : 16.2

הקוד הסופי של יחידת ההטלה בתוכנת ארדואינו:

```
#include <TinyGPS++.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

bool flag = true;
//LED///////////
#define LED_BUILTIN 2
////////coordinates/////////
#define latitude1 31.8014314
#define longitude1 34.6546769
///////////
float lati;
float longi;

//GPS section///////////
static const int RXPin = 16, TXPin = 17;
static const uint32_t GPSBaud = 9600;

//The TinyGPS++ object
TinyGPSPlus gps;

//The serial connection to the GPS device
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin);

//Servo section///////////
static const int servoPin = 13; // defines pin number for PWM
Servo servo1; // Create object for servo motor

//LCD///////////
//set the LCD number of columns and rows
int lcdColumns = 16;
int lcdRows = 2;
//set LCD address, number of columns and rows
//if you don't know your display address, run an I2C scanner sketch
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);
///////////

//int flag = 0;//initial constant to 0
```

```

void setup()
{
  Serial.begin(115200)
  Serial.begin(9600)
  ss.begin(GPSBaud);
  servo1.attach(servoPin); // start the library

//////////// LCD///////////
// initialize LCD
lcd.clear();
lcd.init();
// turn on LCD backlight
lcd.backlight();
// clear LCD last data
lcd.clear();
// set cursor to first column, first row
lcd.setCursor(0,0);
// print message
lcd.print("GPS SEARCH..."); 
delay(3000)

pinMode(LED_BUILTIN,OUTPUT);

}

void loop()
{
// This sketch displays information every time a new sentence is correctly
encoded.
  while (ss.available() > 0)
    if (gps.encode(ss.read()))
      displayInfo();

  if (millis() > 5000 && gps.charsProcessed() < 10)
  {
    Serial.println(F("No GPS detected: check wiring."));
    while(true);
  }
}

//function section
void displayInfo()
{
///////////////
  Serial.print(F("Location: "));
  if (gps.location.isValid())
  {

    if (flag)//entering only if flag is true
  }
//  clear LCD last data
}

```

```

lcd.clear();  

// set cursor to first column, first row  

lcd.setCursor(0,0)  

// print message  

lcd.print("GPS 3D FIX");  
  

Serial.print(gps.location.lat(), 7);  

Serial.print(F(","));  

Serial.print(gps.location.lng(), 7);  
  

if (gps.location.lat()>latitude1-0.0000500 &&  

gps.location.lat()<latitude1+0.0000500 && gps.location.lng()>longitude1-  

0.0000500 && gps.location.lng()<longitude1+0.0000500)  

{  
  

    flag = false;//change flag from true to false  

    lati=gps.location.lat();  

    longi=gps.location.lng();  
  

// //Motor operation///////////  

//  

// //for section servo motor/////////////////////////////  

for(int posDegrees = 0; posDegrees <= 180; posDegrees++)  

{  

    servo1.write(posDegrees);  

    Serial.println(posDegrees);  

    delay(20)
}  
  

for(int posDegrees = 180; posDegrees >= 0; posDegrees--)  

{  

    servo1.write(posDegrees);  

    Serial.println(posDegrees);  

    delay(20)
}  

/////////////////////////////  
  

/// LCD Display///////////  

//  
  

// //clear LCD last data  

lcd.clear();  

// set cursor to first column, first row  

lcd.setCursor(0,0)  

// print message  

lcd.print("Lati:"); lcd.print(lati,7);  

// set cursor to first column, second row  

lcd.setCursor(0,1)  

lcd.print("long:"); lcd.print(longi,7) ;
{

```

```

{
{
else
}
Serial.print(F("NO GPS SIGNAL!"));

/// //LCD Display///////////
// clear LCD last data
lcd.clear();
// set cursor to first column, first row
lcd.setCursor(0,0)
// print message
lcd.print("NO GPS!");
{
///////////

Serial.print(F(" Date/Time: "));
if (gps.date.isValid())
{
    Serial.print(gps.date.month());
    Serial.print(F("/"));
    Serial.print(gps.date.day());
    Serial.print(F("/"));
    Serial.print(gps.date.year());
}
else
{
    Serial.print(F("UNKNOW"));
}
///////////
Serial.print(F(" "));
if (gps.time.isValid())
{
    if (gps.time.hour() < 10) Serial.print(F("0"));
    Serial.print(gps.time.hour()+3);
    Serial.print(F(":"));
    if (gps.time.minute() < 10) Serial.print(F("0"));
    Serial.print(gps.time.minute());
    Serial.print(F(":"));
    if (gps.time.second() < 10) Serial.print(F("0"));
    Serial.print(gps.time.second());
    Serial.print(F("."));
    if (gps.time.centisecond() < 10) Serial.print(F("0"));
    Serial.print(gps.time.centisecond());
}
else
{
    Serial.print(F("UNKNOW"));
}

```

```
{  
/////////  
Serial.println();  
{
```