



המכללה האקדמית להנדסה בראודה, כרמיאל

המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה

ספר פרויקט גמר בתכן הנדסי

מכונית אוטונומית - Autonomous Car

מגישים:

חתימה:

209158518

יובל המר

חתימה:

316439116

עידו בן הרוש

בהנחיית:

ד"ר עירא וולפסון

חתימה:

ח' בתשרי, ה' תשפ"ה

30/09/2025

תאריך:

הוגש לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר
"בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה B.Sc. בוגר במדעים"



תקציר:

בפרויקט פיתחנו מערכת רכב אוטונומית המבוססת על הבקרים Arduino ו-Raspberry Pi 5 אשר מסוגלת לנווט לקואורדינטות GPS תוך הימנעות ממכשולים בזמן אמת.

המערכת פועלת בשני מצבים :

1. שליטה ידנית באמצעות פקודות בתקשורת Bluetooth.

2. ניווט אוטומטי מבוסס GPS.

שני מצבים אלו כוללים מנגנוני בטיחות מתקדמים לזיהוי מכשולים וניהול מסלול הנסיעה.

הרכב מצויד במצלמה המופעלת על ידי בקר ה-Raspberry Pi 5 אשר מריצה את אלגוריתם זיהוי בני אדם. כאשר אדם מזוהה, הרכב נעצר באופן מיידי, ונדלק LED אדום לאזהרה, עד אשר האדם ייצא משדה הראייה. הפרויקט תוכנן ומומש בחלוקה לרכיבים מודולריים האחראים על ניהול מצבים, שליטה במנועים, עיבוד חיישנים והגדרות מערכת.

יכולות המערכת כוללות ניווט מדויק לנקודות GPS עם דיוק של עד 15 מטר מהיעד שהוגדר, הימנעות חכמה ממכשולים באמצעות לוגיקת תמרון בשלושה מצבים, ומעבר חלק בין מצב ידני למצב אוטונומי. הפרויקט מדגים יישום מתקדם בתחום הרובוטיקה האוטונומית, תוך שילוב בין עיבוד מידע בזמן אמת, ראייה ממוחשבת, ותכנון תוכנה מודולרי המאפשר הרחבות עתידיות.



תוכן עניינים

1.	מבוא:	1
2.	רשימת קיצורים:	1
3.	תיאור המערכת:	2
3.1.	הגדרה פונקציונאלית:	2
3.2.	מפרט פונקציונאלי:	2
3.3.	מפרט טכני:	3
3.3.1.	מכלולי המערכת:	3
3.3.2.	תרשים מלבנים:	4
3.3.3.	תרשימי זרימה ומערכת מצבים:	5
3.3.4.	דיאגרמות חשמליות:	11
3.4.	עיקרון פעולת המערכת:	18
4.	מטלות הנדסיות:	19
4.1.	מטלות מכלול תנועה:	19
4.2.	מטלות מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים:	19
4.3.	מטלות מכלול התקשורת:	19
4.4.	מטלות מכלול הניווט:	19
4.5.	מטלות מכלול התמרון:	20
4.6.	מטלות מכלול זיהוי האדם:	20
5.	תכנון אב:	20
5.1.	סביבות הפיתוח:	20
5.2.	תכן חומרה:	20
5.2.1.	Arduino Mega 2560:	20
5.2.2.	Raspberry Pi 5:	21
5.2.3.	L293D Motor Shield:	21
5.2.4.	Pi Camera V2:	21
5.2.5.	HC-06:	22
5.2.6.	(US) HC-SR04:	22
5.2.7.	Lidar Lite V3:	22
5.2.8.	MPU-9250/6500:	22
5.2.9.	NEO-6M:	23
5.3.	תכן תוכנה:	23
6.	סימולציות:	25
7.	ניהול הפרויקט:	26
7.1.	בעיות ואתגרים הנדסיים:	26
7.2.	עמידה בדרישות:	27



- 28..... 7.3 הצעות לשיפור:
- 29..... 8. ביבליוגרפיה וסימוכין:
- 30..... 9. נספחים:
- 30..... 9.1 נספח 1 – נוסחת Haversine:
- 30..... 9.2 נספח 2 – נוסחת חישוב המרחק בחיישן (US) HC-SR04:
- 30..... 9.3 נספח 3 – נוסחת חישוב המרחק בחיישן Lidar Lite V3:
- 31..... 9.4 נספח 4 – הצעת הפרויקט:
- 31..... 9.5 נספח 5 – קודים:
- 31..... 9.6 נספח 6 – סרטון הדגמה:

רשימת איורים:

- 4..... איור 1 – תרשים מלבנים של מכלולי המערכת
- 5..... איור 2 – מערכת מצבים – כלל המערכת
- 6..... איור 3 – תרשים זרימה – מצב ידני
- 7..... איור 4 – תרשים זרימה – מצב אוטומטי
- 8..... איור 5 – תרשים זרימה – מצב ניווט GPS
- 9..... איור 6 – תרשים זרימה – מצב תמרון
- 10..... איור 7 – תרשים זרימה – מצב זיהוי אדם
- 11..... איור 8 – דיאגרמה חשמלית כוללת
- 12..... איור 9 – דיאגרמת מכלול התנועה
- 13..... איור 10 – דיאגרמת מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים
- 14..... איור 11 – דיאגרמת מכלול התקשורת
- 15..... איור 12 – דיאגרמת מכלול הניווט
- 16..... איור 13 – דיאגרמת מכלול התמרון
- 17..... איור 14 – דיאגרמת מכלול זיהוי אדם
- 25..... איור 15 – דוגמה למסלול נסיעה
- 25..... איור 16 – האפליקציה לשליטה ברכב

רשימת טבלאות:

- 1..... טבלה 1 – רשימת קיצורים
- 3..... טבלה 2 – מכלולי המערכת
- 5..... טבלה 3 – מקרא צורות בתרשימי הזרימה
- 27..... טבלה 4 – עמידה בדרישות הפרויקט



1. מבוא:

תחום הרכב האוטונומי נמצא בשנים האחרונות בחזית החדשנות הטכנולוגית, עם חברות כמו Tesla, Waymo ו-Mobileye שמובילות את הדרך בפיתוח מערכות נהיגה חכמות. רכבים אלו כבר משתלבים בכבישים בעולם ומבוססים על טכנולוגיות מתקדמות כמו עיבוד תמונה בזמן אמת, למידת מכונה, חיישנים מגוונים ואלגוריתמים מתקדמים לקבלת החלטות. כל אלה מאפשרים לרכב לזהות את סביבתו, לתכנן מסלול תנועה ולהגיב בזמן אמת – ללא תלות בנהג האנושי. התפתחות זו אינה מוגבלת רק לתעשייה, אלא מעוררת עניין רב גם באקדמיה, ומובילה לפרויקטים בקנה מידה קטן יותר שמטרתם להבין, לחקור וליישם את העקרונות שמניעים את התחום. במסגרת פרויקט זה פיתחנו מערכת רכב אוטונומית קטנה, המבוססת על שילוב בין Arduino ו-Raspberry Pi 5, שני בקרים פופולריים ואמינים – שמדמים את פעילותו של רכב אוטונומי בקנה מידה מוקטן. המערכת פועלת בשני מצבים:

1. מצב ידני הנשלט באמצעות פקודות Bluetooth.
2. מצב אוטונומי מלא המבוסס על ניווט לקואורדינטות GPS שנקבעו מראש תוך הימנעות ממכשולים, והכל בזמן אמת.

בנוסף, שולב ברכב מנגנון לזיהוי בני אדם, המבוסס על מצלמה שמחוברת ל-Raspberry Pi 5 המריץ אלגוריתם לזיהוי אובייקטים. כאשר מזוהה אדם, הרכב נעצר לחלוטין ונדלקת נורה אדומה המסמלת על זיהוי אדם מלפני הרכב. הרכב ימשיך בעצירתו עד אשר האדם יוצא מטווח הראייה של המצלמה. המערכת משלבת עקרונות של תכנות מונחה עצמים, מבנה תוכנה מודולרי, עיבוד נתונים וראייה ממוחשבת, וכן גם היבט מעשי של תכנון ובנייה פיזית של הרכב – כולל שילוב רכיבי חומרה, חיווט והתקנה מכנית מדויקת. זהו יישום מקיף של עקרונות הרובוטיקה האוטונומית, אשר מדגים לא רק את ההיתכנות של המערכת אלא גם מהווה בסיס להמשך למידה, ניסויים ושדרוגים – בדומה לתחום האמיתי שנמצא בהתפתחות תמידית.

2. רשימת קיצורים:

RP5	-	Raspberry Pi 5
US	-	Ultra Sonic
CM	-	Camera module
GPIO	-	General Purpose Input Output
UART	-	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
TX	-	Transmit
RX	-	Receive
I ² C	-	Inter-Integrated Circuit
SDA	-	Serial Data Line
SCL	-	Serial Clock Line



3. תיאור המערכת:

3.1 הגדרה פונקציונאלית:

מטרת הרכב האוטונומי היא לנווט לעבר קואורדינטות GPS מוגדרות מראש תוך הימנעות ממכשולים בזמן אמת, עם יכולת לעבור בצורה חלקה בין מצבי הפעלה ידניים לאוטונומיים ולהפך. המערכת נועדה לשמש כפלטפורמה ניסיונית בקנה מידה מוקטן, המדמה את עקרונות הפעולה של רכב אוטונומי אמיתי, תוך שילוב בין חיישנים, עיבוד נתונים וקבלת החלטות ליצירת מערכת אוטונומית שלמה ומתפקדת.

3.2 מפרט פונקציונאלי:

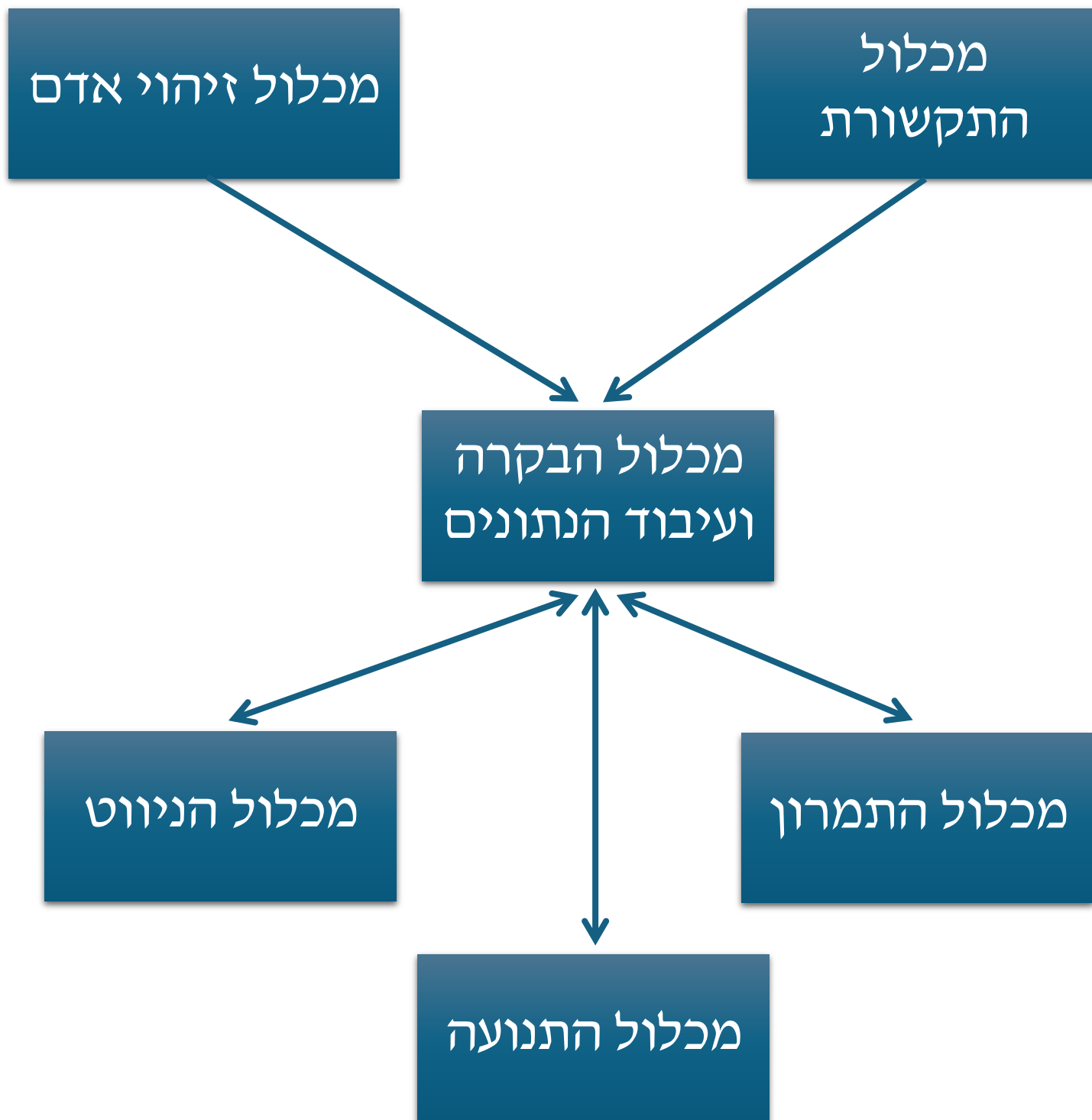
1. ניווט אוטונומי לנקודות GPS מוגדרות מראש, עם דיוק הגעה של עד 15 מטר (ניתן לשינוי).
2. הימנעות ממכשולים בזמן אמת באמצעות אלגוריתם תמרון המבוסס על שלושה מצבים.
3. אלגוריתם זיהוי הולכי רגל באמצעות מצלמה המופעלת על גבי RP5:
 - 3.1 בעת זיהוי אדם – הרכב עוצר.
 - 3.2 נדלקת נורת אדומה המסמלת סכנה והרכב לא ימשיך בתנועתו.
 4. שני מצבי פעולה:
- 4.1 שליטה ידנית באמצעות פקודות Bluetooth באפליקציה ייעודית.
- 4.2 מצב אוטונומי מלא המבוסס על ניווט עצמאי וניתוח הסביבה.
- 4.3 מעבר חלק בין מצב ידני למצב אוטונומי בהתאם לפקודת המשתמש.
5. ניהול מצבים פנימי: עצירה, תנועה, תמרון, מעבר בין מצבים.
6. עיבוד נתונים מסנסוריים בזמן אמת לקבלת החלטות תנועה.
7. שילוב מלא בין חומרה לתוכנה - בקרה, חיישנים, מצלמה ותקשורת.
8. הפעלה ממקור כוח חיצוני (סוללות).

3.3 מפרט טכני:

3.3.1 מכלולי המערכת:

רכיבי המכלול	תפקיד	מכלולי המערכת
<ul style="list-style-type: none"> 4 DC motors. L293D Motor driver shield. 2 Li-ion batteries, 3.7V 	<p>אחראי על הנעת הרכב בפועל. כולל את המנועים, הגלגלים ובקר המהירויות (Motor Driver).</p> <p>מקבל פקודות מהבקר המרכזי (Arduino) כדי לזוז קדימה, אחורה, לפנות ולעצור בהתאם לצורך.</p>	מכלול התנועה
<ul style="list-style-type: none"> Arduino Mega 2560: <ul style="list-style-type: none"> ➤ 7–12V input. ➤ 54 digital I/O pins (15 PWM), 6 interrupts. ➤ 4 UARTs, 1 I²C. ➤ 16 MHz Clock Frequency, 256 KB flash memory. Raspberry Pi 5: <ul style="list-style-type: none"> ➤ USB-C input, 5V/5A. ➤ 40 GPIO pins with I²C and PWM. ➤ Dual connectors for cameras and displays. ➤ 2.4 GHz Clock Frequency, 4 GB RAM. 	<p>כולל את ה-RP5 ואת הבקר Arduino Mega 2560.</p> <p>ה-Arduino מהווה את יחידת הבקרה המרכזית: קורא חיישנים, מנהל את מנועי התנועה והתמרון, ומבצע את לוגיקת ההפעלה והעצירה על סמך פקודות חיצוניות ונתונים בזמן אמת מחיישנים שונים.</p> <p>בקר ה-RP5 מקבל את תמונת הווידאו מהמצלמה, מעבד אותה באמצעות אלגוריתם זיהוי ובמידה וזוהה אדם – שולח פקודת עצירה לתנועת הרכב לבקר ה-Arduino.</p>	מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים
<ul style="list-style-type: none"> HC-06. 	<p>כולל את רכיב ה-HC-06, המאפשר תקשורת אלחוטית (Bluetooth) בין הרכב לנהג לצורך שליטה וקבלת פקודות.</p>	מכלול התקשורת
<ul style="list-style-type: none"> MPU-9250/6500 magnetometer. Neo-6m GPS module. 	<p>כולל את מודול ה-GPS לקביעת מיקום גאוגרפי ואת חיישן ה-MPU9250, הכולל מגנטומטר (משמש כמצפן דיגיטלי). שילוב הרכיבים מאפשר חישוב מדויק יותר של מיקום, כיוון ותנועה של הרכב בזמן אמת.</p>	מכלול הניווט
<ul style="list-style-type: none"> HC-SR04 (US). Lidar Lite V3. 	<p>כולל חיישני קרבה למדידת מרחקים וזיהוי מכשולים. מאפשר עצירה או עקיפה במצב אוטונומי וידני.</p>	מכלול התמרון
<ul style="list-style-type: none"> Pi Camera V2. Portable Charger 5200mAh, 5V/2.1A. 	<p>כולל את המצלמה אשר משדרת תמונה בזמן אמת ומספקת נתונים חזותיים למערכת.</p> <p>משמשת לזיהוי בני אדם במהלך תנועת הרכב ועצירתו.</p>	מכלול זיהוי אדם

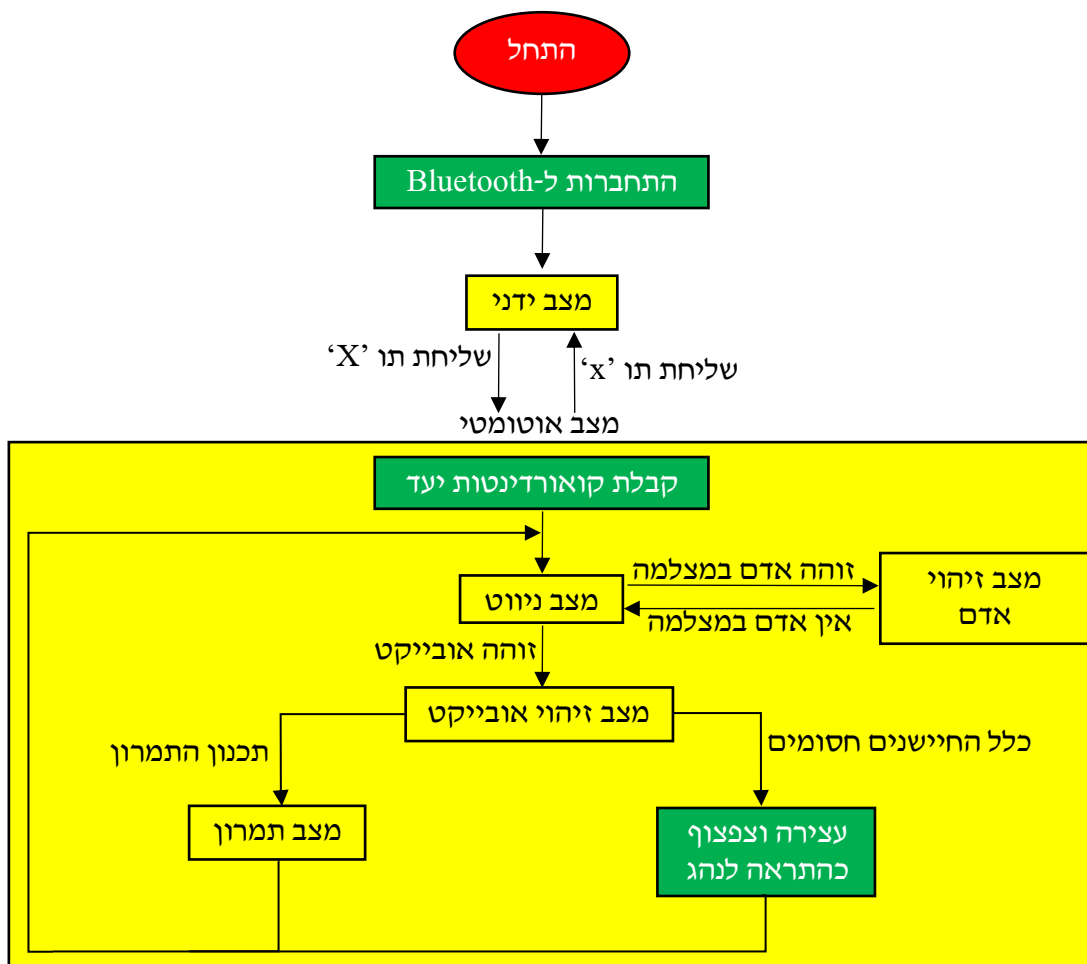
3.3.2 תרשים מלבנים:



איור 1 – תרשים מלבנים של מכלולי המערכת

3.3.3 תרשימי זרימה ומערכת מצבים:

3.3.3.1 מערכת מצבים – כלל המערכת:



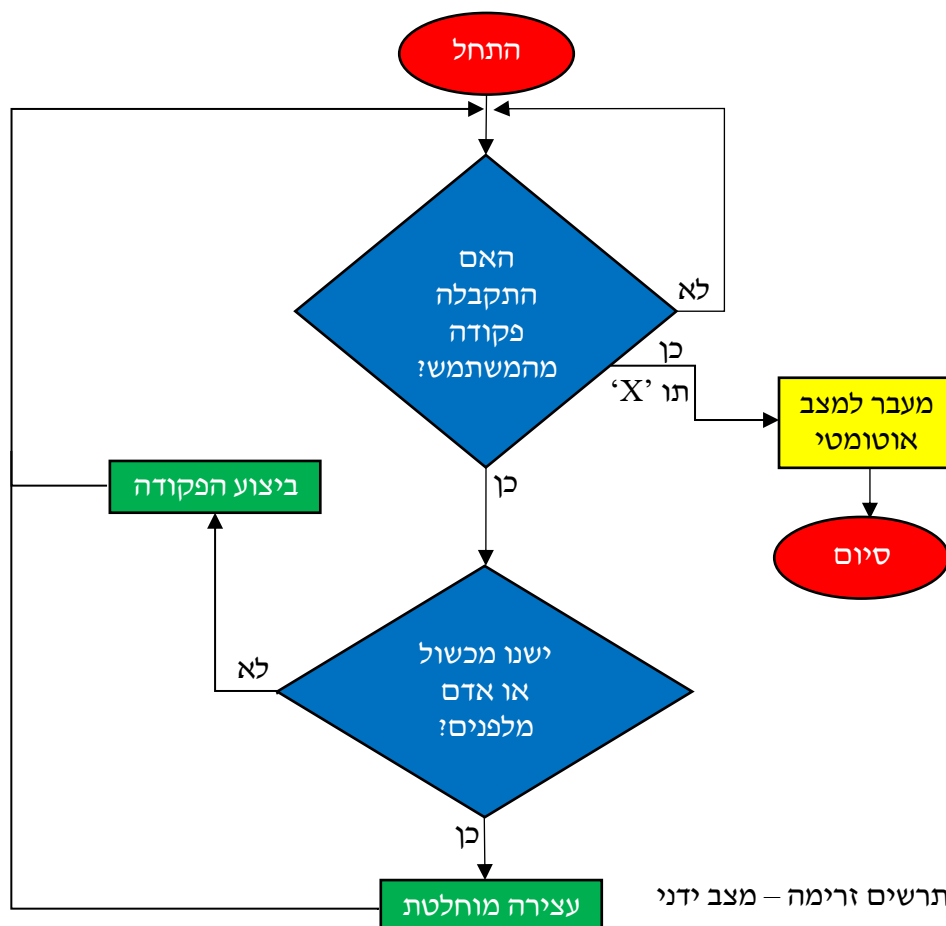
איור 2 – מערכת מצבים – כלל המערכת

מקרא:

פרשנות	סימון
התחלה/סיום תהליך	
פעולה יחידה לביצוע	
תרשים זרימה פנימי	
צומת תנאים לביצוע	

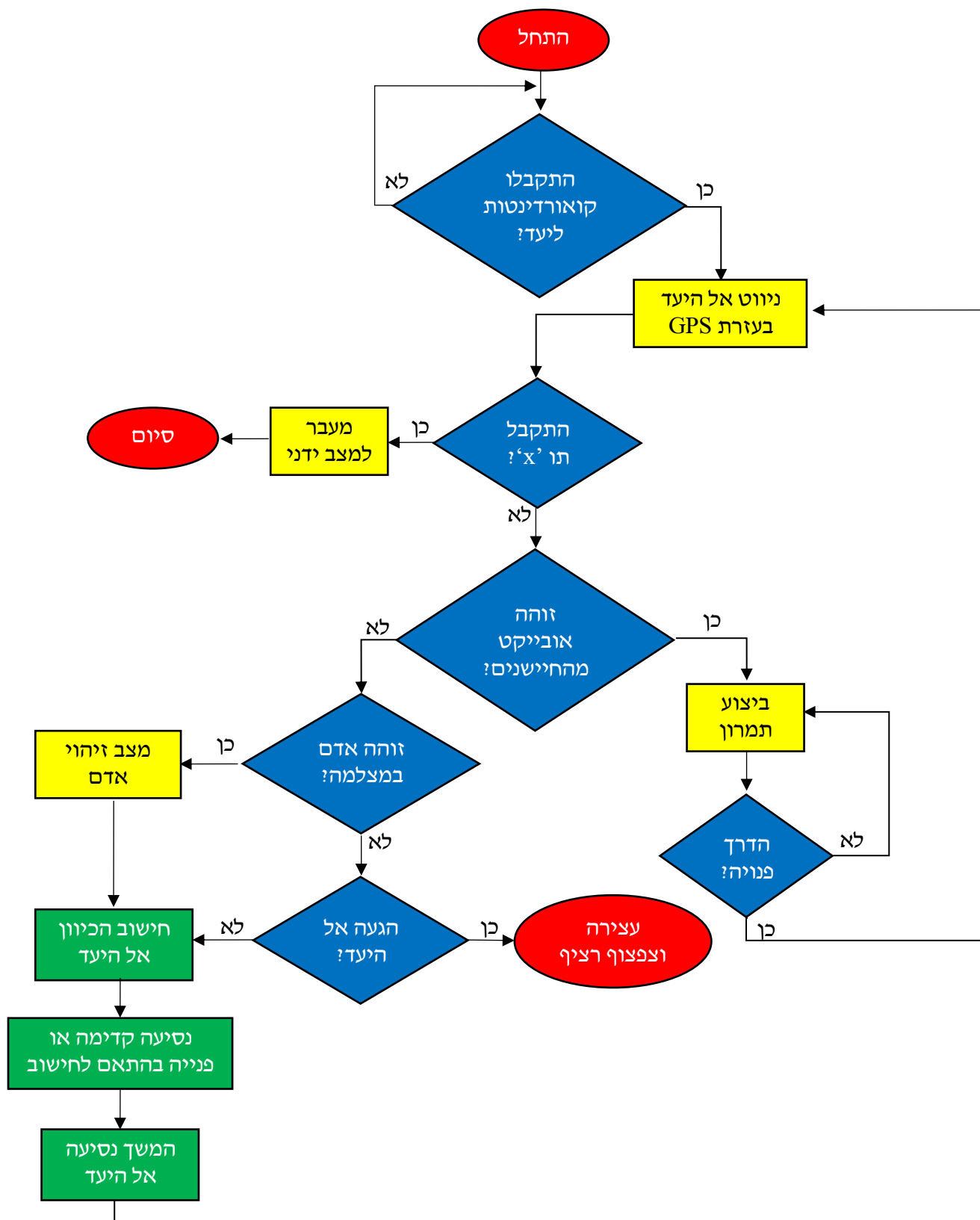
טבלה 3 – מקרא צורות בתרשימי הזרימה

3.3.3.2 תרשים זרימה – מצב ידני:



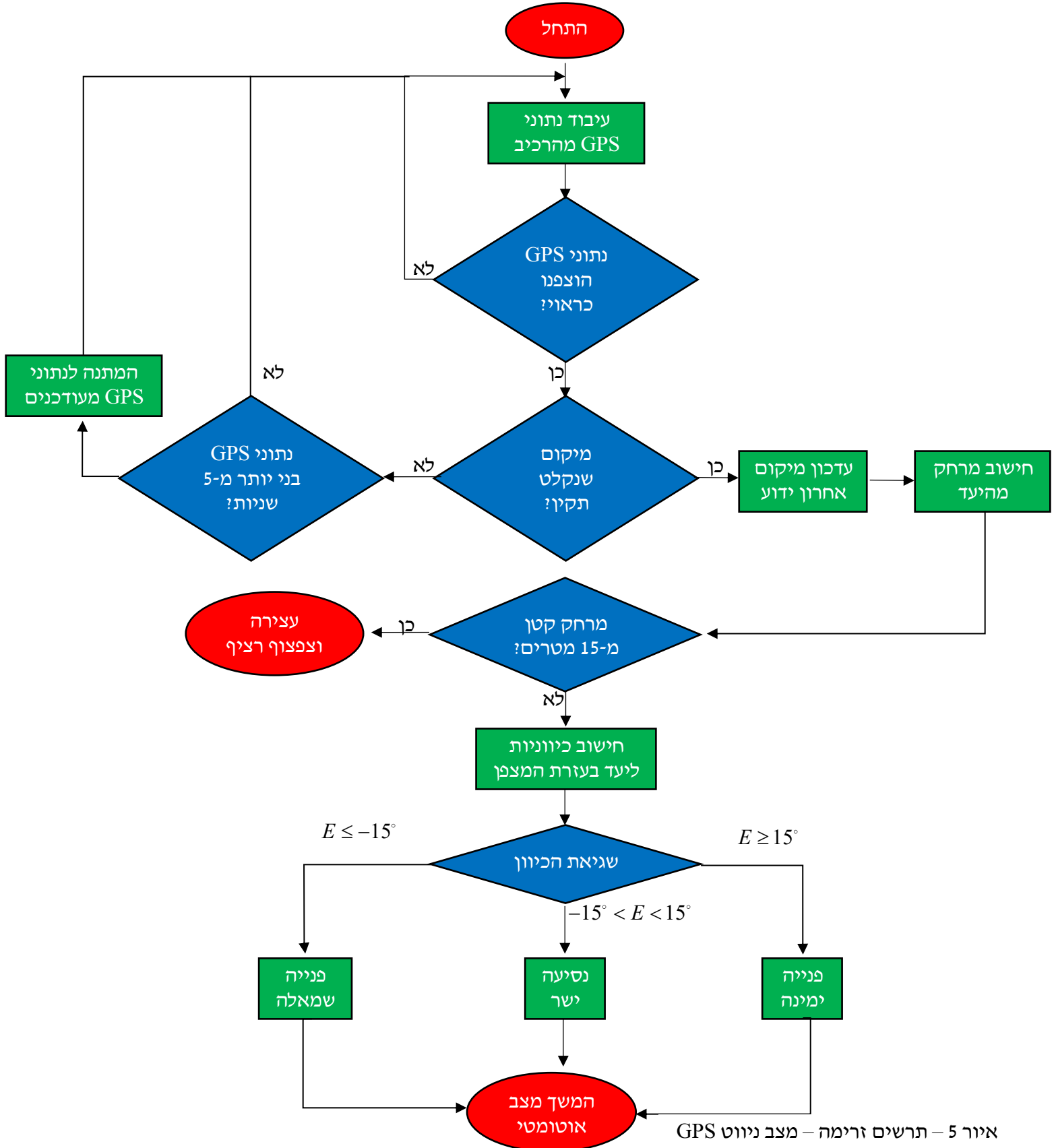
איור 3 – תרשים זרימה – מצב ידני

3.3.3.3 תרשים זרימה – מצב אוטומטי:

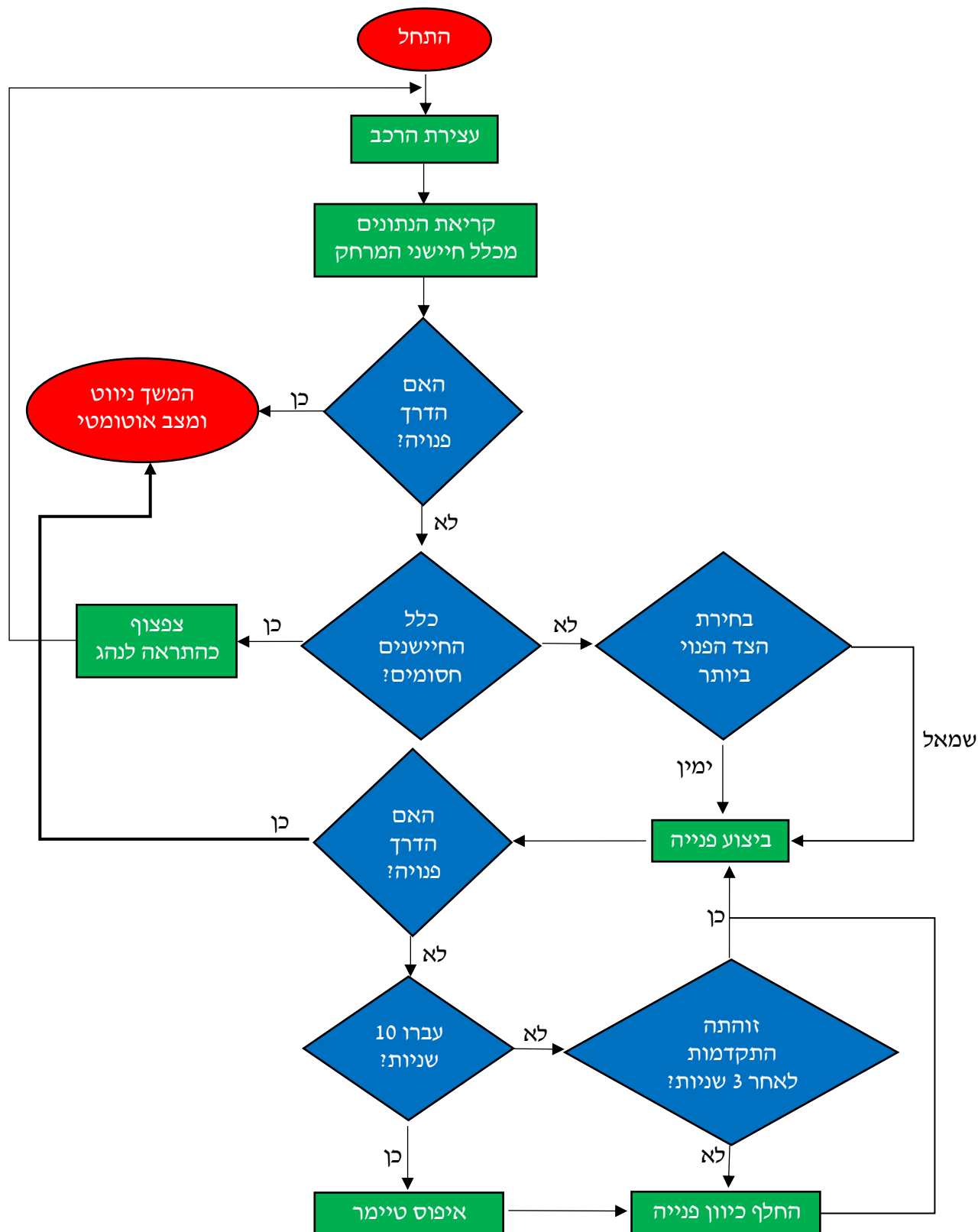


איור 4 – תרשים זרימה – מצב אוטומטי

3.3.3.4 תרשים זרימה – מצב ניווט GPS:



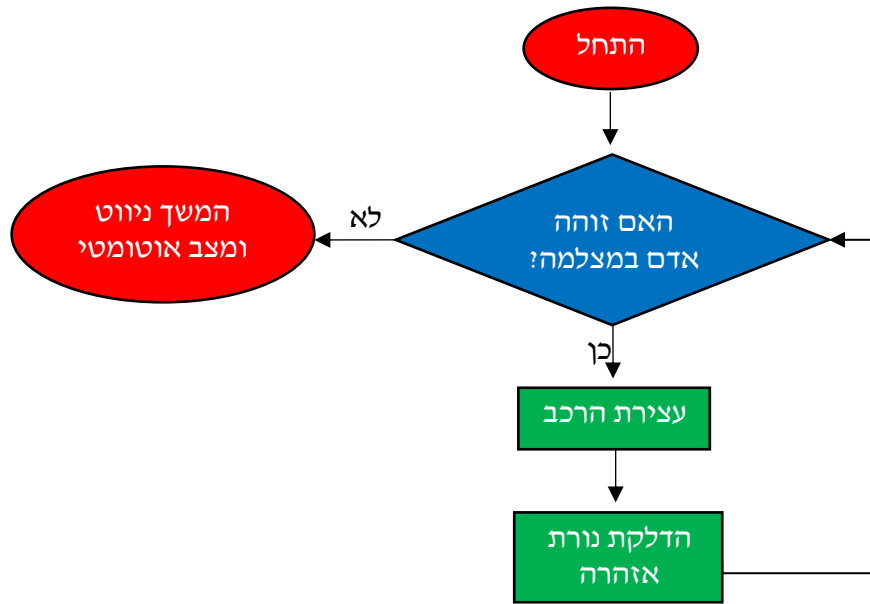
3.3.3.5 תרשים זרימה – מצב תמרון:



איור 6 – תרשים זרימה – מצב תמרון



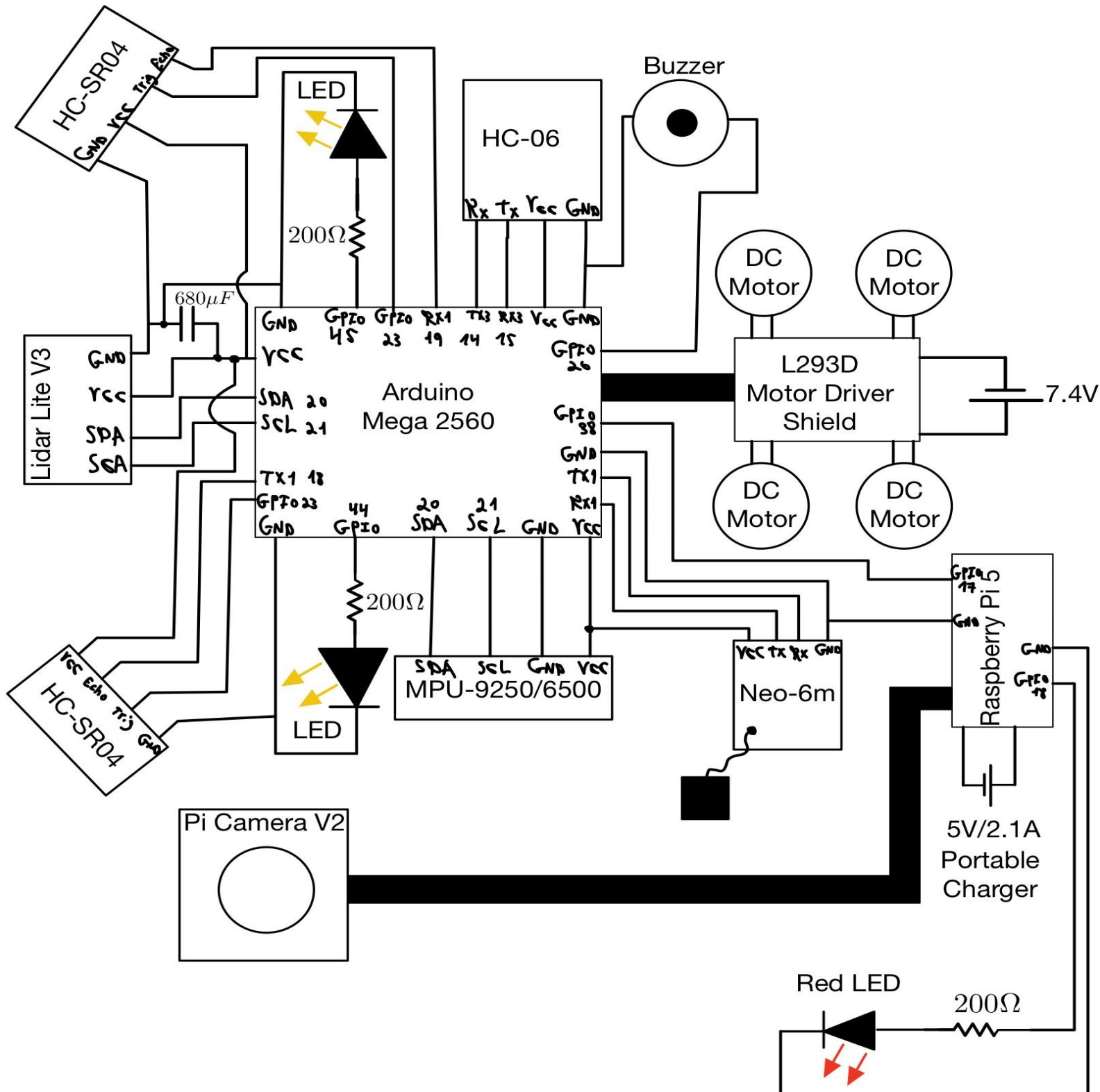
3.3.3.6 תרשים זרימה – מצב זיהוי אדם:



איור 7 – תרשים זרימה – מצב זיהוי אדם

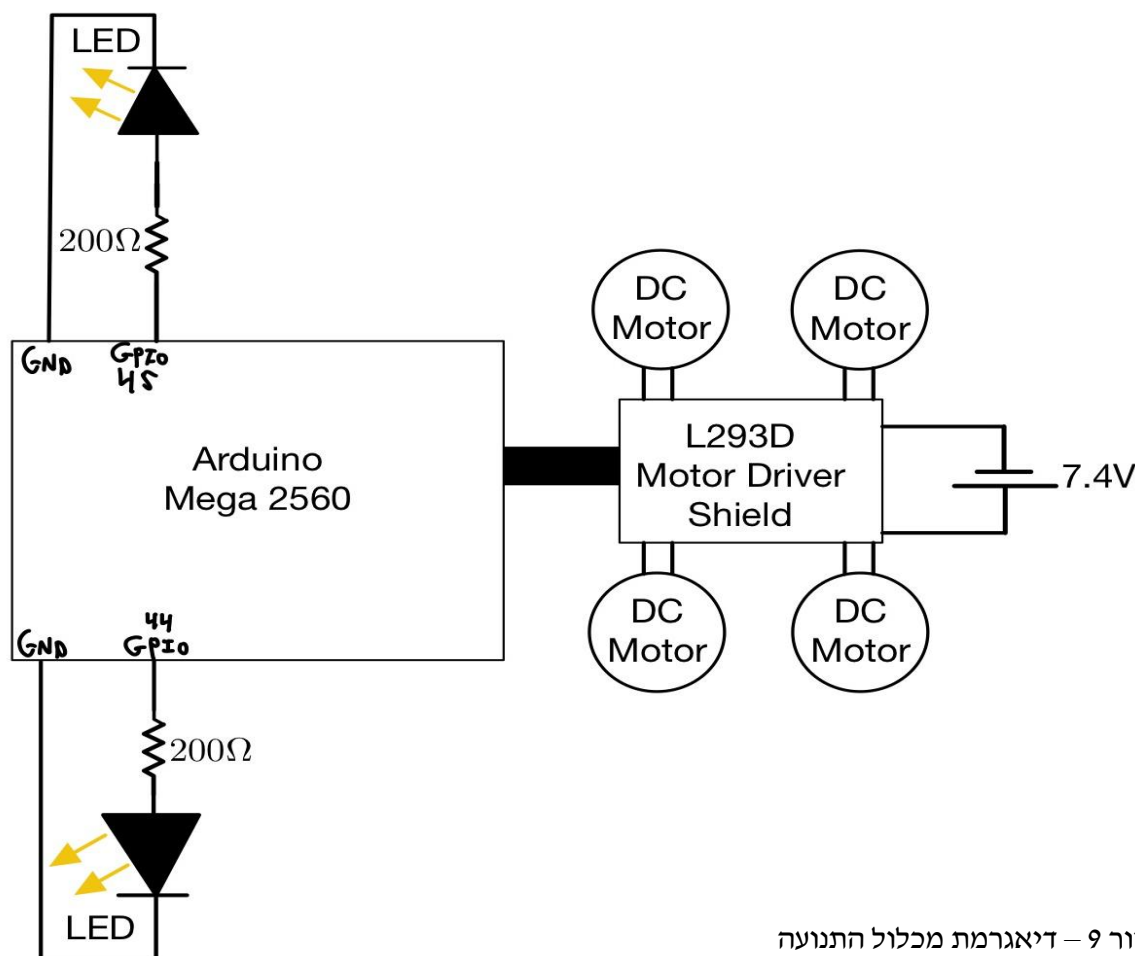
3.3.4 דיאגרמות חשמליות:

3.3.4.1 דיאגרמה חשמלית כוללת:



איור 8 – דיאגרמה חשמלית כוללת

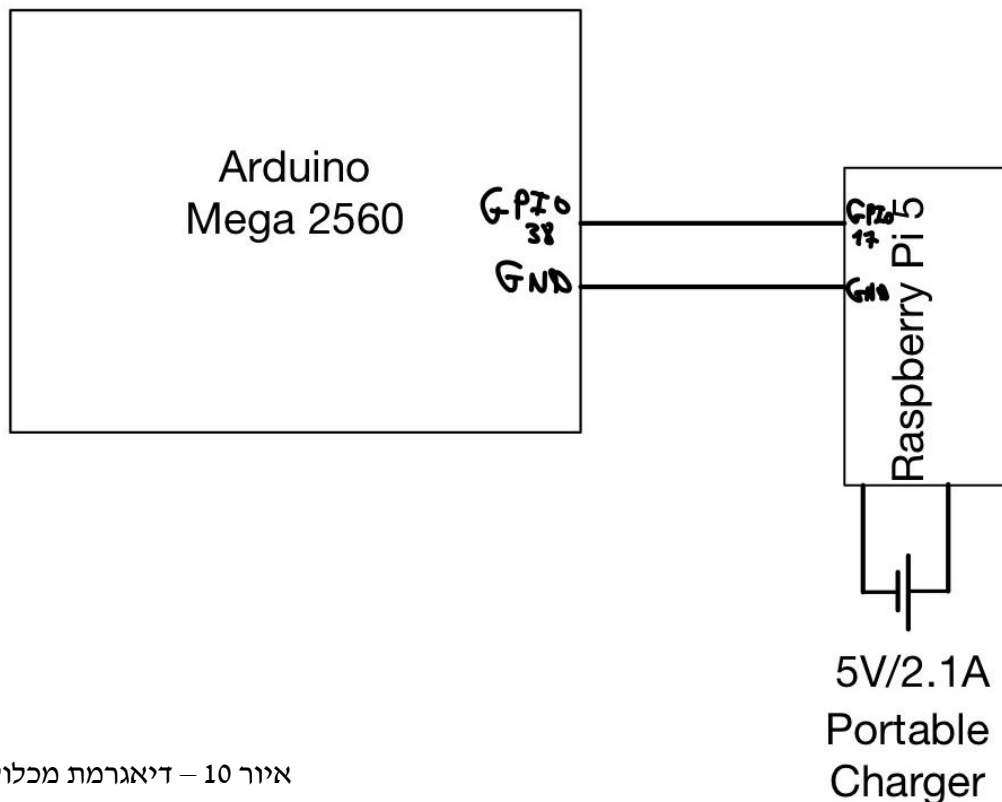
3.3.4.2 דיאגרמת מכלול התנועה:



איור 9 – דיאגרמת מכלול התנועה

מכלול התנועה של הרכב האוטונומי בנוי ממיקרו-בקר Arduino Mega 2560 האחראי על פלטפורמת ההנעה ארבעה גלגלים באמצעות L293D Motor driver shield. המערכת שולטת בארבעה מנועי DC באופן עצמאי באמצעות אותות PWM (פינים 3, 5, 6, 9) לוויסות מהירות ופינים דיגיטליים (2, 4, 7, 8) לבקרת כיוון, המאפשרים תמרונים מורכבים הכולל תנועה קדימה ואחורה, פניות ותנועות אלכסוניות. נוריות LED מובנות המחוברות לפינים 44 ו-45 בבקר עם נגדים בגודל 200Ω להגבלת הזרם, מספקות משוב חזותי במהלך הניווט, ומפעילות אוטומטית את הנורית המתאימה (שמאל או ימין) במהלך הפניות שמתבצעות (פנייה ימינה או פנייה שמאלה). במימוש אלגוריתמיקת התנועה, נעשה שימוש בספריית AFMotor לניהול המנועים כך שלכל מנוע מוקצה מזהה ייחודי בהתאם למיקומו ברכב. תצורה זו תומכת הן בשליטה ידנית מרחוק באמצעות פקודות Bluetooth והן בניווט אוטונומי מבוסס GPS עם הימנעות מכשולים בזמן אמת, כאשר מערכת ה-LED המובנית משפרת את הבטיחות על ידי מתן אינדיקציה חזותית ברורה לשינויי הכיוון המיועדים של הרכב במהלך פעולה ידנית ורצפי תמרון אוטונומיים כאחד.

3.3.4.3 דיאגרמת מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים:



איור 10 – דיאגרמת מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים

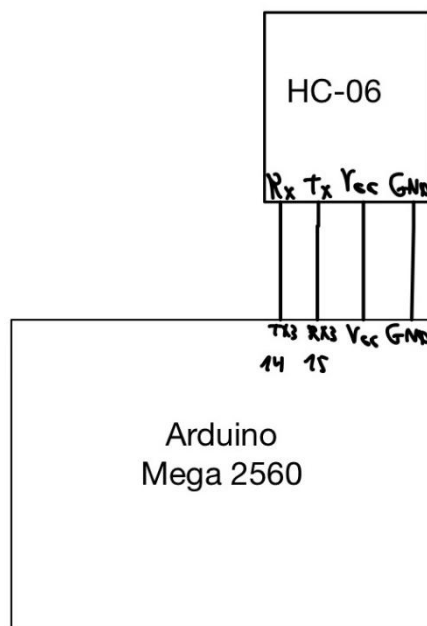
מערכת הבקרה ועיבוד הנתונים מיישמת ארכיטקטורת מחשוב מבוזרת המנצלת את החוזקות של שני מיקרו-הבקרים להשגת ביצועים אופטימליים של רכב אוטונומי. ה-Arduino Mega 2560 משמש כיחידת הבקרה בזמן אמת, ומטפל בפעולות קריטיות לזמן כולל בקרת מנועים, קבלת נתוני מרחק מחיישני ה-US וה-LIDAR, עיבוד נתוני GPS ותגובות מיידיות להימנעות מכשולים הדורשות זמני תגובה מהירים.

ה-RP5 מתפקד כיחידת עיבוד התמונה, ומבצע אלגוריתם YOLO (You Only Look Once) לזיהוי אנשים בזמן אמת באמצעות מודול המצלמה המשולב שלו, תוך שהוא מופעל באופן עצמאי על ידי מטען נייד המספק 5V וזרם 2.1A, במטרה להבטיח פעולה יציבה במהלך עיבוד רשת הנוירונים העמוקה.

התקשורת בין שתי המערכות מתרחשת דרך חיבורי GPIO, תוך שימוש ספציפי בפין 38 לאות בטיחות קריטי - כאשר אלגוריתם YOLO מזהה אדם בפריים המצלמה, ה-RP5 שולח אות HIGH לפין 38 של ה-Arduino, ומפעיל עצירת חירום של הרכב.

ארכיטקטורה זו מבטיחה עיבוד מקבילי בו שתי היחידות פועלות בו-זמנית - בעוד ה-RP5 מריץ את אלגוריתם YOLO לזיהוי אנשים ואף נותן אינדיקציה לכך בהדלקת נורה אדומה, ה-Arduino שומר בזמן אמת על בקרה רציפה של תנועת הרכב, מעקב חיישנים וניווט GPS, ויוצר מערכת חזקה שבה פונקציות קריטיות לבטיחות אינן נפגעות מהעומס החישובי של עיבוד ראייה ממוחשבת מתקדמת.

3.3.4.4 דיאגרמת מכלול התקשורת:



איור 11 – דיאגרמת מכלול התקשורת

מערכת התקשורת מבוססת על מודול Bluetooth מסוג HC-06, המחובר ישירות לבקר Arduino Mega 2560, ומאפשר שליטה אלחוטית מרחוק באמצעות אפליקציה ייעודית בטלפון הנייד. החיבור למודול כולל ארבעה קווים עיקריים:

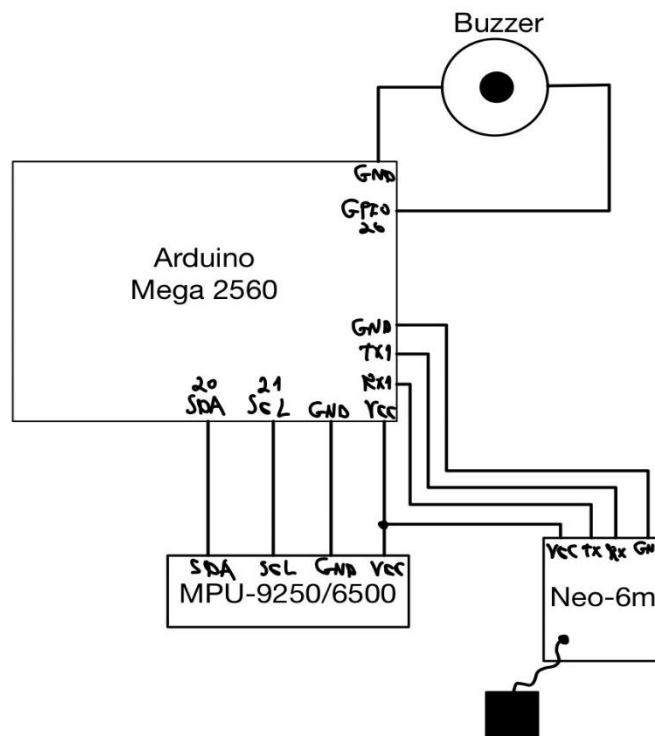
- Rx (קלט) המחובר לפין Tx3 של בקר ה-Arduino.
- Tx (פלט) המחובר לפין Rx3 של בקר ה-Arduino.
- VCC לאספקת מתח יציב של 5V.
- GND להארקה משותפת.

המודול פועל בפרוטוקול UART בקצב של 9600 ביט לשנייה (Baud Rate), ומספק תקשורת יציבה בטווח של עד 10 מטרים. האפליקציה הייעודית שולחת פקודות בצורה של תווים בודדים כאשר התווים העיקריים הינם:

- 'F' – נסיעה קדימה.
- 'B' – נסיעה אחורה.
- 'L' – פנייה שמאלה.
- 'R' – פנייה ימינה.
- 'S' – עצירת התנועה.
- 'Y' – צפירה בצופר.
- 'X' – מעבר למצב אוטונומי.
- 'x' – חזרה למצב ידני.

הפקודות מעובדות בזמן אמת, תוך שילוב קריאת החיישנים המונעים תנועה קדימה במקרה של זיהוי מכשול.

3.3.4.5 דיאגרמת מכלול הניווט:



איור 12 – דיאגרמת מכלול הניווט

מערכת הניווט מבוססת על שילוב של רכיבי חישה מתקדמים, המאפשרים ניווט אוטונומי מדויק באמצעות נתוני מיקום וכיוון. מודול ה-GPS מסוג Neo-6M מספק נתוני מיקום גלובליים בדיוק של כ-2.5 מטרים, ופועל בפרוטוקול UART בקצב של 9600 ביט לשנייה. התקשורת עם בקר ה-Arduino מתבצעת דרך Serial2 כאשר המודול שולח מחרוזות NMEA¹ הכוללות בין היתר קואורדינטות קו אורך ורוחב (Longitude, Latitude). הנתונים מנותחים בעזרת ספריית TinyGPS++ הממירה את מחרוזות ה-NMEA לנתונים מספריים להמשך עיבוד. לצד ה-GPS, נעשה שימוש בחיישן כיוון (מצפן) מסוג MPU-9250/6500 הכולל בתוכו מגנומטר. החיישן מתקשר עם הבקר באמצעות פרוטוקול I²C דרך הפינים SDA ו-SCL, בכתובת 0x68. נתוני הכיוון עוברים עיבוד באמצעות חישוב ממוצע של מספר דגימות, במטרה להפחית רעשים ולהשיג יציבות במדידת הזווית. לצורכי התרעה קולית, המערכת כוללת זמזום, המבצעת רצף צפירות כפולות עם הגעה ליעד.

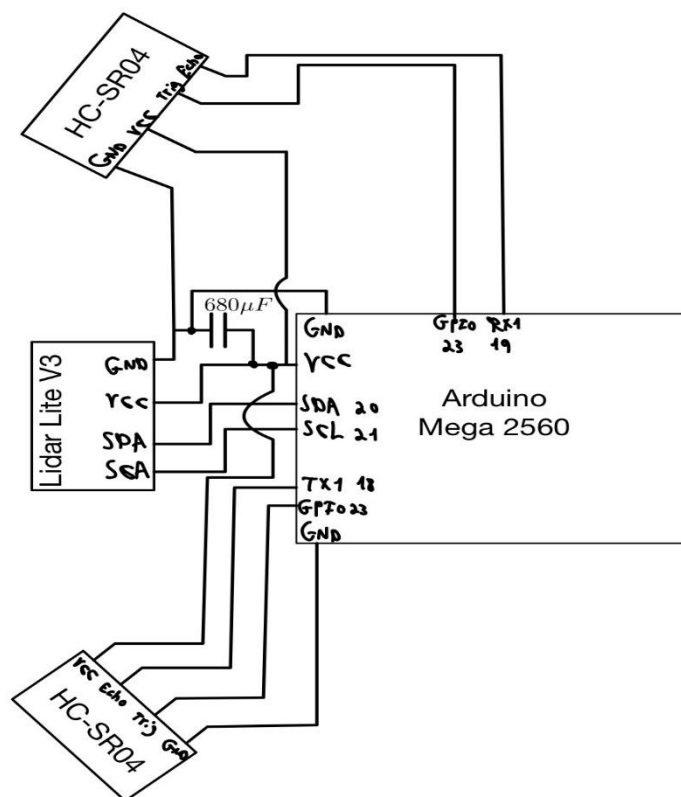
הלוגיקה של הניווט האוטונומי מבוססת על מספר אלמנטים מרכזיים:

- המערכת מחשבת את המרחק מהיעד לפי נוסחת Haversine².
 - המערכת מחשבת את זווית הכיוון הרצויה.
 - השוואה בין הכיוון הנדרש לבין הכיוון הנוכחי לצורך תיקון המסלול.
- המערכת מבצעת עדכון מיקום רציף אחת ל-5 שניות בעזרת פסיקת Timer1, תוך יכולת תגובה למכשולים על המסלול. במקרה של תמרונים, נשמרות הקואורדינטות האחרונות כדי להמשיך את הניווט בצורה חלקה לאחר עקיפת המכשול.

¹National Marine Electronics Association - האיגוד הלאומי לאלקטרוניקה ימית

²וראו נספח 1

3.3.4.6 דיאגרמת מכלול התמרון:



איור 13 – דיאגרמת מכלול התמרון

מכלול התמרון מבוסס על שילוב של מספר חיישני מרחק הפועלים בטכנולוגיות שונות, המחוברים לבקר ה-Arduino. שילוב זה נועד לאפשר חישה מדויקת, גמישה ורבת טווח של הסביבה.

חיישני HC-SR04:

שני חיישנים מסוג HC-SR04 משמשים למדידת מרחק באמצעות גלי קול. הם פועלים על ידי שידור פולס באמצעות פין ה-Trig והמתנה להחזרתו מהעצם הנמדד. הקליטה נעשית בפין ה-Echo אשר מודד את הזמן בין השידור להחזרה ומומר למרחק באמצעות נוסחה פשוטה³. טווח המדידה של החיישן נע בין כ-2 ס"מ ועד לכ-4 מטרים. הבחירה בפיינים 18 ו-19 עבור פיני ה-Echo אינה מקרית – מדובר בפיינים התומכים בפסיקות בבקר ה-Arduino. שימוש בפסיקות מאפשר זיהוי מיידי של ההחזר הפולס שנשלח, מבלי לעכב את פעולתו של המיקרו-בקר, מה שתורם לביצועים מדויקים ומהירים יותר.

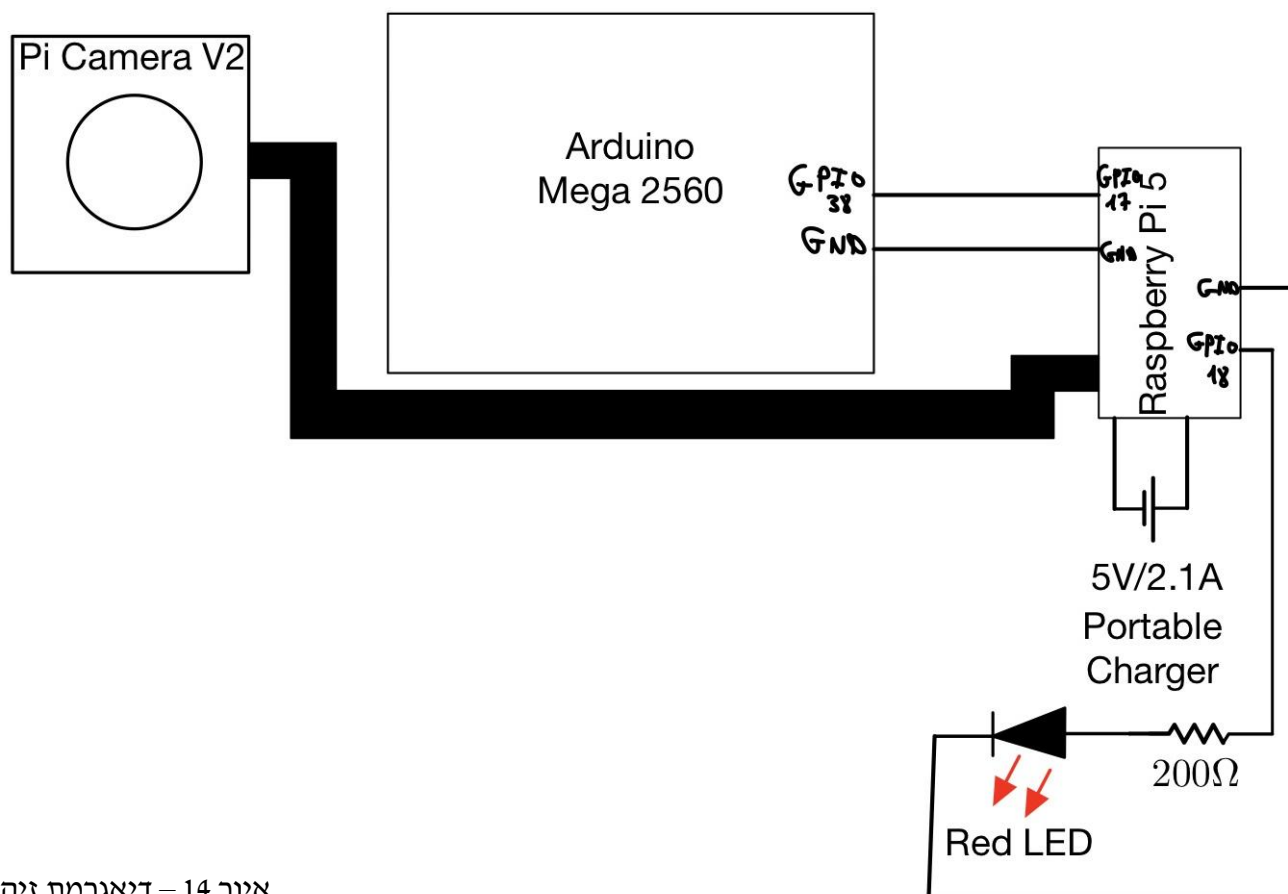
חיישן LiDAR Lite V3:

בנוסף לחיישנים האולטרה-סוניים, המערכת כוללת חיישן LiDAR Lite V3 למדידת מרחק⁴ המבוסס על לייזר המאפשר מדידות מהירות ומדויקות בטווחים ארוכים של עד כ-40 מטרים. החיישן מחובר באמצעות תקשורת I²C, המחובר לפיינים SDA ו-SCL (המהווים גם כפסיקות). קבל אלקטרוליטי בגודל 680µF מחובר בין פין ה-VCC וה-GND של ה-Lidar מהווה תוספת חשובה שמייצבת את אספקת המתח, מפחיתה רעש חשמלי, ומונעת ירידות מתח רגעיות שעלולות לפגוע ביציבות החיישן בעת הפעלה.

³ וראו נספח 2

⁴ וראו נספח 3

3.3.4.7 דיאגרמת מכלול זיהוי האדם:



איור 14 – דיאגרמת זיהוי האדם

מכלול זיהוי האדם אחראי על מתן אינדיקציה ועצירה במידה וזוהו אנשים במצלמת ה-Pi Camera V2 (CM). המכלול מבוסס ברובו על בקר ה-RP5 אשר מבצע עיבוד תמונה מתקדם באמצעות אלגוריתמים של ראייה ממוחשבת, ובפרט באמצעות אלגוריתם YOLO לזיהוי בזמן אמת של בני אדם בפריים ומצלמת Pi Camera V2 לזיהוי חזותי של אדם. כלל הרכיבים הנ"ל מוזנים ממטען נייד בעל הפרמטרים 5V/2.1A. ה-Arduino מקושר אל ה-RP5 באמצעות פין GPIO 38, אשר משמש כאות בקרה לעצירת תנועת המנועים ברכב – זאת עד אשר האדם יוצא מהפריים, והזיהוי החזותי מסתיים. בנוסף, בעת זיהוי אדם במצלמה נוכל לראות הידלקות של נורת LED אדומה, המסמלת על סכנה ועצירת תנועת הרכב.

תצורה זו יוצרת מערכת חכמה, שבה ה-RP5 מזהה נותן אינדיקציה למשתמש כי זוהו אדם במצלמה, תוך כדי שמירה על אינטראקציה הדוקה עם בקר ה-Arduino, האחראי על תגובת הרכב בהתאם למצב הזיהוי.

3.4 עיקרון פעולת המערכת:

המערכת היא רכב אוטונומי מתקדם מבוססת על בקר Arduino Mega 2560 והמחשב RP5, שיכול לפעול בשני מצבים מרכזיים - מצב ידני ומצב אוטונומי חכם.

מצב ידני:

במצב הידני, המשתמש שולט ברכב מרחוק דרך תקשורת Bluetooth באמצעות פקודות מגוונות כגון תנועה קדימה/אחורה/ימין/שמאלה וכן תנועות אלכסוניות. מערכת חיישני המרחק - הכוללת חיישן Lidar במרכז לדיוק גבוה וחיישני US בצדדים שמתקשרים דרך מקטעי קוד ומופעלים על ידי פסיקות, מספקת הגנה רב-שכבתית מפני התנגשויות באמצעות ניטור רציף ועצירה אוטומטית מיידית כשמתגלה מכשול במרחק המוגדר (30 ס"מ במצב ידני, 50 ס"מ במצב אוטונומי).

מצב אוטונומי:

במצב האוטונומי, המשתמש בוחר יעד מתוך רשימה של ארבעה מיקומים מוגדרים מראש והרכב מבצע ניווט בעזרת GPS תוך שימוש במצפן MPU-9250/6500 לחישוב כיוון מדויק. המצב האוטונומי כולל גם מכונית מצבים (state machine) מתוחכמת שכוללת ארבעה מצבים:

- מצב Navigating לניווט רגיל אל היעד שהוגדר.
- מצב Obstacle Detected לזיהוי מכשולים במסלול הנסיעה. Maneuvering
- מצב Maneuvering לביצוע תמרונים חכמים סביב עצמים חוסמים שזוהו בדרך.
- מצב Person Detected לזיהוי אדם שנראה בפריים המצלמה. במצב זה תנועת הרכב תיעצר עד אשר האדם יצא מפריים המצלמה.

האלגוריתם לעקיפת מכשולים כולל ניתוח חכם של כל שלושת חיישני המרחק לבחירת הכיוון האופטימלי להתחמקות, ביצוע תמרונים חלקים בזמן אמת, וחזרה אוטומטית לניווט רגיל כשהמסלול מתפנה. המערכת כוללת גם טיימר מבוסס פסיקה לעדכון קואורדינטות ה-GPS כל 5 שניות. בנוסף לכל זה, המערכת משולבת עם RP5 המצויד במצלמה ומערכת זיהוי אדם מבוססת על אלגוריתם YOLO - רשת קונבולוציונית לזיהוי מהיר של אובייקטים שונים. כאשר מזוהה אדם בפריים המצלמה, הרכב נעצר מיידית ונשאר במקום למטרות בטיחות וביטחון עד שהאדם יוצא מטווח הראייה. בנוסף, ניתנת למשתמש אינדיקציה בעזרת נורת LED אדומה לזיהוי אדם במצלמה. בעת הגעה אל מרחק הסף מן היעד (15 מטרים) הרכב יעצור את תנועתו ויתחיל להפעיל את הזמזום ללא הפסקה.



4. מטלות הנדסיות:

4.1 מטלות מכלול תנועה:

- ✓ חיווט והתקנת 4 מנועי DC ל-Motor Driver Shield.
- ✓ תכנות בקרת מנועים לתנועות בסיסיות ומתקדמות.
- ✓ התקנת נוריות LED לחיווי פנייה וצופר.
- ✓ כיול מהירויות מנועים לתנועה מאוזנת.
- ✓ בדיקת דיוק ויציבות תנועה בכל הכיוונים.

4.2 מטלות מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים:

- ✓ פיתוח ארכיטקטורה מבוססת OOP.
- ✓ תכנות בקרת מצבי פעולה (ידני/אוטונומי)
- ✓ יישום מכונית מצבים במצב אוטומטי.
- ✓ תכנות מערכת פסיקות לחיישני מרחק ופסיקת Timer1 לקריאת נתוני GPS.
- ✓ פיתוח אלגוריתמיקה לקריאה ועיבוד נתוני החיישנים.

4.3 מטלות מכלול התקשורת:

- ✓ התקנה וקונפיגורציה של מודול בלוטות' HC-06.
- ✓ פיתוח פרוטוקול פקודות Bluetooth לבקרה ידנית ולמעבר למצב אוטומטי.
- ✓ בדיקת טווח ואמינות התקשורת.

4.4 מטלות מכלול הניווט:

- ✓ התקנה וכיול מודול GPS.
- ✓ התקנה וכיול מצפן MPU-9250/6500.
- ✓ פיתוח אלגוריתמיקת חישובים לניווט.
- ✓ תכנות התקדמות לנקודות יעד מוגדרות מראש.
- ✓ מימוש אלגוריתמיקת תיקון סטיות מגנטיות.
- ✓ יישום אלגוריתם הגעה ליעד, עצירה והתראה בעזרת הזמזם.
- ✓ פיתוח ניווט גיבוי (Last Known Location).



4.5 מטלות מכלול התמרון:

- ✓ פיתוח אלגוריתם התחמקות ממכשולים.
- ✓ תכנות ניתוח מצב סביבה (שמאל/מרכז/ימין).
- ✓ יישום בחירת כיוון התחמקות ותמרון אופטימלי.
- ✓ מימוש תמרונים חלקים (Smooth) סביב מכשולים.
- ✓ תכנות מנגנון חזרה לניווט רגיל.
- ✓ פיתוח תמרוני חירום למצבי חירום.
- ✓ בדיקת יעילות התמרונים בתרחישים מגוונים.

4.6 מטלות מכלול זיהוי האדם:

- ✓ התקנת הקונפיגורציות המתאימות והמצלמה ב-RP5.
- ✓ צריבה ושימוש אלגוריתם YOLO לזיהוי אובייקטים ב-RP5.
- ✓ אינטגרציה עם מערכת עצירת חירום.
- ✓ אופטימיזציה ובדיקות בביצועי זמן אמת.

5. תכנון אב:

5.1 סביבות הפיתוח:

- RP5 - VS Code
- Arduino IDE

5.2 תכן חומרה:

5.2.1 :Arduino Mega 2560

השימוש ב-Arduino Mega 2560 לבקרת הרכב האוטונומי מספק יתרונות קריטיים הודות למספר גבוה של פניי I/O דיגיטליים ואנלוגיים המאפשרים חיבור של מספר מנועים, חיישנים ומודולי תקשורת שונים. בנוסף, לבקר ישנם 4 יציאות לתקשורת UART להם מחוברים רכיבי GPS, ו-Bluetooth. הבקר בעל 256KB של זיכרון Flash המספיק לקוד מורכב עם אלגוריתמי ניווט, יכולות זמן אמת תוך שימוש בפסיקות שונות לבקרה מדויקת של מנועים וחיישנים. כל אלה, הופכים את הבקר לבחירה אידיאלית למערכת האוטונומית שבנינו, הדורשת ביצועי זמן אמת, חיבורי חומרה מרובים ויציבות.

:Raspberry Pi 5 5.2.2

בבקר-מחשב זה נעשה שימוש לטובת עיבוד תמונה המתקבלת מן המצלמה, זיהוי של אדם בפריים ושליחת אותות לטובת עצירת תנועת הרכב.

השימוש ב-RP5 לזיהוי אדם מביא יתרונות משמעותיים הודות למעבד החזק וה-GPU המובנה שמאפשרים עיבוד תמונה בזמן אמת, תמיכה מלאה באלגוריתמי זיהוי אדם מוכחים, חיבור מצלמה איכותי דרך יציאת CSI, זיכרון RAM של 8GB המאפשר עיבוד מקבילי מהיר - כל זאת תוך חיסכון במשאבי ה-Arduino שיכול להתמקד אך ורק בבקרת תנועה וניווט ללא עומס חישובי נוסף.

:L293D Motor Shield 5.2.3

מודול זה נועד לשלוט במגוון מנועים חשמליים, ומאפשר הפעלה מדויקת של מהירות וכיוון סיבוב. הוא מתחבר ישירות לבקר ה-Arduino ללא צורך ברכיבי תיווך נוספים, ומספק זרם מתאים להפעלת המנועים כך שהבקר עצמו אינו נדרש לשאת בעומס החשמלי הגבוה. השליטה מתבצעת באמצעות אותות PWM לווטיות המהירות, ובאמצעות פקודות דיגיטליות המגדירות את כיוון הסיבוב של כל מנוע. המודול תומך בחיבור של עד ארבעה מנועי DC או שני SM מה שהופך אותו לפתרון אידאלי עבור פרויקטים רובוטיים או מערכות ניידות הדורשות שליטה נפרדת על כל מנוע או גלגל. בנוסף, המודול כולל מנגנוני הגנה מובנים – כגון הגנה מפני זרם יתר – המבטיחים פעולה בטוחה ואמינה לאורך זמן, ומשתלב בקלות עם מערכות המבוססות על Arduino.

:Pi Camera V2 5.2.4

רכיב זה הוא מודול המצלמה הרשמי של Raspberry Pi המתחבר ישירות למחשב ה-RP5 באמצעות ממשק ה-CSI דרך כבל סרט בן 15 פינים.

המאפיינים הטכניים של המצלמה כוללים:

- חיישן Sony IMX219 ברזולוציה של 8MP.
 - תמיכה בצילום וידאו באיכויות שונות:
 - 1080p בקצב של 30fps
 - 720p בקצב של 60fps
 - 640x480 בקצב של 90fps
 - תאימות מלאה עם מגוון ספריות תוכנה לעיבוד תמונה, מה שהופך אותה לבחירה נפוצה בפרויקטים של ראייה ממוחשבת וזיהוי עצמים.
- הממשק הישיר עם ה-RP5 מאפשר אינטגרציה פשוטה ויעילה במערכות מבוססות עיבוד תמונה בזמן אמת.



5.2.5 HC-06:

רכיב תקשורת Bluetooth פשוט ויעיל, המשמש לחיבור אלחוטי בין מיקרו-בקרים למכשירים חיצוניים כמו טלפונים חכמים, מחשבים או בקרים נוספים. המודול פועל באמצעות תקשורת טורית (UART) ומשדר/מקבל נתונים בפורמט טקסטואלי, מה שהופך אותו לנוח במיוחד לשילוב בפרויקטים משובצים. השליטה במודול מתבצעת על ידי שליחת פקודות פשוטות, כאשר ניתן להגדיר קצב שידור (Baud Rate) ופרמטרים נוספים לפי דרישות המערכת. בפרויקט המכונת האוטונומית, מודול ה-Bluetooth מאפשר למשתמש לשלוט בנסיעת המכונת ולהחליף בין מצב ידני למצב אוטומטי, תוך שליחת פקודות תנועה בצורה פשוטה ונוחה.

5.2.6 (US) HC-SR04:

חיישן למדידת מרחק, הפועל באמצעות גלי קול בתדר גבוה. החיישן שולח פולס לעבר אובייקט, וברגע שהגל פוגע במשטח כלשהו הוא מוחזר חזרה לחיישן. על ידי חישוב זמן החזרה של הגל, ניתן לקבוע את המרחק המדויק בין החיישן לאובייקט. בפרויקט זה, החיישן מאפשר לזהות מכשולים בסביבתה של המכונת. השימוש בחיישן זה משפר את יכולות ההתמצאות שלה בסביבה ומאפשר תנועה בטוחה ויעילה יותר.

5.2.7 Lidar Lite V3:

חיישן מדידת מרחק מדויק במיוחד המבוסס על טכנולוגיית לייזר. בניגוד לחיישני US, חיישן זה משתמש בקרן לייזר למדידת הזמן שעובר עד להחזרת האות מהעצם שמולו, ובכך מחשב את המרחק לפי מהירות האור. הוא פועל בטווח של עד 40 מטרים ומתאים במיוחד ליישומים הדורשים דיוק גבוה בטווחים ארוכים. בפרויקט המכונת האוטונומית, החיישן ממוקם בחזית הרכב ומשמש כחיישן עיקרי לזיהוי מכשולים במרחק רב, מה שמאפשר תגובה מוקדמת ותכנון מסלול בטוח ויעיל.

5.2.8 MPU-9250/6500:

חיישן אינרציה מתקדם הכולל ג'ירוסקופ, מד תאוצה, ומגנטומטר מובנה. בפרויקט זה השתמשנו רק במגנטומטר המובנה לטובת מדידה מדויקת הכיוון המגנטי, מה שהופך את החיישן למושלם לצורכי ניווט. החיישן מתקשר עם הבקר דרך פרוטוקול I²C ונמצא בשימוש נרחב בפרויקטים של רובוטיקה, רחפנים וניווט אוטונומי. בפרויקט שלנו, החיישן משמש לקביעת הכיוון (heading) של הרכב בעזרת עיבוד ממוצע של קריאות המגנטומטר, דבר המאפשר ניווט והתקדמות מדויקת יותר לעבר היעד.



5.2.9 NEO-6M:

מקלט GPS קומפקטי ואמין המאפשר קבלת נתוני מיקום בזמן אמת מכל מקום שבו יש קליטה ללווייני GPS. המודול מתקשר עם הבקר באמצעות תקשורת UART ומשדר נתונים בפורמט NMEA הכולל קואורדינטות, מהירות, גובה, זמן UTC⁵ ועוד. המידע מעובד בעזרת ספריות תוכנה מובנות אשר ממירות את המידע למשתנים נוחים לשימוש ולעיבוד. הדיוק של המודול הוא כ-2.5 מטרים בתנאים אופטימליים. בפרויקט הרכב האוטונומי, מודול ה-GPS משמש לקביעת מיקום גאוגרפי בזמן אמת, ומאפשר לרכב לנווט באופן עצמאי לעבר יעדים מוגדרים מראש.

5.3 תכן תוכנה:

כתיבת הקוד למכלולים השונים, נעשתה תוך חלוקתו למודולים ולקבצים שונים כך שכל אחד מהם אחראי על תחום מסוים.
להלן רשימת הקבצים:

:Arduino Mega 2560

- Autonomous_Car.ino
- CarMovment.cpp/h
- CarState.cpp/h
- DistanceSensors.cpp/h
- Config.h

:Raspberry Pi 5

- YOLO.py

:Config.h

קובץ זה כולל הגדרות ותצורות עבור מערכת הרכב האוטונומי, ומטרתו לאגד במקום אחד את כל פרמטרים הקבועים הדרושים לפעולה תקינה. כולל בין היתר הגדרות פינים, ניווט, יעדים, מהירויות מצבים שונים ועוד.

:DistanceSensors.cpp/h

אחראית על קריאת חיישני המרחק של הרכב האוטונומי ונקיטת פעולה במקרה של סכנת התנגשות. היא כוללת: שלושה חיישני מרחק שונים, התאמה למצבי פעולה שונים (ידיני או אוטונומי), מצפן דיגיטלי תוך שימוש בפסיקות שונות לזיהוי מדויק של זמן ההד החוזר מן החיישנים.

Universal Time Coordinated⁵



:CarState.cpp/h

אחראית על ניהול מצבי הפעולה של הרכב האוטונומי (ידני ואוטומטי), תפעול תקשורת, קבלת יעד מיקום, ותגובה לפקודות מהמשתמש.

:CarMovment.cpp/h

אחראית על הפעלת מנועי הרכב, בקרת תנועה, איתור מכשולים והתחמקות, ניווט מבוסס GPS והפעלת נורות כיוון. המחלקה מהווה את ליבת התנועה של הרכב האוטונומי. היכולות המרכזיות כוללות בין היתר שליטה על המנועים, גילוי והתמודדות עם מכשולים וניווט אוטונומי.

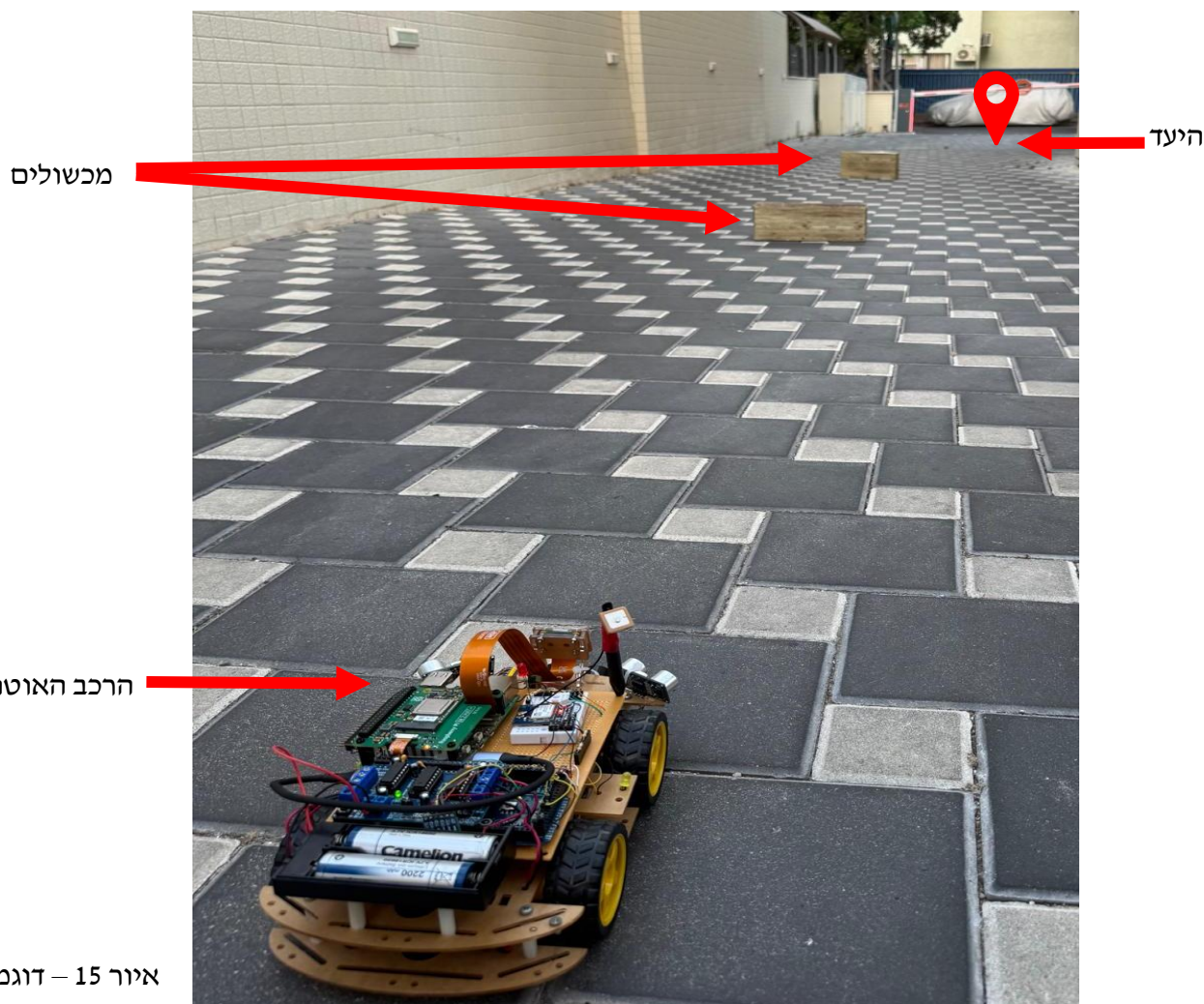
:Autonomous Car.ino

קובץ השלד הראשי של תוכנית הרכב האוטונומי ומרכז את הפעלת כל המודולים בפרויקט. הקובץ מבצע את הפעולות הבאות: אתחול רכיבים שונים, בחירת יעד ולולאת ריצה ראשית.

:YOLO.py

קובץ התוכנה ב-RP5 אשר אחראי על הרצת אלגוריתם הזיהוי (YOLO) וזיהוי אדם במצלמה, תוך שליחת אות עצירה לרכב והדלקת נורת LED אדומה לאזהרה.

6. סימולציות:



איור 15 – דוגמה למסלול נסיעה

באיור 15 ניתן לראות מסלול לדוגמה של נסיעת הרכב האוטונומי.

לאחר שנפעיל את הרכב ונתחבר אליו דרך תקשורת ה-Bluetooth עם האפליקציה הייעודית, יהיה לנו מספר חיווי לתו שנשלח לרכב

אפשרויות להמשך פעולה:



איור 16 – האפליקציה לשליטה ברכב

מבדיקה שנעשתה בשימוש הרכב במצב ידני, פעולות הנסיעה עבדו כמצופה (פנייה ימינה ושמאלה, נסיעה קדימה ואחורה ושילוב של פעולות אלה). בנוסף, גם פעולת הצופר עבדה. כאשר ניסינו להתקדם במצב הידני אל עבר המכשול הראשון, ראינו כי אכן הרכב נעצר מספר ס"מ לפניו ולא היה ניתן להמשיך בנסיעה קדימה (גם לא דרך פעולות המשלבות נסיעה קדימה). בכדי להתחמק מהמכשול במצב הידני, היה עליו לפנות לאחד מן הצדדים או לנסוע אחורה. החזרנו את הרכב למיקומו ההתחלתי ועברנו למצב אוטונומי (שליחת תו 'X'). לאחר מספר שניות, ראינו שהרכב מתחיל להתקדם ישר – אל עבר היעד שהוגדר לו (מתוך תפריט בחירת היעדים, נבחר יעד מס' 1). בעת ההתקרבות אל המכשול, הרכב עצר את תנועתו ולאחר זמן קצר החליט לפנות ימינה. לאחר פנייתו ימינה והתקדמותו כמטר אחד, הרכב עצר בשנית את תנועתו לטובת קבלת נתוני GPS עדכניים. לאחר מכן, שינה חזרה את כיוונו אל עבר היעד והתקדם לעברו. בעת התקדמותו, פגש הרכב המכשול השני ולאחר תמרון קצר, הצליח לעבור גם אותו. לאחר מכן, רצינו לבדוק כיצד הרכב מגיב לזיהוי של אדם במהלך הנסיעה. קירבנו את ידינו לפריים של המצלמה והרכב עצר את תנועתו באופן מיידי, תוך הדלקת נורת LED אדומה לאזהרה – דבר אשר אכן ציפינו ורצינו שיקרה. לאחר הסרת היד, הנורה כבתה והרכב המשיך בנסיעתו אל עבר היעד. כאשר הגיע אל היעד המסומן, עצר הרכב את תנועתו והתחיל לצפצף באופן רציף – דבר המעיד על הגעה אל היעד. דוגמה נוספת לפעילותו של הרכב במצב האוטונומי ניתן לראות בנספח 9.6.

7. ניהול הפרויקט:

7.1 בעיות ואתגרים הנדסיים:

1. אובדן אות GPS והמשכיות בניווט:

לעיתים, אות ה-GPS נקטע, דבר שגרם לרכב לאבד את יכולת הניווט ולעצור את פעולתו במצב אוטונומי. **הפתרון:** יישום מערכת ניווט היברידית שמשלבת את נתוני ה-GPS האחרונים שנשמרו במשתנים, יחד עם כיוון המצפן מה-IMU לצורך ניווט אינרציאלי. הוספנו מנגנון עדכון GPS מבוסס טיימר ויצרנו פונקציה המאפשרת המשך ניווט גם בהיעדר נתוני GPS עדכניים. בנוסף, יישמנו בדיקת עדכניות לנתוני ה-GPS כל 5 שניות כדי לוודא שהמידע עדכני ואמין לפני השימוש בו.

2. עומס חישובי כבד על בקר ה-Arduino:

קריאת חיישני המרחק דרשה מבקר ה-Arduino להמתין להחזרי הד החיישנים, דבר אשר חסם את הלולאה הראשית וגרם לעיכובים בתגובות למצבים קריטיים כמו עצירת חירום או פקודות ניווט. כתוצאה מכך, ביצועי המערכת נפגעו וזוהו מכשולים באיחור. **הפתרון:** יישום פסיקות לקריאת המרחקים אשר קולטות את זמני ההדים באופן אוטומטי, ללא חסימה של המעבד הראשי. הפסיקות מטפלות בכל חישובי הזמנים ברקע, ומאפשרות לבקר להתרכז בבקרת מנועים, לוגיקת ניווט, ועיבוד תקשורת. גישה זו הפחיתה את העומס מחיישנים מה שהביא לתגובות מהירות יותר לעצירת חירום ותפקוד חלק בזמן אמת תוך שמירה על ניטור רציף של מכשולים.

3. הפרעות אלקטרו-מגנטיות EMI באינטגרציה:

בעת האינטגרציה בין מכלול זיהוי האדם לשאר המכלולים, נוכחנו לגלות כי ישנם גלים אלקטרו-מגנטיים הנפלטים מן ה-RP5 ומונעים קליטת GPS בעזרת האנטנה אשר הוצבה בסמוך.
הפתרון: הרכבת האנטנה ממקור ההפרעה כמה שניתן, כך שיצמצם משמעותית את ההפרעה לקליטת אות ה-GPS. לאחר שביצענו זאת, אות ה-GPS נקלט כמצופה.

4. כיוול המצפן והפרעות מגנטיות:

לעיתים, מצפן ה-MPU-9250/6500 סיפק קריאות כיוון לא עקביות ובעלות סטייה מסוימת, כתוצאה מהפרעות מגנטיות שמקורן במנועים, ובשדות מגנטיים מהסביבה – מה שהפך את הניווט המדויק לקשה יותר.
הפתרון: יישמנו אלגוריתם מיצוע המבוסס על מרכיבי סינוס וקוסינוס. בנוסף, בוצע תיקון של סטיית מגנטיות בהתאם למיקום הגיאוגרפי. בנוסף הרכיב הוצב במרחק מה מהמנועים.
כמו כן, מימשנו מערכת מיצוע מרובה-דגימות, הכוללת 10 קריאות עם השהייה בין כל קריאה, לצורך סינון רעש מגנטי. פעולות אלו שיפרו משמעותית את ניווט הרכב האוטונומי.

7.2 עמידה בדרישות:

מטלות	גורם מבצע
1	כתיבת הצעת פרויקט
2	חקירה של נושאים רלוונטיים לפרויקט
3	ביצוע מחקר וביסוס הנחות עבור רכיבים הדרושים לבניית הרכב הנ"ל
4	כתיבת אלגוריתמיקה לזיהוי אובייקטים שונים ועיבוד התמונה
5	תכן מכלול הבקרה ועיבוד הנתונים
6	תכן מכלול התנועה
7	תכן מכלול התקשורת
8	תכן מכלול הניווט
9	תכן מכלול התמרון
10	תכן מכלול זיהוי האדם
11	אינטגרציה, בדיקות ותיקון תקלות בכלל המכלולים
12	כתיבת ספר פרויקט

טבלה 4 – עמידה בדרישות הפרויקט

7.3 הצעות לשיפור:

1. תכנון מסלול דינמי עם אלגוריתם A*:

ניתן להחליף את מנגנון הניווט וההימנעות ממכשולים הקיים בפרויקט במערכת תכנון מסלול מתקדמת, המבוססת על אלגוריתמים כמו A* או RRT⁶. אלגוריתמים אלה יאפשרו יצירת מסלולים אופטימליים בסביבה עם שדות מכשולים מורכבים, תכנון מהלכים מרובי-שלב מראש, וניווט במעברים צרים. המערכת תוכל לבנות מפה בזמן אמת ולבצע תכנון מחודש של המסלול האופטימלי באופן רציף עד להגעה ליעד.

2. סיווג מכשולים מבוסס למידת מכונה:

ניתן לשדרג את מכלול גילוי המכשולים המבוסס על מרחק, למערכת סיווג עצמים חכמה באמצעות רשת נוירונים (כגון MobileNet) על גבי RP5. שדרוג זה יאפשר לרכב להבחין בין סוגים שונים של מכשולים (אנשים, רכבים, עצמים ניידים, בעלי חיים) ולהגיב בהתאם – לדוגמה, לנקוט משנה זהירות ליד אנשים, לעקוב אחר רכבים נעים, או להתעלם מעצמים קטנים ניידים שאינם מהווים איום ממשי.

3. הוספת מקודדי גלגלים ומערכת אודומטריה⁷:

התקנת מקודדים סיבוביים על כל גלגל למדידת המרחק המדויק ומהירות הסיבוב של הגלגלים. תוספת חומרה זו תאפשר ניווט באמצעות אינרציה, תשפר את דיוק הסיבובים, ותשמש כגיבוי לניווט כאשר קליטת ה-GPS נכשלת.

4. מערכת זיהוי התנגשויות באמצעות חיישני לחץ:

התקנת פגושים רגישים ללחץ סביב היקף הרכב, תוך שימוש במיקרו-מתגים או חיישני לחץ. מערכת זו מהווה שכבת בטיחות אחרונה לזיהוי מגע פיזי, מאפשרת ניווט עדין במעברים צרים, ויכולה להפעיל עצירה מיידית במקרה חירום כאשר חיישנים אחרים אינם מזהים מכשולים קרובים במיוחד.

5. מערך נורות LED לתצוגת מצב ותקשורת:

ניתן ליישם מערכת נורות LED מקיפה הכוללת נורות RGB עבור מחווי מצב של כל מכלול. לדוגמה, קבלת קואורדינטות נוכחיות מרכיב ה-GPS, מצב חיישני המרחק, רמת סוללה, מצב פעולה נוכחי ואף תבניות תקשורת בסיסיות שיכולות לסמן כוונות לאנשים בסביבה או לרכבים אוטונומיים אחרים.

⁶ Rapidly-exploring Random Tree – אלגוריתם ניווט
⁷ שיטה לחישוב מיקום ומהירות של רכב או רובוט על סמך מדידות פנימיות של תנועה, בעיקר מסיבובי הגלגלים.



8. ביבליוגרפיה וסימוכין:

- [1] [Arduino Mega 2560 Pinout](#)
- [2] [Arduino Mega 2560 Datasheet](#)
- [3] [Raspberry Pi 5 Pinout](#)
- [4] [Raspberry Pi 5 Datasheet](#)
- [5] [YOLO Object Detection on the Raspberry Pi 5 AI HAT](#)
- [6] [Lidar Lite V3 Datasheet](#)
- [7] [L293D Motor Shield for Arduino](#)
- [8] [HC-SR04 Datasheet](#)
- [9] [MPU-9250/6500 Datasheet](#)
- [10] [Pi Camera V2 Datasheet](#)
- [11] [Neo 6M GPS Module Datasheet](#)
- [12] [HC-06 Datasheet](#)

9. נספחים:

9.1 נספח 1 – נוסחת Haversine:

נוסחת Haversine מחשבת את המרחק בין שתי נקודות על פני כדור הארץ לפי הקואורדינטות הגלובליות שלהן (קווי אורך ורוחב). הנוסחה מניחה שכדור הארץ הוא כדורי - קירוב טוב למרבית המטרות המעשיות.

להלן הנוסחה:

$$\begin{cases} a = \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\varphi_1) + \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ c = 2 \operatorname{atan2}\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \\ d = R \cdot c \end{cases}$$

כאשר:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1, \varphi_2 &- \text{קווי הרוחב של שתי הנקודות (ברדיאנים).} \\ \Delta\varphi &- \text{ההפרש בין קווי הרוחב.} \\ \Delta\lambda &- \text{ההפרש בין קווי האורך.} \\ a &- \text{"המרחק הזוויתי המרובע" בין שתי נקודות על פני כדור הארץ, בהתאם להבדלים בקווי רוחב ואורך.} \\ c &- \text{הזווית המרכזית בין שתי נקודות על פני כדור הארץ (ברדיאנים).} \\ \operatorname{atan2} &- \text{פונקציה טריגונומטרית שמחזירה את הזווית (ברדיאנים) בין ציר ה-x לוקטור המוגדר על ידי זוג ערכים (x,y).} \\ R &- \text{רדיוס כדה"א, כ-6371 ק"מ.} \\ d &- \text{המרחק הסופי בין שתי הנקודות.} \end{aligned} \right\}$$

שיטה זו שימושית במיוחד בניווט, מערכות GPS ויישומים גיאוגרפיים הדורשים חישוב מרחק מדויק בין מיקומים על פני הגלובוס.

9.2 נספח 2 – נוסחת חישוב המרחק בחיישן (US) HC-SR04:

חיישן ה-US HC-SR04 מחשב את המרחק על סמך הזמן שעובר בין שליחת פולס קולי לבין קבלת ההחזר שלו מהעצם שנמצא מולו. הנוסחה מבוססת על מהירות הקול באוויר, כדלקמן: $\frac{Time \cdot c}{2} = d$

כאשר:

$$\left. \begin{aligned} Time &- \text{הזמן שלוקח לפולס להגיע אל העצם ולחזור (נמדד במיקרו-שניות, } \mu s) \\ c &- \text{מהירות הקול באוויר, בערך 343 מטרים בשנייה (0.0343 ס"מ למיקרו-שנייה) בטמפרטורת החדר.} \\ d &- \text{המרחק הנמדד מן העצם.} \end{aligned} \right\}$$

9.3 נספח 3 – נוסחת חישוב המרחק בחיישן Lidar Lite V3:

בדומה לחיישן ה-US, חיישן ה-LiDAR מחשב את המרחק על סמך הזמן שעובר בין שליחת פולס לייזר לבין קבלת ההחזר מהעצם. גם כאן המרחק מחושב לפי זמן המעבר של הפולס הלוח וחזור, אך בניגוד ל-US שמשתמש במהירות הקול, חיישן ה-LiDAR משתמש במהירות האור, שהיא כ-300,000 ק"מ לשנייה, מה שמאפשר מדידה מדויקת ומהירה יותר בטווחים גדולים.



9.4 נספח 4 – הצעת הפרויקט:

להלן קישור להצעת הפרויקט – [Autonomous Car](#).

9.5 נספח 5 – קודים:

להלן קישור לכלל הקודים שהשתמשנו בפרויקט זה – [Codes](#).

9.6 נספח 6 – סרטון הדגמה:

להלן קישור לסרטון הדגמה של פעולת המערכת – [סרטון](#).