



פרויקט טורון – רובוט מגן בטכנולוגיות AI

המכללה האקדמית להנדסה בראודה כרמייאל

תפקיד	שם ומשפחה	תאריך
סטודנט 1	בשارة חביב	30/9/2025
מנחה אקדמי	אלחנדרו גוליחוב	30/9/2025
פרנסיס עבוד	פרנסיס עבוד	30/9/2025

30.09.2025 ח' בתשרי תשפ"ו

הוגש לשם מילוי תפקיד של הדרישות לקבלת התואר

"בוגר במדעים B.Sc. בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה"

תקציר

הפרויקט בוצע במסגרת תכנן הנדסי פנימי (פרויקט גמר) ב"מכללה האקדמית להנדסה ברואדה" כרמייאל. מטרת הפרויקט היא פיתוח מערכת רובוטית חכמה ואוטונומית שמטרתה זיהוי בזמן אמת של חפצים חדשים וחומרני נפץ, טיפול מרוחק באמצעות מערכת בקרה ייודית ומtran יכולת תגובה מהירה בסביבות צבאיות ואזרחיות כאחד.

המערכת מבוססת על שלב רכיבים מרכזיים הכוללים: שתי מצלמות; ייחדות עיבוד 5 Raspberry Pi 4, ESP32 ובקר Raspberry Pi 4; חיישן מרוחק וחישון צבע; תצוגת LCD של ה Raspberry Pi; מיקרופון חכם (עם AI) ורמקול; שימוש במבנה מלאכותית, במידה מכונה ובלמידה عمוקה; בניית אתר ייודאי לשילטה ובקרה על הרובוט; מבנה סולידי של הרובוט הכלול יידית (מניפולטור) ובקר ראשי להנעת מנועים, בקרה, הגנה וניהול כוח.

רעינו הפרויקט נולד מתוך הצורך להתמודד עם מצבים מסכני חיים, כגון יירוט טילים או זיהוי חפצים חשודים למרחב הציבורי או בארץ אויב. הצורך התהדר לאור אירועי הלחימה האחרונים, בהם נפגעו אזרחים וחיילים רבים מפצעות מירוטי טילים ומחשיפה לחומרני נפץ. למשל, מקרים נפוצים: חוף חדש בתחנות אוטובוס ששמים מחבלים; יירוט של טיל שנפל ומכיל חומר נפץ; וגם המטרה להציג חי החילים שנכנסים לשטחי אויב ונפגעים ממוקשים מוטמנים מתחת לפני הקרקע או ממטען המושגים/נזרקים לעברם כמו ירי מרכיב כתף.

מקרים של פגיעה גורמי רפואי וביתוחן בישראל:

נפגעים רבים נגרמו לא רק כתוצאה מפצעות ישירות של טילים, אלא גם משברי מירוט שנפלו על הקרקע לאחר יירוט, ולא התרחש בהם פיצוץ מיידי. מאז תחילת המלחמה الأخيرة (אוקטובר 2023), נפצעו מאות עד אלפי בני אדם מסווג זה של פגיעות, בהן עשרות במצב קשה, כאשר חלק מהנפגעים כתוצאה משברי מירוט שעלו מאז באופן מתרמשך נפגעו מפצעות אינטנסיביות ברחבי הארץ. מקרים אלה ממחישים היטב את הסיכון הכספי: גם כאשר מערכת היירוט פוגעת במטרה, שברי היירוט עצם עלולים להפוך ליום מיידי על חייהם של אזרחים — במיוחד במקרים פיזיים קרוב.

גם במהלך כניסה כוחות אויב מתקדים מקרים שבהם מטענים מוטמנים מתפוצצים בעת מגע ישיר עם הכוחות, ולעיתים מטענים או חלקי פצצות אף נזרים לעברם — אירופים אלה גרמו לנפגעים ולנפילות של לוחמים בשטח לחייהם כגון רפיח. פרסומים מקומיים תיארו תקריות פיצוץ מטען שהרמו להרוגים ופצועים בקרב כוחות בשטח, ומדגישים את הסיכון הגבוה בפעילות שתלויה בנסיבות אדם קרוב למקום.

גם בסביבה האזרחית ידועים מקרים שבהם שברי יירוט או חלקים בלתי מתפוצצים נופלים לשטח, ובהתקומות אניות בהם עלולה להתפרש הדליפה/הפיצוץ — משטרה ו גופים אזרחים זהווו מפני נגיעה בחלקים אלה וקרוו להימנע מפגע עד הגעת צוותי חבלה. במקרים אחרים הוצבו מטענים או בוצעו פיגועים בחילים ציבוריים (לדוגמה תחנות ורכבות), והאירועים האלה מדגישים את הצורך באמצעים שמונעים חשיפה ישירה של בני אדם לחומר נפץ.

המערכת מורכבת משלושה חלקים עיקריים:

- שרת בקרה מרכזי (Backend Control Server) – מבוססת על מחשב PC/Laptop עם FastAPI – מושפעת מושפעת על פорт 8000, מספק משקל ווב מבוסס React עם Virtual Joystick, תצוגת וידאו בזמן אמת, דשborad לטמירה ובקרי הוטקי. השרת מתקשר עם הרובוט באמצעות WebSocket ו-TCP/IP ומשמש כגשר בין המשתמשים למערכת הרובוט.

- מערכת זיהוי ובקרה אוטונומית בrobוט (Pi) – מבוססת Raspberry Pi 5 הפעלת פורטים 8001 ו-9080, המחבר לטלמה ייעודית רחבה-זווית, למיקרופון חכם ולמסך LCD להציג נתונים בזמן אמת. ה-Raspberry Pi 5 מקבל נתונים חיישנים ומדידה (ויזdeo ואודיו), מציג אותם על המסך ומפעיל את מנועי ההנעה והזרוע (מניפולטור) באמצעות יחידת בקרת מנוועים משולבת. בנוסף ה-Raspberry Pi מתקשר ב-Wi-Fi עם בקר ה-ESP32 (שמקבל נתונים חיישן צבע, חיישן אולטרה-איסוני ומספריל LED), ומושלב עמו רמקול לפידבק קול והפעלת התראות. כל הרכיבים הללו מושמשים לעיבוד נתונים באמצעות אלגוריתמי למידת מכונה מתקדמים כולל x8YOLOv8 לזיהוי חפצים מסווגים ולתגובה מבוקרת בזמן אמת.
- מערכת שליטה ובקרה מרוחק – מבוססת Raspberry Pi 4 עם מצלמה ומסך, המאפשרת ניטור, שליטה והתראה למרחק חיוני. המערכת פועלת בחדר שליטה ובקרה מרוחק ומספקת שליטה בrobוט באמצעות עיבוד תמונה ואלגוריתמי למידת מכונה המריצים על ה-Raspberry Pi. בנוסף, פותח אתר ייעודי המחבר לrobוט באמצעות שרת (SERVER) המאפשר תקשורת, בקרה ושליטה מרוחק על פעולות המערכת. השליטה מתבצעת או דרך האתר, או באמצעות זיהוי פעולות/מחוזות בטלמה; פעולות אלו מנוהחות על-ידי אלגוריתמי למידת המכונה כחלק מערכות ה-AI-ובהתבסס על תוצאות הניתוח שולח השרת פקודות robוט.
- מערכת אימונות ובדיקה – מבוססת ESP32 המחבר לחישון צבע וחישון מרחק; תפקיד חיישן הצבע הוא לאמת את התוצאות המתתקבלות מאלגוריתמי עיבוד המצלמה, וחישון המרחק מאפשר תנועה ללא התגשויות.

התקשורת בין מרכז הבקרה לrobוט תבוצע באמצעות רשת Wi-Fi של Raspberry Pi 5, ותמומנה בפרוטוקול TCP/IP עם WebSocket לתקשורת דו-כיוונית בזמן אמת לצורך שליטה בזמן אמת ואמינות בהעברת המידע. פרוטוקולי התקשרות תומכים גם בשילוח נתונים וידאו, אודיו והתראות בזמן אמת דרך WebSocket, כך שהמערכת מאפשרת לא רק זיהוי מהיר של חפצים חדשניים ומוסוגים, אלא גם טיפול מרוחק במטרה לצמצם סיכון ו לשמור על חיי אדם ושהrobוט לא יפגע בקהלות. בשלב זה של הפיתוח הושם הדגש על יכולת זיהוי מהימנה של חפצים מסווגים ושלוב אלגוריתמים של למידת מכונה מתקדמים. המשך פיתוח עתידי עשוי לכלול הרחבת המערכת נוספות כגון שילוב מצלמה תרמית, הרחבת יכולות ניוטע עצמאי ושילוב מגנוני תגובה פיזיים מתקדמים. בנוסף, ניתן לפרוס robוטים מסווג זה באזוריים שונים ולחברים לשירותי ממשק עם המשטורה שיקבלו נתונים על המפעיל (אזור או בעל תפקיד) כגון צילום פנים ובדיקה זהות, כך שהמערכת תהיה גמישה יותר ותאפשר לשוטרים ולעסקים בתחום להתמקד בנושאים חשובים אחרים.

תוכן עניינים

1.....	מבוא1
1.....	תיאור המערכת2
1.....	הגדירה פונקציונאלית2.1
2.....	מפרט פונקציונלי2.2
3.....	מפרט טכני2.3
3.....	טבלת פירוט מכוללי המערכת2.3.1
5.....	תרשים זרימה של המערכת הכללית2.3.2
5.....	עקרון הפעולה2.3.3
9.....	מטרות3
9.....	מטרות הנדסיות ברמות מפרט דרישות3.1.
10.....	ביצוע המטרות ע"י המתמחה3.2
10.....	שלבי תכנון3.2.1
11.....	תכנון – אב (Diagram Block)3.2.2
11.....	תכן מפורט (סכמה אלקטרוני)	.3.2.3
12.....	סימולציות3.2.4
13.....	מערך בדיקות3.2.5
14.....	لتכונות בקרים בלבד Flow Chart מפורט3.2.6
14.....	בעיות הנדסיות וריעונות שהסטודנט התמודד עמן3.3
15.....	סיכום ודיון4
15.....	סיכום4.1
15.....	להלן קבלת החלטות לאורך הפרויקט4.2
15.....	ניתוח בחירת פתרון והשואה לאפשרויות אחרות4.3
15.....	עמידה בדרישות4.4
16.....	תרומה בעבודתו של הסטודנט4.5
16.....	שינויים עתידיים דרושים4.6
17.....	מסקנות4.7
17.....	סיכום5
20.....	נספחים6

רשימת טבלאות

3.....	טבלה 1 : מפרט טכני.....
7.....	טבלה 2 : תמונה מצב המערכת בתחלת עבודת התחמזה.....
15.....	טבלה 3 : עמידה בדרישות.....

רשימת איורים

5.....	איור 1 : תמונה תרשימים זרימה של המערכת.....
7.....	איור 7-2 : תמונה מצב המערכת.....
8.....	איור 8-8 : תמונה מצב המערכת.....
11.....	איור 16 : תכנון – אב.....
11.....	איור 17 : סכמה אלקטטרונית של מערכת השליטה מרוחק.....
11.....	איור 18 : סכמה אלקטטרונית של מערכת הבדיקה והאימוט.....
12.....	איור 19 : סכמה אלקטטרונית של הרובוט.....
14.....	איור 20 : מערכת שליטה ברובוט – תרשימים זרימה מלא.....

רשימת קיצורים

קיצור	פירוש מלא
AI	Artificial Intelligence
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
ESP32	Espressif Systems Protocol 32-bit Microcontroller
PWM	Pulse Width Modulation
GPIO	General Purpose Input/Output
I²C	Inter-Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
HTTPS	HyperText Transfer Protocol Secure
WS	WebSocket
WSS	WebSocket Secure
RTSP	Real-Time Streaming Protocol
MJPEG	Motion JPEG
REST API	Representational State Transfer Application Programming Interface
LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light Emitting Diode
FPS	Frames Per Second

CPU	Central Processing Unit
RAM	Random Access Memory
DMP	Digital Motion Processor
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
IMU	Inertial Measurement Unit
MPU	Motion Processing Unit
PTZ	Pan Tilt Zoom
DOF	Degrees of Freedom
LGA	Land Grid Array
FSM	Finite State Machine
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
GUI	Graphical User Interface
API	Application Programming Interface
LAN	Local Area Network
OS	Operating System
SPI LCD	Serial Peripheral Interface Liquid Crystal Display
RGB	Red Green Blue
HAT	Hardware Attached on Top
V2	Version 2
LCD HAT	Liquid Crystal Display Hardware Attached on Top
RTOS	Real-Time Operating System

1. מבוא

במציאות הביטחונית והازורית בישראל קיימת חשיפה מתמדת לאוומי חומרី נפץ — מטילים ורקטות ועד מטענים וחפצים חשודים במרחב הציבורי; גם מערכות יירוט מונעות חלק מהפגיעה הישירה אך שברי יירוט או מטענים שלא התפוצצו עלולים להפוך לሞקים מסוכנים ולגרום לפצעים ואף להרוגים. נוסר לכך, השארת חפצים חשודים בתחנות ובמרכזים ציבוריים ודפוסי לחימה שבהם מטענים מוטמנים או נזרקים על חיילים בעת כנисה לשטחים אויביים מודיעין את הצורך הדוחף בפיתוח מערכות רובוטיות שיחילפו בני אדם בפעולות מסוכנות ויכמצמו סיכונים.

מתוך מציאות זו נולד פרויקט ה"פרוטקטורון" – רובוט מגן בטכנולוגיות AI. "מטרתו לפתח מערכת רובוטית חכמה ואוטונומית, הפעלת בשילוב של מצלמות, חיישנים וברזי עיבוד מתקדמים (Raspberry Pi 4, Pi 5 ו-ESP32), לצד יכולות בינה מלאכותית (AI) לעיבוד תמונה, ניתוח סיכונים וקבלת החלטות בזמן אמת. המערכת נבנתה כך שתיהיה נגישה גם לאנשים עם מוגבלות, באמצעות שימוש בתנועות או הצגת מספרים למצלמת Pi 4 לזרחי מחוות פשוטות, ובנוסף כוללת מיקרופון חכם עם AI לאינטראקציה קולית ושימוש באתר ייעודי לשיליטה ובקרה מרוחק.

ייחודה של המערכת טמון בכך שהיא מחליפה את הצורך לשולח חיילים או צוותים מסכני חיים לשטח עזין או מסוכן. במקום זאת, ניתן להפעיל את הרובוט לביצוע משימות כמו ניטור, סריקה, איתור חומרី נפץ ואף טיפול מבוקר בהםים – הן בשדה הקרב והן למרחב האזרחי. בכך המערכת מציעה פתרון חדשני,יעיל ואמין, המשלב טכנולוגיות מתקדמות לשימירה על ביטחון הציבור והכוחות בשטח.

חשוב לציין כי כיום קיימים רובוטים דומים בשימוש יחידות המשטרה, המבצע משימות חבלה ופינוי חפצים חשודים. עם זאת, רובוט זה דורש שליטה ידנית בזמן אמת, ואיןו עושה שימוש במבנה מלאכותית או במערכת בקרה חכמה מרוחק. מצב זה מציב מגבלות תפעוליות וסיכוןים גדולים יותר, שכן כל טעות אנו שאו חוסר תשומת לב עלולות לסכן חיי אדם. לכן, בפרויקט זה הוצעו שיפורים מהותיים – שילוב AI שליטה מרחוק – המאפשרים מענה משמעתי יותר ומאפשרים שמירה טובה יותר על חיי אדם, הן למרחב הצבאי והן למרחב האזרחי.

2. תיאור המערכת

2.1. הגדרה פונקציונאלית

מערכת רובוטית לאיתור, זיהוי וטיפול בחפצים חשודים, חומרី נפץ ושברי יירוט, באמצעות מצלמות, בקרים, חיישנים, תצוגות ובינה מלאכותית.

המערכת מאפשרת שתי דרכי שליטה:

- שליטה ידנית בזמן אמת – הפעלה ישירה על ידי המפעיל, באמצעות מיקרופון חכם, מערכת שליטה ידנית.
- שליטה ובקרה מרוחק – הפעלה באמצעות האתר שבנוינו, המחבר ל-server, או על-פי תנועות ספציפיות הנקלטות במצלמת ה-Pi; ניתן לצפות על התצוגה במהה שחרובוט רואה.

המערכת מבוססת על תקשורת מאובטחת בראשת SERVER מרכזי, תומכת בעיבוד נתונים בזמן אמת (וידאו, אודיו וחיישנים), וספקת התראות ויכולת תגובה מבוקרת במצבים מסוכנים לצורך שמירה על חיי אדם.

2.2. מפרט פונקציונלי

הרובוט :

- המערכת מבוססת על בקר 5 Raspberry Pi המחבר למודול מצלמה.
- יכולת קליטת נתונים וידאו מצלמה קדמית ורחבת זווית.
- יכולת קליטת נתונים אודיו ממייקרופון חכם לצורך זיהוי פקודות קוליות והתקנת תוגבות המערכת בהתאם.
- זיהוי וסריקה של חפצים חשודים בסביבה אזרחית או צבאית.
- עיבוד נתונים בזמן אמת באמצעות ייחודה Pi ואלגוריתמים של עיבוד תמונה וビינה מלאכותית.
- הערכת מצב והתראה למשתמש במקרה של חוץ חדש.
- אפשרות הפעלה ידנית בזמן אמת ע"י מפעיל אנושי (שליטה ישירה).
- תוגובה למצבים מסוכנים.
- הצגת נתונים בזמן אמת על גבי מסך הרובוט.
- שליחת עדכונים למרכז הבקרה באופן רציף והתרעות מיידיות (וידאו/תמונה/חישנים).
- זיהוי סוג האובייקטים וצבעים לפי המצלמה וビינה המלאכותית.
- תמיכה בשליטה ובקרה דרך דרכו לאתר ייעודי המחבר ל SERVER מרכז.
- מתן אינטראקטיה קולית עם משתמשים דרך מייקרופון חכם ו-AI ורמקול.
- חישוב מרחק מהאובייקטים.
- אימות צבע לפי החישון קבוע.

מרכז הבקרה :

- יכולת עיבוד נתונים שהתקבלו מהרובוט (וידאו, אודיו, חישנים).
- יכולת הצגת הנתונים בזמן אמת על גבי האתר שנבנה.
- שליטה מרוחק על פעולות הרובוט.
- שליחת פקודות והוראות בזמן אמת באמצעות פרוטוקול TCP/IP Wi-Fi או בטוחה.
- שליטה לפי מצלמת ה- pi Raspberry ע"י פעולות מוגדרות מראש.
- עבודה לפי עדיפות של פקודות המפעיל.
- צפיה במכשיר הרובוט בזמן אמת.
- קבלת סטטיסטיקה מלאה על ביצועי הרובוט.
- תמיכה בMagnitude דרכי שליטה (אתר, מצלמת , פקודות קוליות).

2.3. מפרט טכני

2.3.1. טבלת פירוט מכלולי המערכת

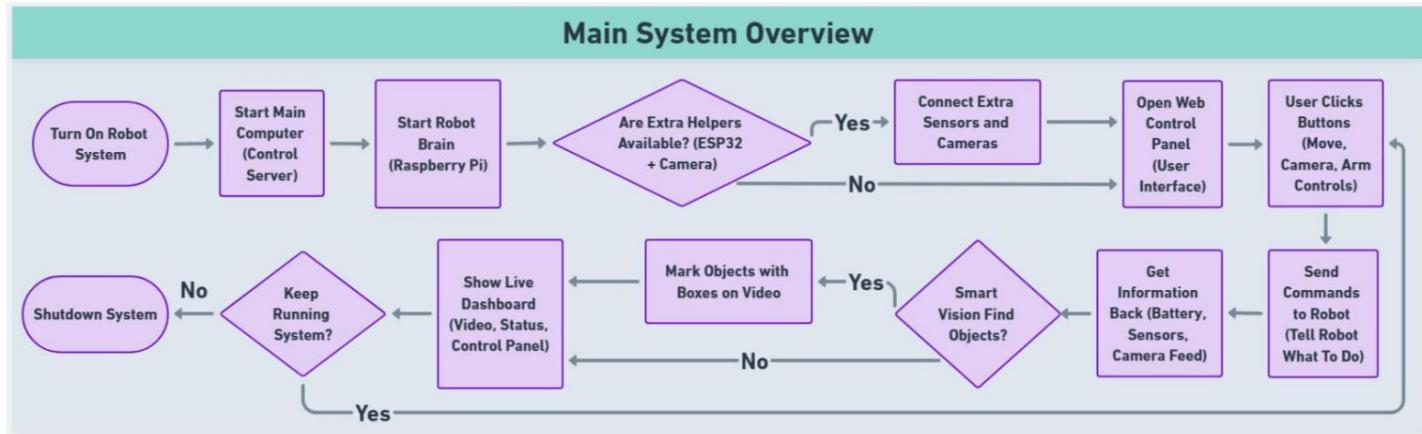
כולל הגדרת ביצועים כמותיים, דיווקים, רזולוציה, כוח חישוב, גודל זיכרון

Component	Key characteristics	Purpose	Ref.
Raspberry Pi 5 board	Quad-core Cortex-A76 2.4 GHz CPU; VideoCore VII GPU; dual-band Wi-Fi/Bluetooth; dual HDMI; 40-pin GPIO; requires a 5 V DC supply via USB-C (up to 5 A; power consumption can reach ≈ 25 W)	Main control unit running ROS and AI; interfaces with sensors and actuators	[3]
Raspberry Pi 4 Model B	Quad-core Cortex-A72 1.5 GHz; Wi-Fi/Bluetooth; dual micro-HDMI; USB 3.0/2.0; Ethernet; powered from a 5 V USB-C supply (typically 3 A, minimum 2.5 A when peripherals draw < 500 mA), so power consumption is around 10–15 W	Remote control station and GUI for tele-operation	[4]
ESP32-WROOM-32 module (sensor hub)	Dual-core LX6 MCU; Wi-Fi/Bluetooth connectivity; 4 MB flash; multiple GPIO/peripheral interfaces; operates from 3.0 – 3.6 V and typically draws 80–240 mA during wireless operation (≈ 0.3 –0.8 W)	Collects colour and distance sensor data; handles Wi-Fi communication and auxiliary control	[5]
STM32F103RCT6 microcontroller (bottom MCU)	Cortex-M3 @ 72 MHz; up to 512 KB Flash and 64 KB RAM; multiple ADC/DAC channels; motor-control timers and diverse interfaces; operates from 2.0 – 3.6 V with typical run-mode current on the order of a few mA (tens of milliwatts)	Performs low-level motor and servo control and bridges sensors/actuators with the main processor	[6]
AM2878 H-bridge motor driver	Single-channel H-bridge; operates from 4 – 33 V and supplies up to 3 A continuous current (delivering up to ≈ 36 W at 12 V); low RDS(on); integrated protection	Drives the 12 V DC track motors with efficient bidirectional control	[7]
ICM-20602 IMU (optional)	6-axis IMU; ± 1 % gyro sensitivity; on-chip ADCs and digital filters; 1 kB FIFO; operates from 1.71 – 3.6 V and consumes a few milliamperes in normal mode (power on the order of milliwatts)	Optional inertial sensor for precise orientation and motion tracking	[8]
ICM-40607 IMU (optional)	6-axis IMU; programmable gyro ± 15.6 – ± 2000 $^{\circ}$ /s and accel ± 2 –16 g; 2 kB FIFO; APEX motion features; powered from 1.71 – 3.6 V with low-power modes drawing only a few mA (tens of milliwatts)	Alternative inertial sensor supporting motion-based gestures and orientation	[9]
0.91-inch OLED display (128×32 pixels)	SSD1306-based 0.91" OLED; 128×32 pixels; I ² C interface; typically powered at 3.3 V and draws ~ 20 –30 mA (≈ 0.07 –0.1 W)	Shows IP address and system status on the robot	[10]
15 kg serial bus servo (YB-SD15M)	15 kg·cm smart servo; all-metal gears; cascaded serial control; angle and speed feedback; operating	Powers the robotic arm joints and allows programmable motion	[11]

Component	Key characteristics	Purpose	Ref.
	voltage 7.4 – 12.6 V with stall currents up to ≈ 2.5 A (peak power ≈ 31 W)		
Raspberry Pi Camera v2	8 MP IMX219 sensor; supports 1080p30, 720p60 video; MIPI CSI interface; 25×23 mm size; powered via the Pi's CSI port (3.3 V logic) with typical current around 200 mA (≈ 0.7 W)	Provides primary visual input for object detection and tele-operation	[15]
Voice-interaction module (CSK4002)	AI-SoC with dual microphones; ~ 128 GOPS processing; 85 pre-built commands; 5 m range; operates from a 5 V supply and typically draws a few hundred mA ($\approx 1\text{--}2$ W)	Enables hands-free voice control and audio feedback	[2]
TCS230 color sensor	Light-to-frequency sensor with R/G/B/clear photodiodes; operates from 2.7–5.5 V and typically draws around 2 mA (≈ 10 mW); outputs square-wave frequency	Detects colours of objects for classification and confirmation	[12]
3.5" touch screen display (U6111)	3.5" TFT LCD; 480×320 native resolution; 125 MHz SPI; supports scaled input up to 1920×1080; 60 fps; powered at 5 V with typical current around 150 mA (≈ 0.75 W)	Provides a large touchscreen interface for local control and debugging	[16]
2-DOF camera PTZ platform	0–180° rotation horizontally and vertically; USB HD camera with 120° field of view; 2 MP resolution; requires a 5 V supply for servos and camera with currents that may reach ~ 2 A during motion (peak power up to ~ 10 W)	Adjusts the camera orientation to scan the surroundings	[17]
Ultrasonic distance sensor (HC-SR04)	operates on a 5 V DC supply and draws about 15 mA (≈ 75 mW); 40 kHz ultrasonic pulses; 2 cm–4 m range; $\sim 15^\circ$ field of view	Measures distance to obstacles for collision avoidance	[13]
MPU-6050 IMU	6-axis sensor; gyro ranges $\pm 250\text{--}2000$ °/s; accel ranges $\pm 2\text{--}16$ g; built-in DMP; operates from 2.375–3.46 V and consumes around 3.8 mA (≈ 10 mW)	Provides basic inertial sensing for orientation and motion control	[14]
520 DC gear motors with encoders	12 V gear motors with Hall encoders; metal gears; typical speeds 110/170/320 RPM; rated current around 1 A per motor (higher at stall), implying a power draw of about 12 W per motor under load	Provide propulsion and odometry feedback for the crawler chassis	[18]
Robotic arm and pan–tilt servos	Metal-gear servos: 6 kg·cm and 15 kg·cm for arm; 20 kg/25 kg for pan–tilt; powered from 4.8–7.2 V (small servos) or 7.4–12 V (high-torque servos) with peak currents of 1–3 A (5 – 36 W)	Move the manipulator joints and adjust the camera orientation	[11]
Lithium-ion battery pack	12 V 4400 mAh rechargeable battery with 12.6 V charger; provides approximately 50 Wh of energy (12 V nominal, 4.4 Ah capacity)	Supplies power to the robot and motors	[1]
Microphone and speaker	Dual far-field microphones and speaker interface; powered from a 5 V supply with current draw on the order of tens of milliamps ($\approx 0.1\text{--}0.5$ W)	Capture voice commands and provide audio feedback	[2]

תבליה 1 : מפרט טכני

2.3.2. תרשים זרימה של המערכת הכללית



איור 1 : תמונה בראשים זרימה של המערכת

2.3.3 עקרון הפעולה

המערכת מופעלת בהಡיקת הרובוט והשרט ; כל הבקרים(Raspberry Pi 5, ESP32, Controller Raspberry Pi 4) מתחברים ברשת Wi-Fi ומקיים תקשורת TCP/IP (TCP SERVER) או HTTP-MJPEG (RTSP) מבעל הרובוט מולו. הווידאו מוזרם בערוץ ייודי (TCP/IP) ; בעת שימוש בדף שכבת WebSocket, טלמטריה והתראות עוברים דרך TCP/IP על גבי Websocket. הפעלתו של הרובוט מושג באמצעות HTTPS/WSS.

Deep Learning לזיהוי אובייקטים, בעודם ESP32-קורא חיישנים ונותן היוזו-חזר בטיחותי :
Ulasonic Ultrasonic Sensor למדידת מרחק רציפה (GPIO, Trigger/Echo) ו-Color Sensor (I²C)-ה-
Backend Server WebSocket משמש גשר בין ממשק האוויר ל-Pi-השתחי וMRI REST API ו-Websocket לניהול
פקודות, טמפרטיה ותקשורת דו-כיוונית ; שרת ה Pi-בسطح מבצע שליטה ישירה בחומרה (קריאה
חיישנים, ניגות מנועים ועכון מצב), בעודו Backend-שימוש פרוקטי למשתמשים. זרימת המידע
מנוהלת בערוצ סטרימינג ייעודי עם מגנון cache משותף למוניט גישות מקבילות, ואילו פקודות
טמפרטיה מועברות בזמן-אמת דרך TCP WebSocket/HTTP על גבי. מערכת מגנון חיבורגב
hotspot) → IP → LAN (hostname ומודיניות hostnames מבודקת לצרכי אמינות ובטיחות ; כל התקשורת
הקריטית מוצפנת ומאותמת דרך SERVER. מכאן ניתן לבחור בין שתי שיטות שליטה מלאימות :
שליטה ידנית בזמן אמת על הרובוט, או שליטה מרוחק דרך מערכת הבקשה והאטר.

במצב ידני המפעיל עופר ישירות מול הרובוט לקבלת תגובה מיידית גם כשיחיבור הרשות משתנה. השיליטה מתבצעת באמצעות המיקרופון החכם שמיר דיבור לפקודות) עיבוד דיבור ב (AI-AI-או באמצעות מצלמות המיקודון החכם שמיר דיבור ב (AI-AI-או באמצעות Controller, או באמצעות הטלפון/טאבלט ; תגבות המערכת מושמעות דרך ה-Speaker. קיימת OLED Board להציג ה-IP של מחברים אלו וסטטוס הביצועים של הרשכברי פי 5, 5-RGB-KEY. LEDCooling HAT לקירור ולהיזיון. ESP32-מפעיל באופן רציף Ultrasonic למניינת התנוגשות ומאמנת צבע בעזרת Color Sensor (למשל יעד בצבע אדום). פקודות תנועה ואחיזה מן ה-

Raspberry Pi 5 שמנני PWM/GPIO/UART), Drive & Protection Controller ממתקי.

מנועי נסיעה ומנועי סרוו, מיישם הגנות (זרם-יתר, טמפרטורה (dog, ומחזיר טלמטריה.

ייחוד השיטה: זמיינות גבואה ותגובה מיידית בשטח, ללא תלות מלאה בתשתיות האתר; שליטה מלאה בתנועה, מצלמה וזורע כאשר נדרש אינטראקציה זריזה בסביבה דינמית. שליטה מרוחק דרך מערכת הבקרה והאתר — ייחוד ומשמעות

- במצב מרוחק עמדת הבקרה (Raspberry Pi 4) והאתר מתחברים ב-Wi-Fi-ו-מנחים קשר TCP/IP עם-

Still Image, Resolution Video Feed, FPS, לצלם Raspberry Pi 5. בדשبورד מוצגichi; ניתן לשנות

ולהפעיל Telemetry מוצגים ("Enable Vision System" (מתח ואחו צוללה) ונתוני Computer Vision).

ביצועים של ה-Raspberry Pi 5-בזמן אמת (FPS, CPU, RAM, Temperature). השליטה מתבצעת

במנגנוןים הבאים :

* שליטה לפי האתר שבנינו

• Virtual Joystick – שליטה רציפה בכיוון ומהירות.

• מקלדת (Hotkeys):

W/A/S/D – קדימה / שמאלה / אחורה / ימינה.

Q/E – סיבוב מצלמת (Pan PTZ (Shmälal/ימין)).

R/F – הטיית מצלמה (Tilt) מעלה/מטה.

Z/X – תנועת בסיס הזורע (Base).

C/V – תנועת מפרק אמצעי (Mid).

B/N – אחיזה/שחרור (Grab) פתיחה/סגירה

• דיבור דרך האתר (Speech Control) המשמש מפעיל את המודול, נותן פקודות קוליות,

והשרות מעבד אותו ומתרגם לפקודות שנשלחות לרובוט; בהתאם, הרובוט מבצע ומדועות

חוזרת.

בדשبورד מוצגים גם חיויי מצב מערכת כגון "Connected / Robot: Online" לבדיקה האם הרובוט דלוק ומחובר לשרת. תחת תפריט Hotkeys קיימים מקלדת ייחודיים נוספים (כגון הפעלה/כיבוי מהיר של מודולי ראייה, צילום תמונה, חורה-לבית), המאפשרים תפעול מהיר ומתוועד.

* לפי מצלמת ה-Raspberry Pi Camera V2 והתצוגה

קייםת שליטה ייחודית באמצעות תנועות גוף הנקלטות על ידי מצלמת

V2, המכונת בעבר המשמש בחדר הבקרה.

לצורך בקרה ומעקב, מוצגת תמונה המשמש על גבי תצוגה מסוג 3.5" SPI LCD for

Raspberry Pi, המאפשרת לפעיל לוודא שהוא מזוהה כחלכה במערכת, שהמצלמה קולעת אותו

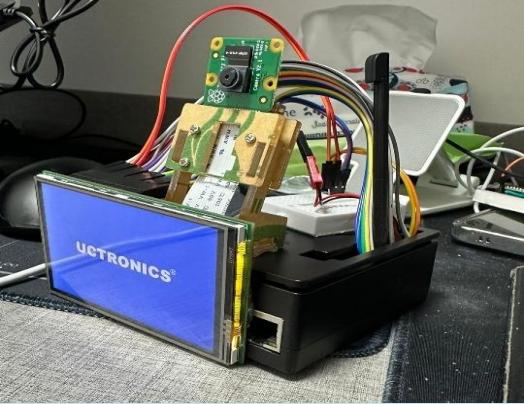
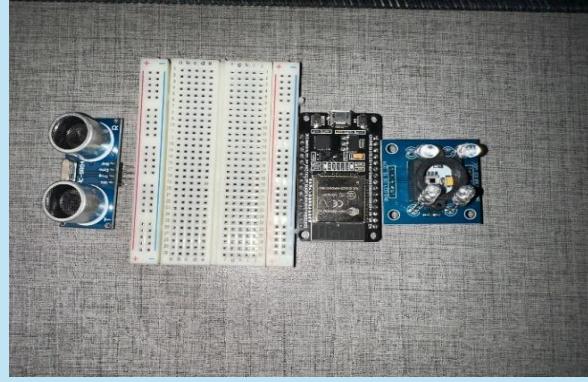
בפוקוס, והאלגוריתמים של למידת מכונה מנתחים את פעולותיו באופן מדויק.

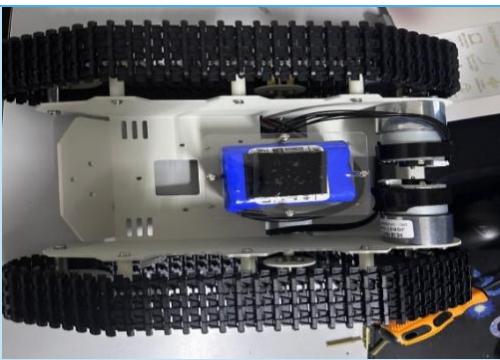
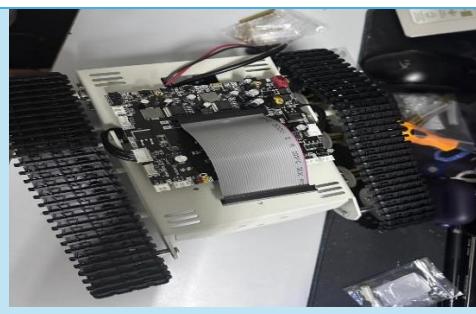
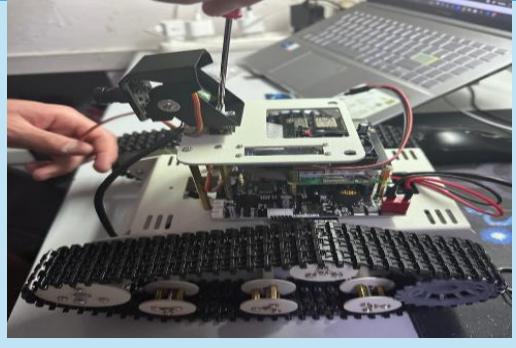
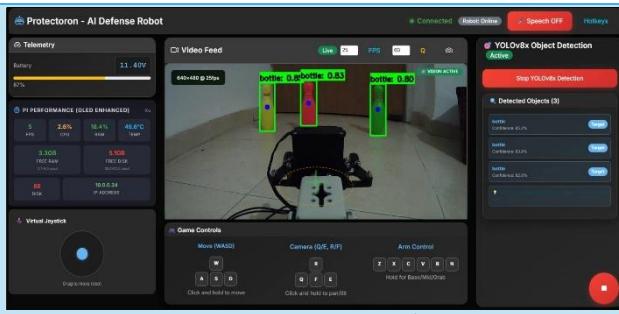
יכולת זו חיונית לדיבוג, תיקוף והגברת אמינות השליטה, ומספקת משוב ויזואלי מיידי למפעיל –

במיוחד כאשר הוא משתמש במכשיר גוף או בפיקוד קוליות שליטה.

ייחוד השיטה: בטיחות ומרחק — תפעול בסביבה הומה או מסוכנת בלי להציג אדם ליד היעד, ניהול הרשותות ולוגים, שליטה רב-משתמשית ומתוועדת דרך האינטרנט.

2.4. תМОונת מצב המערכת בתקילה עבודת ההתקומות

שלב 2	שלב 1																																																								
 איור 3 : תМОונת מצב המערכת	 איור 2 : תМОונת מצב המערכת																																																								
שלב 4	שלב 3																																																								
 איור 5 : תМОונת מצב המערכת	 איור 4 : תМОונת מצב המערכת																																																								
שלב 6	שלב 5																																																								
<table border="1"> <tbody> <tr> <td></td><td>Raspberry Pi 5 board [optional]</td><td></td><td>TF card [optional]</td></tr> <tr> <td></td><td>Parts package [Pi]</td><td></td><td>RGB cooling HAT</td></tr> <tr> <td></td><td>Card reader [optional]</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>Battery pack</td><td></td><td>Charger</td></tr> <tr> <td></td><td>Parts package</td><td></td><td>Transbot SE coupling</td></tr> <tr> <td></td><td>Instructions manual</td><td></td><td>L-type camera cable (300mm)</td></tr> <tr> <td></td><td>OLED board + acrylic board + wire</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> איור 7 : תМОונת מצב המערכת		Raspberry Pi 5 board [optional]		TF card [optional]		Parts package [Pi]		RGB cooling HAT		Card reader [optional]				Battery pack		Charger		Parts package		Transbot SE coupling		Instructions manual		L-type camera cable (300mm)		OLED board + acrylic board + wire			<table border="1"> <tbody> <tr> <td></td><td>Transbot SE frame</td><td></td><td>Transbot SE top plate</td></tr> <tr> <td></td><td>Driven shaft*4 Load-bearing wheel*16</td><td></td><td>Driven shaft*2 Load-bearing shaft*8</td></tr> <tr> <td></td><td>Driving wheel*2</td><td></td><td>Transbot SE tracks</td></tr> <tr> <td></td><td>Transbot SE Robotic arm</td><td></td><td>2DOF camera PTZ</td></tr> <tr> <td></td><td>Expansion board</td><td></td><td>520 motor*2</td></tr> <tr> <td></td><td>Velcro tie*2</td><td></td><td>Several wiring</td></tr> <tr> <td></td><td>Battery pack acrylic board</td><td></td><td>Bolt driver</td></tr> </tbody> </table> איור 6 : תМОונת מצב המערכת		Transbot SE frame		Transbot SE top plate		Driven shaft*4 Load-bearing wheel*16		Driven shaft*2 Load-bearing shaft*8		Driving wheel*2		Transbot SE tracks		Transbot SE Robotic arm		2DOF camera PTZ		Expansion board		520 motor*2		Velcro tie*2		Several wiring		Battery pack acrylic board		Bolt driver
	Raspberry Pi 5 board [optional]		TF card [optional]																																																						
	Parts package [Pi]		RGB cooling HAT																																																						
	Card reader [optional]																																																								
	Battery pack		Charger																																																						
	Parts package		Transbot SE coupling																																																						
	Instructions manual		L-type camera cable (300mm)																																																						
	OLED board + acrylic board + wire																																																								
	Transbot SE frame		Transbot SE top plate																																																						
	Driven shaft*4 Load-bearing wheel*16		Driven shaft*2 Load-bearing shaft*8																																																						
	Driving wheel*2		Transbot SE tracks																																																						
	Transbot SE Robotic arm		2DOF camera PTZ																																																						
	Expansion board		520 motor*2																																																						
	Velcro tie*2		Several wiring																																																						
	Battery pack acrylic board		Bolt driver																																																						

שלב 8  <p>איור 9 : תמונה מצב המערכת</p>	שלב 7  <p>איור 8 : תמונה מצב המערכת</p>
שלב 10  <p>איור 11 : תמונה מצב המערכת</p>	שלב 9  <p>איור 10 : תמונה מצב המערכת</p>
שלב 12  <p>איור 13 : תמונה מצב המערכת</p>	שלב 11  <p>איור 12 : תמונה מצב המערכת</p>
שלב 14  <p>איור 15 : תמונה מצב המערכת</p>	שלב 13  <p>איור 14 : תמונה מצב המערכת</p>

טבלה 2 : תמונה מצב המערכת בתחילת עבודת ההתחממות

3. מטלות

3.1. מטלות הנדסיות ברמת מפרט דרישות

- תכנון והרכבה ידנית מלאה של שלדת הרובוט והזרוע, כולל התקנת כל בורג, מתאים, מנוע ויחידת חיבור סידור והרכבת הרכיבים – משלב חלקים האלומיניום והפלסטיק ועד למערכת השלמה.
 - כתיבת הצעת פרויקט, הגדרת מטרות, מטריצת תכולה ראשונית, ולוייז פיתוח כללי.
 - Learning-Based Computer Vision 1, Robotics. לימוד תיאורטי ויישומי של תחומיי בינה מלאכותית (Computer Vision 1, Robotics).
 - תכנון ארכיטקטורת מערכת משולבת הכוללת שלושה בקרים, Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi 4) וריבוי ערוצי חישה ובקраה.
 - ניתוח ובחרית רכיבי חישה (Ultrasonic, Color Sensor), מצלמות (Camera v2) ותצוגות (OLED, SPI LCD).
 - הגדרת מבנה תלת-רובי של שליטה: מקומית, מרוחק, ודרך קול ותכנון תרחישי פעולה בהתאם.
 - פיתוח אלגוריתמים לזיהוי אובייקטים באמצעות DL + OpenCV + ML.
 - עבודה בסביבת Linux (Raspberry Pi OS), כולל שימוש מתකם בTerminal-ლפקודות מערכתי, ניהול קבצים, התקנת ספריות, הרצת סкриיפטים והרשאות הפעלה.
 - JoyStick 1: תכנון ופיתוח מסך אתר שליטה (Web Dashboard) כולל פיצ'רים מתתקדים (Hotkeys, Live Stream, Speech Input, Log History).
 - כתיבת קוד לתקשורת דו-כיוונית בין הרובוט למרכז הבקרה, כולל תיעוד והצפנה.
 - בניית תרחישים להפעלה ידנית מבוססת / iPad Remote Controller / iPad ודיבור חכם (AI Voice Commands).
 - תכנון אלגוריתם אימות צבע כפול (עיבוד תמונה + חיישן צבע) לאימות חד-ערבי של חפץ חשוב.
 - פיתוח ויישום אלגוריתם תנעה מבוסס מדידות מרחק למניעת התנגשויות.
 - תכנון ויישום מערך זרוע מכנית (זרוע + תפסן) והטמעת אלגוריתם אחיזה מדווג.
 - שילוב מגנוני בטיחות חומרתיים (PWM, Watchdog, Current Limiters) ומעקב טלמטרי.
 - תכנון ויישום של תהליך הנחת חפץ חשוב במקום בטוח והפעלת חזרה אוטונומית לנקודת הבית.
 - בדיקות מערכות בתנאים שונים (שדה פתוח, סביבה סגורה), איתור כשלים, דיבוג, ושיפור.
 - תיעוד מלא הכולל ספר פרויקט, מצגת מקצועית וشرطוטים תומכים (דיagrammot מצלבים, בלוקים, חיווט).
 - בניית סכמאות חשמליות של כל מערכות החיבור בין הבקרים, החישנים, התצוגות, המנועים וההזנות.

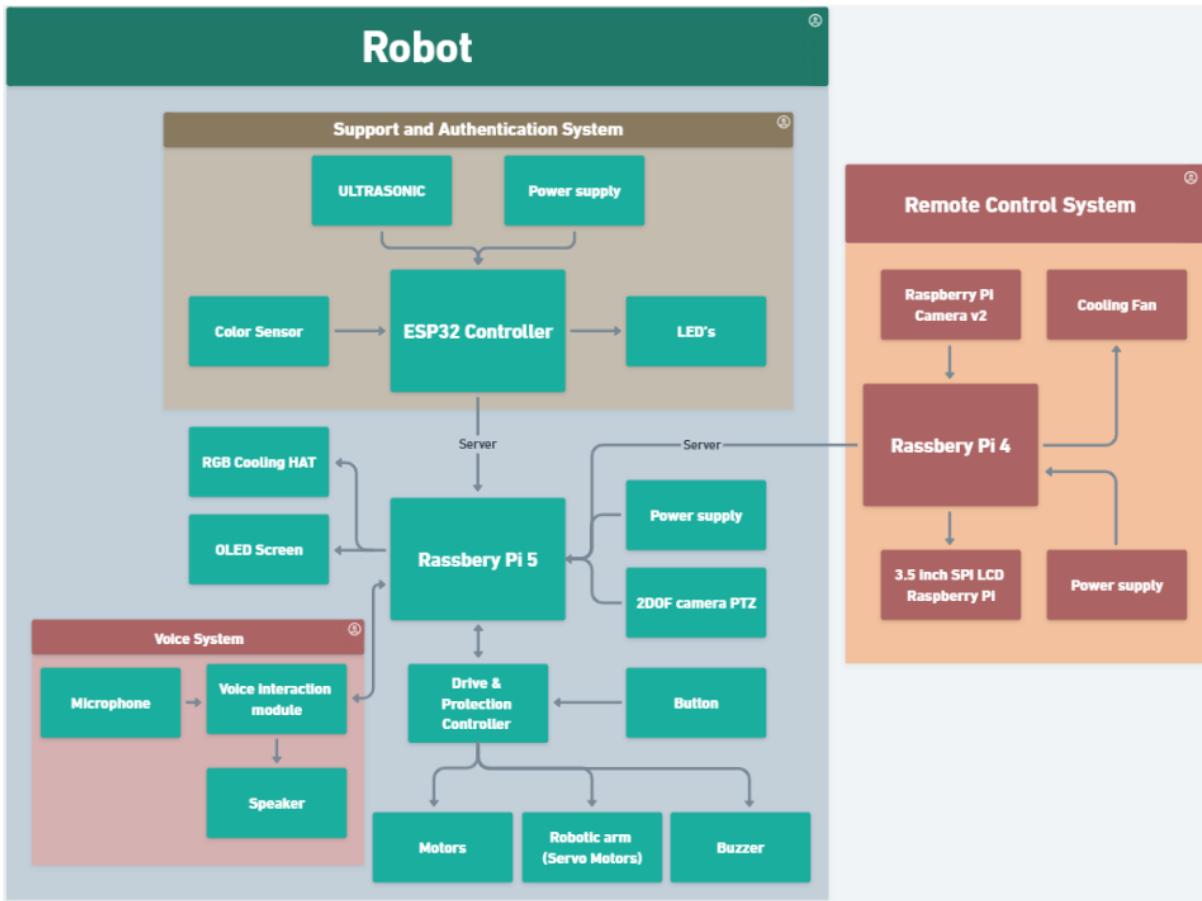
- תכנון וشرطוט דיאגרמת בלוקים ברמת מערכת המציג את זרימת המידע והקשרים בין יחידות החומרה והתוכנה.
- בניית Flow Chart אלגוריתמי לקוד הבדיקה: תרחישי פעולה בזמן אמת, תגובה לאירועים וניתוב פקודות.
- כתיבת מצגת לפרויקט, כולל עיצוב, שילוב גרפים, דיאגרמות ונתוני ביצועים.
- כתיבת ספר פרויקט מלא בהתאם לנוהלי התכנון ההנדסי: תיעוד עקרון הפעולה, תכנון, תרחישי בדיקה, תקשורת, חומרה, קוד ומסקנות.

3.2. ביצוע המטלות ע"י המתמחה

3.2.1. שלבי תכנון

- אפיון ראשוני של מטרות הפרויקט: זיהוי הצורך במערכת רובוטית לטיפול בחפצים חשודים, תוך התבבשות על מקרים פגיעה מהחיכים.
- תכנוןדרישות והפרט: הגדרת דרישות חומרה ותוכנה, תרחישי שימוש, רמות שליטה.
- בחירת ארכיטקטורת מערכת: חלוקת תפקוד בין הבקרים.
- חקר וaisוף רכיבים: סקירה רכיבים זמינים, הזמנת חלקים תואמים לתכנון ותיעוד ביצועים.
- פיתוח רעיון לשיטה חכמה: תכנון שליטה כפולה מקומית ורחוק דרך אתר אינטראנט, קול, מחוות ומסך פיזי.
- הרכבת שלדת הרובוט והזרוע: בניית פיזית מלאה של המבנה המכני, כולל התקנות מדוקאות של מנועים, בקרים וחיווט.
- עבודה בסביבה (Raspberry Pi OS : התקנת ספריות, כתיבת סкриיפטים, ניהול הרשות והרכבת קוד דרך טרמינל.
- פיתוח האתר לשיטה ובקרה: בניית משקל ייעודי הכוללת צוגות וידאו, Joystick, פקודות קוליות וdspBoard נתונים.
- חיבור ובדיקה מערכת התקשורת: שימוש פרוטוקול TCP/IP דו-כיווני בין כל הבקרים לצורך שליטה רציפה בזמן אמת.
- כתיבת אלגוריתמים לזיהוי חפצים: שימוש ב-OpenCV לאלגוריתם ותגובה למצבים חשודים.
- פיתוח מערכת אחיזה מכני: תכנון תנויות הזרוע, הגדרת מהלכים ונקודות עצירה בטוחה ואחיזה מדעית.
- תכנון לוגיקה של תרחישי פעולה: תיאום בין החישנים, המצלמות והמערכת הקולית לביצוע החלטות בזמן אמת.
- בדיקות אינטגרציה ותפקוד: בדיקה מדויקת של כל המערכות בסביבה אמיתי – פתווחה, סגורה ובלתי צפואה.
- תיעוד הנדסי: הכנת תרשימים, כתיבת מצגת מקצועית וכטיבת ספר פרויקט הכולל מפרטים, תכנון ומסקנות.

.3.2.2 תכנון – אב (Diagram Block)

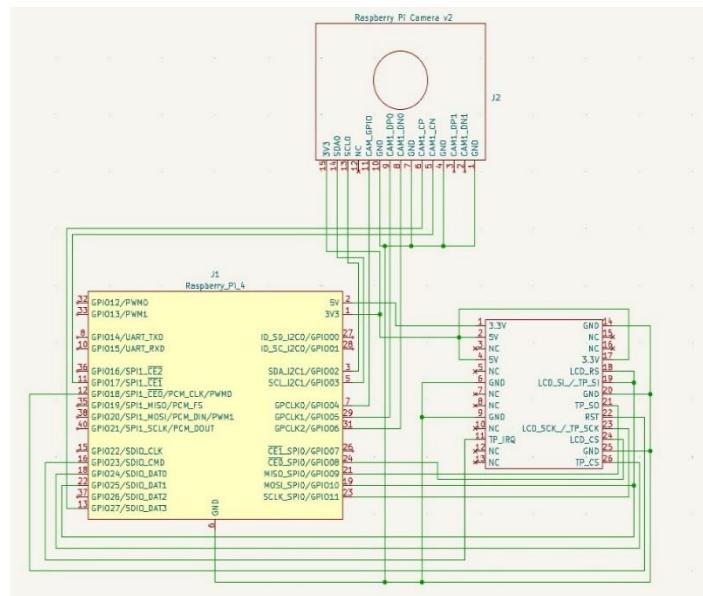
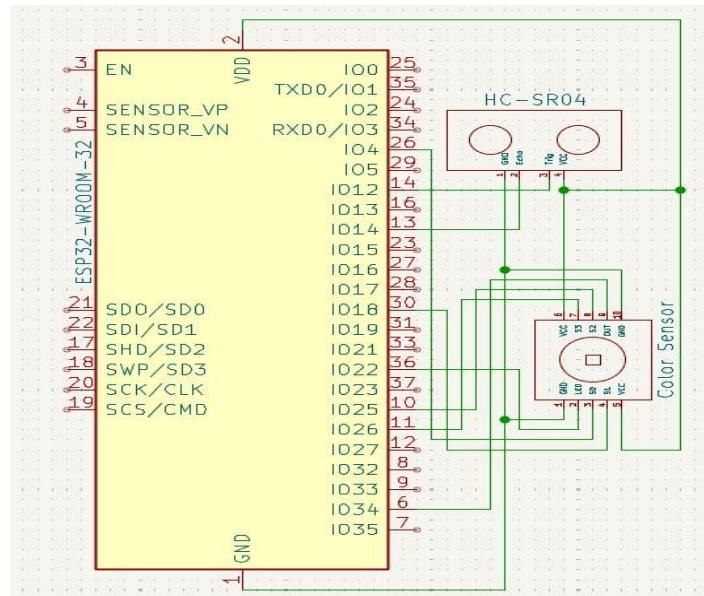


איור 16 : תכנון – אב

3.2.3. תכנון מפורט (סכמה אלקטרונית)

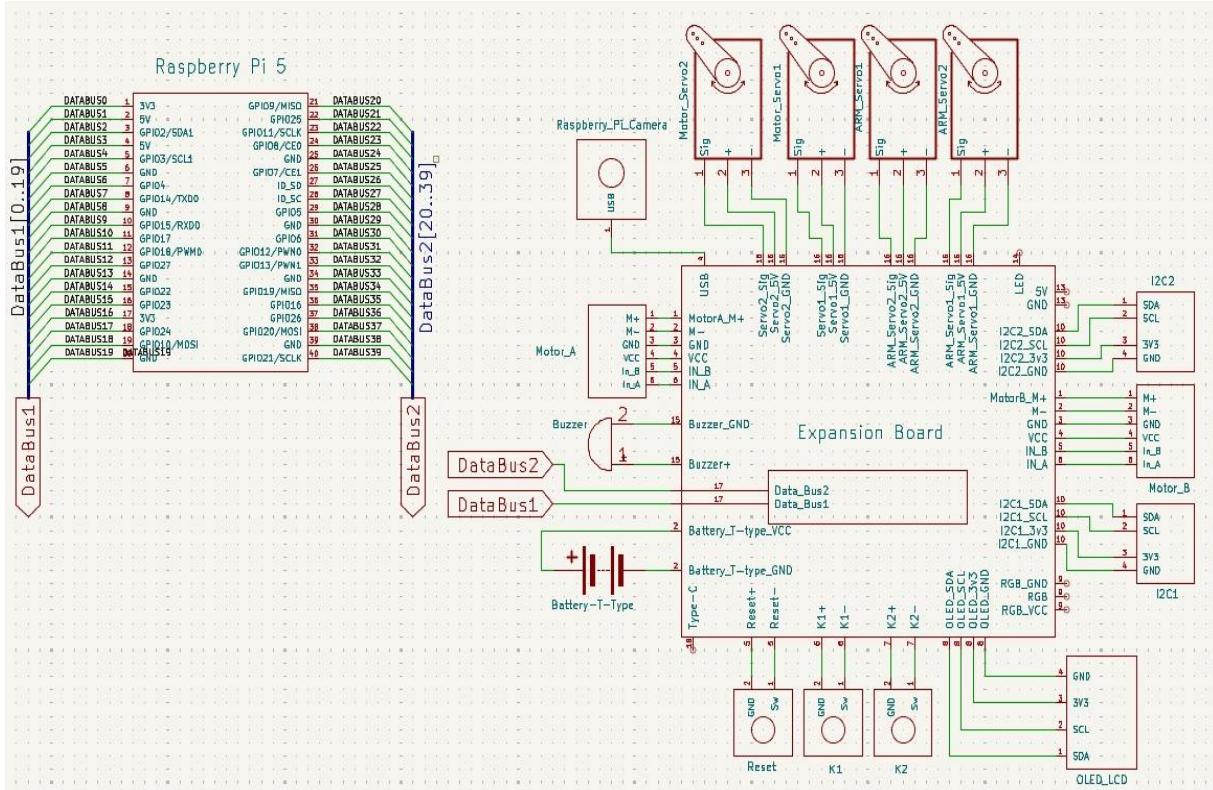
מערכת בדיקה וAIMOT

מערכת שליטה מרוחק



איור 18 : סכמה אלקטרוני של מערכת הבדיקה והאימוט

איור 17 : סכמה אלكتروנית של מערכת השיליטה מרוחק



איור 19 : סכמה אלكتروנית של הרובוט

3.2.4. סימולציות

לאחר בקבוק באולינג אדום בין כדרוי באולינג צבעים אחרים, אנו מניחים כי החפץ החשוד הוא בקבוק הבאולינג האדום. הרובוט יכול להיות מופעל באופן ידני בשטח או מתוך חדר הבקרה, בהתאם למצב הפעולי — במקרים שבהם נדרש תגובה מהירה או חיבור רשת לאינטרנט ייעשה שימוש בשליטה מקומית; במקרים שבהם נדרשת בטיחות מרבית, תיעוד ושליטה רב-משתתפים הפעולה תתבצע מחדר הבקרה. בכל מצב הפעלה עומדות לרשות המפעיל שיטות שליטה מקיפות: אתר השליטה דרכו (Hotkeys) (Virtual Joystick), Web dashboard שליטה מקלדתית, פיקודות קוליות דרך Speech Control, Remote Controller ושליטה דרך טלפון / טאבלט.

אם הפעלה מתבצעת ידנית, המפעיל שולט בrobוט באמצעות הטלפון או Remote Controller באמצעות מקשים פיזיים או חיבור ישיר לאפליקציית שליטה. על הרובוט מותקן מיקרופון חכם שמסוגל להבין דיבור, לעבד אותו ולתרגם אותו לפיקודות פעולה. המפעיל מניע את הרובוט קדימה, מכוען את זווית המצלמה באמצעות הפקדים הפיזיים או הקוליים, ומתקבל מושב מהמערכת דרך תצוגת OLED ורמקול המשמע אישור לפיקודות (”.Gripper Closed” – דוגמה). הרובוט מתקרב לקובץ האובייקטים, כאשר המצלמה הראשית מספקת תמונה חייה. – Raspberry Pi 5 מונתח את הווידאו באמצעות אלגוריתמים של Computer Vision ולמידת מכונה, ומזהה את הבקבוק האדום. במקביל, חישון המרחק מבוקר על ידי ה-ESP32-בודק

שהתנווה בטוחה, וחישון הצבע מאשר באופן סופי כי מדובר בצבע המבוקש) למשל “Red Confirmed”). בשלב זה המפעיל מפעיל את הזורע : בסיס הזורע, מפרק אמצעי, ואחיזה — והבקבוק נלכד באופן מבוקר. לאחר מכן הרובוט מוביל את האובייקט לאזור שנבחר מראש כנקודה בטוחה, משחרר את האובייקט, ונסוג לאחר מכן שמירה על כללי בטיחות. אם הפעלה מתבצעת דרך מערכת הבקרה, השיליטה נעשית מתוך חדר שליטה מרוחק, דרך ה- Web Dashboard או באמצעות מצלמת ה-Raspberry Pi 4-Shdracha נתן לבצע תנוועות ספציפיות. על פי אלגוריתמים של למידת מכונה, התנוועות מנוטחות והרובוט מבצע את הפעולה בהתאם. תצוגת SPI LCD מחוברת למערכת ומציגת את התמונה של המפעיל, כך שניתן לעקב אחר הפעולות ולודא שהניתוח באמצעות למידת המכונה מדויק.

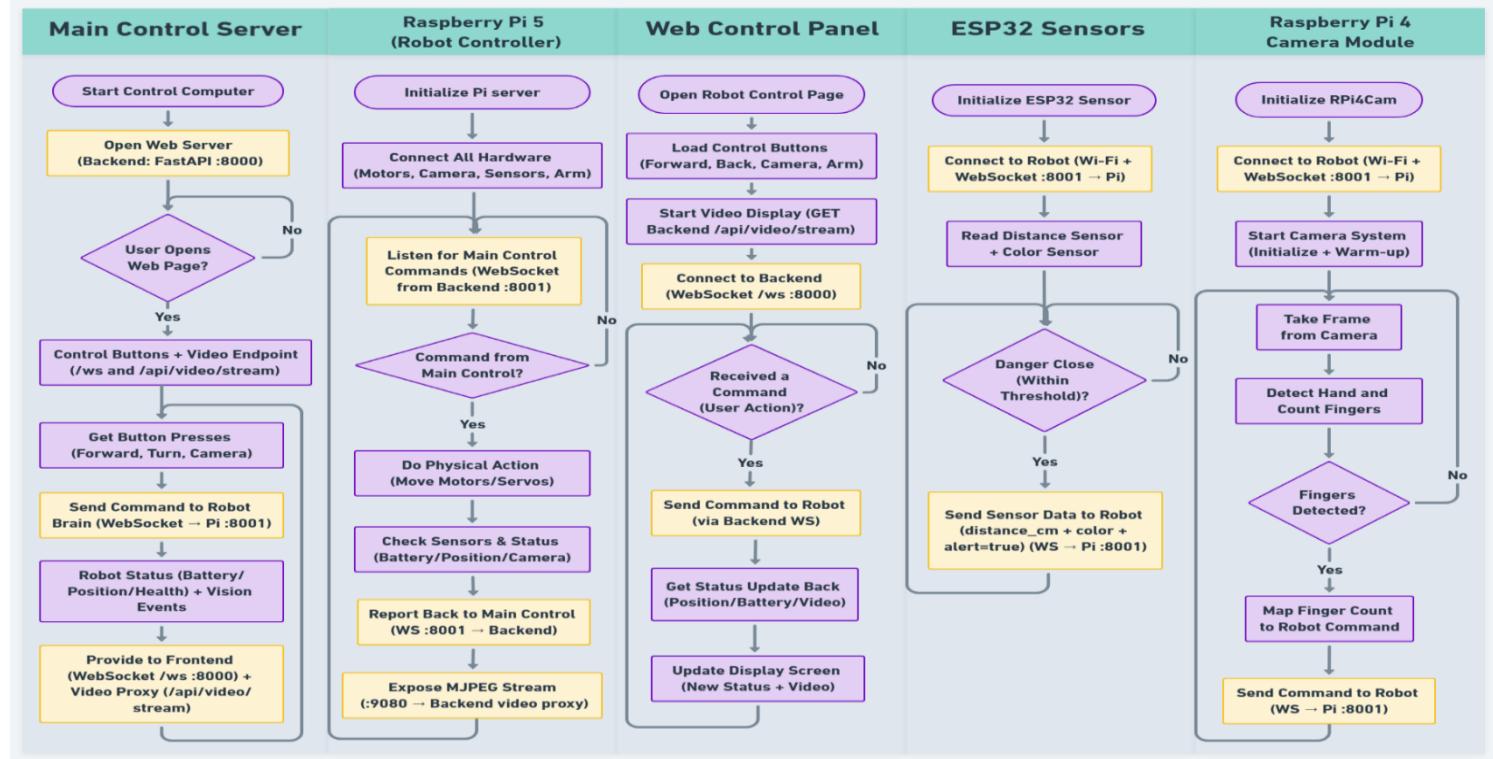
במסך האתר מופיעים כל רכיבי הפיקוד : שליטה מלאה באמצעות Virtual Joystick, קיזורי-Keys (Hotkeys), (Live Video Feed) עם שליטה על רזולוציה ו-FPS, מקלדת (Enable Computer Vision), אפשרות לצילום תמונה (Still Image), הפעלת מערכות זיהוי אובייקטים Speech Control (Connected”, “Robot Online”, “Robot Online”), תצוגת טלמטריה חייה (סוללה, חיבור, מעבד, זיכרון), והפעלה של PTZ (Raspberry Pi Camera V2) כמוח עיבוד מרכזי, שתי השיטות פועלות בתיאום עם אותם רכיבי ליבה : ה- Raspberry Pi 5 (Raspberry Pi 4) ו- (Raspberry Pi Camera V2), (Raspberry Pi Camera V2) (Ultrasonic, Color Sensor) ו- (ESP32) ואחרים (Ultrasonic, Color Sensor) להפעלת מנועים ויישום הגנות. SPI LCD 3.5 ”בחדר הבקרה, (וכן בקר Protection & Drive) על הרובוט ו- (Object Detection). בין אם השליטה ידנית ובין אם מרוחק — המערכת שומרת על רצף פעולות ברור כאשר הכל מנוטר ומטוען. כך ניתן לבצע פעולות מסוכנות בדיקת מרבי ובטיחות, ולהתאים את השיליטה לתנאי השטח והמשימה.

3.2.5. מערך בדיקות

- בדיקת תקינות החיבור בין הרובוט לשרת (Server) ובקרה על קבלת פקודות ותגובה.
- אימונות דיווק מדידת המרחק על ידי חישון המרחק (Ultrasonic Sensor).
- בדיקת אמינות זיהוי צבעים באמצעות חישון הצבע (Color Sensor).
- ויזוא שהתקנות OLED (SPI LCD) ו- (Object Detection). בדיקת דיווק אלגוריתמי עיבוד התמונה ולמידת המכונה בזיהוי אובייקטים (Object Detection).
- בדיקה שככל מנעיה הינה והסרו פעולים כמפורט בהתאם לפקודות השיליטה.
- בדיקת פעילות מאווררי הקירור של Raspberry Pi כולל חיוי (RGB HAT).
- ויזוא תצוגה תקינה ממצלמות הרובוט (Raspberry Pi Camera Module).

- בדיקת הפעלה נכונה של רכיבי חיוי: נוריות LED והזזם.(Buzzer)
- בדיקת תקינות – Speech Control קבלת פקודות קוליות, עיבוד ותגובה מתאימה.
- ויזוא שהטול או הנפילות אין משמעות על יציבות החיבור או תפקוד הרכיבים.
- בדיקת שליחת וקליטת טמפריה בזמן אמת לשרת (Battery, CPU/RAM, מצב רשת)
- הרצת תרחישי קצה עם שליטה מקומית.

3.2.6. לתוכנות בקרים בלבד מפורט Flow Chart



איור 20 : מערכת שליטה ברובוט – תרשימים זרימה מלא

3.3. בעיות הנדסיות וריעונות שהסתווינט התמודד עמן

- אתגר בבחירה ספרית Computer Vision מתאימה: נדרש ניסוי במספר ספירות ML עד לאיתור אלגוריתם אמין שיזהה אובייקטים בצבע ובצורה הנדרשים באופן מדויק.
- עבודה עם סביבת Linux על Raspberry Pi דרשה מיידית והתמודדות עם שורת פקודה, הרשאות וגישה לקבצים מבנה לא מוכן.
- מגבלות כוח העיבוד של הבקרים (Raspberry Pi / ESP32) הקשו על הרצת מודלים מתקדמים של Machine Learning בזמן אמת.
- בניית שרת וביצוע אינטגרציה מלאה (Frontend + Backend) דרשו כתיבת מאות שורות קוד, שימוש ב-Database, ניהול תשתיות בזמן אמת.

4. סיכום ודיון

4.1. סיכום

הចורך במערכת רובוטית חכמה לטיפול בחפצים חשודים וחומרי נפץ עליה מתוך מציאות ביטחונית מורכבת שבה אזרחים וחילילים נפגעים לא רק מתקיפות ישירות, אלא גם מפגיעות משנהות כתוצאות משברי יירוט ונפלים מסוכנים. הפרויקט נולד מתוך תחושת אחריות לתרום פתרון שיכל לסייע בהצלת חיים — בעיקר באירועים שבהם אין ודאות לגבי זהות האובייקט או רמת הסיכון שלו. המערכת שפותחה מדמה תרחיש מציאותי שבו חוץ חדש מונח למרחב ציבורי, ומטרתה לספק כלים לאיתור, אימרות, טיפול והזזה של אותו חוץ — מבלי לסכן חי אדם.

במהלך ביצוע הפרויקט נדרשו להתמודד עם אTEGRים מרובי שכבות: תכנון מערכת שליטה מרוחק וידני, שילוב בין מספר תתי-מערכות (בנייה אתר, בקרה, תקשורת, בינה מלאכותית, חישה, עיבוד תמונה, עיבוד קולי), ולבסוף – תזמון ותיאום בין כלל הרכיבים, תוך שמירה על זרימות מידע מדוייקת ובטוחה בפרוטוקולי TCP/IP הפיתוח כלל אינטגרציה בין מספר בקרים (Raspberry Pi 4, ESP32), רכיבי חומרה (חיישני צבע, מרוחק, מצלמות, זרוע רובוטית ותצוגות), ורכיבי תוכנה מתאימים (אלגוריתמים לזיהוי אובייקטים, בקרה קולית, לוגיקה לתגובה חכמה, בניית אתר, למידה מכונה ולמידה עמוקה, עבודה עם שרת SERVER).

לצד ההיבט המकצועי, הפרויקט לווה בעבודת צוות עמוקה ביןי ובין שותפי. למדנו כיצד לשתף פעולה לאורך שלבים שונים של תכנון, בנייה ובדיקות – תוך הקשה, גמישות מחשבתיות, והתמודדות עם מצבים מתאגרים. בעבודה מאומצת, יצירתיות והתמדה – הצלחנו להגיע לתוצאה מרשים שבסיסת על פתרונות שפיתחנו בעצמנו מאפס. התהליך חיזק אותנו כישורים של חשיבה ביקורתית, תכנון הנדסי מדויק, ופיתוח במשكן בין תוכנה לחומרה. הנהנו מכל שלב והצלחנו להפוך רעיון ראשוני למערכת שלמה, אמינה וمتועדת היטב, שאנו גאים בה.

4.2. הליך קבלת החלטות לאורך הפרויקט

במהלך הפרויקט אימצנו גישה הדרגתית ובסיסת ניסויים, בה כל שלב הוערך על פי קריטריונים של אמינות, זמינות רכיבים, מורכבותימוש ותאימות למטרות הבטיחות. החלטות התקבלו בשילוב סייעור מוחות, בדיקות שטח וסקירת ספרות מקצועית, תוך גמישות והתאמות בהתאם לẤגרים בזמן אמיתי.

4.3. ניתוח בחירת פתרון והשווה לאפשרויות אחרות

פתרון השיטה הדו-שלבית שנבחר – שליטה ידנית בשטח ושליטה מרוחק מבוססת דשborad – נמצא כמאוזן ביותר בין זמינות, בטיחות וונישות. פתרונות חלופיים כמו שליטה מבוססת GPS בלבד או ניתוב אוטונומי מוחלט נפסלו עקב מגבלות דיקוק, תגובתיות ויכולת התאמה למצבים משתנים. הבחירה במבנה מודולרי העניקה יתרון בגמישות והרחבה עתידית.

4.4. עמידה בדרישות

דרישות	ביצוע
כתיבת הצעת פרויקט מפורטת הכוללת מטרות, מבנה מערכת, וחלוקת עבודה.	בוצע
ביצוע שיקולי תכנון מערכתיים (חומרה, תוכנה, תקשורת, בקרה).	בוצע
למידה והטמעה של מגוון רחב של חיישנים (Ultrasonic, Color Sensor וכו').	בוצע

בוצע	מימוש מד מרחק בעזרת חיישן Ultrasonic ומניעת התנגשויות.
בוצע	שליטה ובקרה על מנועים וסרווי דרייברים באמצעות Drive & Protection Controller.
בוצע	חיבור בין Pi 5 ל- ESP32 ולצלמות, תוך שמייה על תקשורת יציבה.
בוצע	כתיבת שירות וממשק Web Dashboard לשיליטה מרוחק באמצעות פרוטוקול TCP/IP.
בוצע	מימוש ממשק משתמש גרפי הכלול: וידאו חי, טלמטריה, כפתורים, קיזורי דרך.
בוצע	שילוב מיקרופון ורמקול לעיבוד והמרת דיבור לפקודות. (Speech Control)
בוצע	שילוב בין מלאכותית ולמידת מכונה לזיהוי אובייקטים ולניתוח תמונה.
בוצע	הטמעת מצלמת PTZ וחישון צבע למטרת אימות החפש החשוב.
בוצע	פיתוח שליטה באמצעות מקלדת (Hotkeys) ו- Virtual Joystick.
בוצע	מימוש צילום אובייקט (Still Image) ושמירת לוגים ואירועים.
בוצע	שליטה מרוחק דרך מצלמת Pi 4 Raspberry לфи תנועות גוף ני.
בוצע	שילוב תצוגות מסוג OLED (על הרובוט) ו- SPI LCD (3.5") "בחדר הבקרה".
בוצע	תכנון ואינטגרציה של זמן בין כל המודולים השונים במערכת.
בוצע	בדיקות המערכת בתנאים משתנים: סביבת בית, מכשולים, רשות לא יציבה.
בוצע	ניתוח טלמטריה וחיווי תקלות במערכת.
בוצע	חיבור כל הבקרה לשרת ועבודה ביחד
בוצע	אינטרגציה בין כל הרכיבים
בוצע	כתיבת ספר פרויקט מלא, כולל תיעוד טכני, תרשימי בלוקים וסיכוםים.
בוצע	כתיבת מצגת

טבלה 3 : עמידה בדרישות

4.5. תרומת עבודותו של הסטודנט

הפרויקט תרם לנו רבות, הן מבחינה מקצועית והן מבחינה אישית. רכשו הבנה עמוקה בתחום המושבויות, בינה מלאכותית בזמן אמיתי, תקשורת ראש, ובקרת רובוטים. יישמו בפועל עקרונות רבים שנלמדו לאורך התואר, תוך התמודדות עם אתגרים טכנולוגיים ומערכות מורכבים. העבודה האינטנסיבית על כל שלב בתכנון ובמימוש – מהחומרה ועד לתיעוד – חידזה את יכולותינו בניתוח בעיות, למידה עצמית מהירה, חשיבה יצירתית, ותכנון מערכת מkcחה להקאה. עבורה, פרויקט זה לא רק מהויה מימוש אקדמי מתקדם, אלא גם נקודת מפתחה לחשיבה על פתרונות טכנולוגיים יישומיים, שיכולים להגן על חייו אדם ולשפר את ביטחונם של אזרחים בשטח.

4.6. שינויים עתידיים דרושים

בשלב הנוכחי של הפיתוח, המערכת מתמקדת ביכולת זיהוי מהימנה של חפצים מסווגים באמצעות שילוב אלגוריתמים מתקדמים של למידת מכונה. שדרוג עתידי עשוי לכלול הרחבת יכולות המערכת, כגון הוספה מצלמה תרמית לצורך איתור חפצים בלתי נראהין לעין רגילה, שיפור יכולות הניות האוטונומי באמצעות חיישנים ומפות דינמיות, וכן שילוב מנגנון תגובה פיזיים מתקדמים (כגון סימון אזור מסוכן או שליחת חיויים חירום אוטומטי).

בנוסף, ניתן לפתח מערכות מבזורת – בהן מספר רובוטים פועלם בו זמנית בשטחים שונים תוך תקשורת עם שירות מרכזי – ולחבר את כלל המערכת לממשק שירותי חיצוניים כדוגמת מערכות הביטחון

והמשטרה. חיבור זה יאפשר שליחת נתונים על המפעיל (אזור או בעל תפקיד), ביצוע זיהוי פנים ובדיקת הרשות בזמן, וכך להבטיח רמת בטיחות גבוהה תוך הורדת העומס התפעולי על גורמי האכיפה.

שינויים אלו יתרמו לשיפור הגמישות, האפקטיביות והסקלהbilיות של המערכת, ויאפשרו יישום נרחב יותר במגוון תרחישים אזרחיים וביטחוניים.

4.7. **מסקנות**

- חשוב לציין כי תמיד קיימת אפשרות לשיפור המערכת. במסגרת הזמן שעמד לרשותנו, השענו מאמץ רב בשיפור מרבי בהתאם ליכולות והמשאבים שהיו זמינים.
- המערכת שפיתחנו הצלחה בשלב מספר תתי-מערכות חומרה ותוכנה בצורה סינרגית ואינה, כולל בינה מלאכותית, בקרת בזמן אמת ותקשורת רשת דו-כיוונית.
- אלגוריתמי הזיהוי שפיתחנו הדגימו יכולת להבחן בין עצמים בעלי דמיון חזותי, תוך הסתמכות על עיבוד תמונה וזיהוי צבע מסולב.
- תכנון השליטה בשתי שיטות נפרדות (שליטה ידנית ושליטה דרך חדר הבקרה) יצר גמישות תפעולית מלאה והתאמה לנסיבות פעולה שונות – דינמיות או מרווחות.
- השימוש בחישני מרחוק ובאיומות צבע כפול (חזותי + חישון צבע) הפחת שגיאות והעלאת רמת הדיקוק בזיהוי ובטיפול בחפצ החשוד.
- האינטגרציה של מודול הדיבור, היכולת לפקח דרך האינטרנט ולבצע ניתוח מחוות יד, חייזקו את חווית המשתמש והנגישות לתפעול המערכת.
- המערכת פועלת בפרוטוקולים סטנדרטיים ומובטחים (TCP/IP, HTTPS) מה שמאפשר לה להשתלב בקלות במערכות קיימות בארגונים ביטחוניים או אזרחיים.
- השירות והדיבור המרכזי מספקים משקל ניהול עשיר, עם לוגים, טלמטריה, ויזואלייזציה חייה ושליטה מלאה בזמן אמת.
- התרשימים, הממשקים והתగובות בזמן אמת מוכחים כי מדובר בפלטפורמה בעלת פוטנציאל רחב לשימושים בטיחותיים בשטח אמיתי.

5. **סיכום**

- [1] Yahboom, “TRANSBOT-SE ROS AI vision robot car,” product page. [Online]. Available: <https://category.yahboom.net/products/transbot-se>. Accessed 25-Sep-2025.
- [2] Yahboom, “Yahboom intelligent voice speech recognition module,” product page. [Online]. Available: <https://category.yahboom.net/products/voice-interaction>. Accessed 25-Sep-2025.
- [3] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 5 product brief,” 2025. [Online]. Available: <https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/raspberry-pi-5-product-brief.pdf>. Accessed 25-Sep-2025.
- [4] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 4 Model B datasheet,” Release 1, Jun 2019. [Online]. Available: https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/Raspberry_Pi_4B.pdf. Accessed 25-Sep-2025.

- [5] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32 datasheet (v3.6),” 2024. [Online]. Available: https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Accessed 25-Sep-2025.
- [6] STMicroelectronics, “STM32F103xC/D/E high-density performance line ARM Cortex-M3 32-bit microcontrollers,” DocID14611 Rev 12, Nov 2015. [Online]. Available: https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/STM32F103RCT6_2016-11-30.PDF. Accessed 25-Sep-2025.
- [7] AMtek Semiconductors, “AM2857_V0.7 H-bridge motor driver,” datasheet. [Online]. Available: https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/AM2857_V0.7.Eng.pdf. Accessed 25-Sep-2025.
- [8] TDK InvenSense, “ICM-20602 6-axis MotionTracking device,” product page. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/icm-20602/>. Accessed 25-Sep-2025.
- [9] TDK InvenSense, “ICM-40607 datasheet,” DS-000240 Rev 1.7, Jan 2019. [Online]. Available: <https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/ICM-40607.pdf>. Accessed 25-Sep-2025.
- [10] Yahboom, “0.91-inch OLED display (12832) for Arduino/Raspberry Pi/Jetson NANO,” product page. [Online]. Available: [https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/Introduction%20of%2012832OLED\(0.91%20inch\).pdf](https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/Introduction%20of%2012832OLED(0.91%20inch).pdf). Accessed 25-Sep-2025.
- [11] Yahboom, “15 KG serial bus smart servo and driver debugging board for robotic arm,” product page. [Online]. Available: <https://category.yahboom.net/products/15kg-serial-bus-servo>. Accessed 25-Sep-2025.
- [12] Texas Instruments / TAOS, “TCS230 programmable color light-to-frequency converter,” TAOS046 – Feb 2003. [Online]. Available: [https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/TCS230%20\(1\).pdf](https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/TCS230%20(1).pdf). Accessed 25-Sep-2025.
- [13] MPJA, “HC-SR04 Ultrasonic Module,” datasheet. [Online]. Available: <https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/SRF04.pdf>. Accessed 25-Sep-2025.
- [14] TDK InvenSense, “MPU-6050 six-axis (gyro + accelerometer) MEMS MotionTracking device,” product page. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050>. Accessed 25-Sep-2025.

- [15] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi Camera Module v2 datasheet,” 2016. [Online]. Available: <https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/Raspberry%20Pi%20V2%20Camera.pdf>. Accessed 25-Sep-2025.
- [16] Uctronics, “3.5-inch Raspberry Pi Touch Screen Display LCD Panel U6111,” specification. [Online]. Available: <https://github.com/FrancisA2000/protectoron-ai-robot-datasheets/blob/main/U6111.pdf>. Accessed 25-Sep-2025.
- [17] Yahboom, “2DOF camera platform with HQ servo for Raspberry Pi car,” product page. [Online]. Available: <https://category.yahboom.net/products/camera-ptz>. Accessed 25-Sep-2025.
- [18] Hiwonder, “520 DC gear motor with high-precision hall encoder,” product page. [Online]. Available: <https://www.hiwonder.com/products/hall-encoder-dc-gear-motor>. Accessed 25-Sep-2025.
- [19] “R-Pi Troubleshooting,” in *eLinux: Embedded Linux Wiki*. [Online]. Available: https://elinux.org/R-Pi_Troubleshooting#Coloured_splash_screen. Accessed 25-Sep-2025.
- [20] Programiz, “Python datetime.” [Online]. Available: <https://www.programiz.com/python-programming/datetime>. Accessed 25-Sep-2025.
- [21] Amazon, “Pisugar Portable Power Module,” amazon.co.uk. [Online]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Pisugar-Portable-Lithium-RaspberryAccessories/dp/B07RDNT8CY>. Accessed 25-Sep-2025.
- [22] N. Jennings, “Socket Programming in Python (Guide),” *Real Python*. [Online]. Available: <https://realpython.com/python-sockets/#tcp-sockets>. Accessed 25-Sep-2025.
- [23] A. Singh, *Socket Programming With Python*. Lulu.com, 2019.
- [24] J. Pyles, J. L. Carrell, and E. Tittel, *Guide to TCP/IP*. WCN, 2017.
- [25] YouTube, “OpenCV Python Tutorials for Beginners 2020,” Jun. 24, 2020. [Online]. Available: https://www.youtube.com/playlist?list=PLMoSubG1Q_r_sc0x7ndCsqdIkL7dwrNF
- [26] OpenCV, “OpenCV Tutorials,” Jun. 29, 2023. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d9/df8/tutorial_root.html
- [27] Arutz Sheva - Israel National News, “Hundreds injured from rocket fragments during recent attacks,” 2025. [Online]. Available: <https://www.israelnationalnews.com/news/382085>
- [28] Haaretz, “IDF soldier killed by unexploded missile shrapnel on Navy ship,” Jun. 3, 2025. [Online]. Available: <https://www.haaretz.co.il/news/politics/2025-06-03/article/00000197-3404-dd58-add7-35d77ae00000>

- [29] Haaretz, “Aftermath of rocket interceptions causes mass injuries in central Israel,” Jun. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.haaretz.co.il/news/politics/2025-06-25/ty-article/.premium/00000197-a44a-d46c-a5d7-a57a86d20000>
- [30] Haaretz, “Injuries rise following rocket interception debris,” Jun. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.haaretz.co.il/news/politics/2025-06-29/ty-article/00000197-bbb4-d6b3-abf7-fbf768c00000>
- [31] Calcalist, “Rise in casualties from shrapnel and debris incidents,” Jun. 2025. [Online]. Available: https://www.calcalist.co.il/local_news/article/rypk62h8el
- [32] Kan News, “Footage shows destruction caused by rocket interception fallout,” Jun. 2025. [Online]. Available: <https://www.kan.org.il/content/kan-news/newstv/p-11894/s1/952689/>
- [33] Haaretz, “IDF casualties from buried explosives in enemy territory,” Mar. 23, 2011. [Online]. Available: <https://www.haaretz.co.il/misc/2011-03-23/ty-article/0000017f-f46e-d044-adff-f7ff24290000>
- [34] Mako News, “Suspected object causes evacuation at bus station,” Dec. 2022. [Online]. Available: https://www.mako.co.il/news-israel/2022_q4/Article-d880213a5e2a481027.htm

.6. נספחים

- א. קוד כל המערכת
- ב. הצעת פרויקט גמר בתכנון הנדסי
- ג. סכמאות חשמליות