

האוניברסיטה הפתוחה
המחלקה למתמטיקה ולמדעי המחשב

סקירה והשוואה של חיישנים שונים ברכב אוטונומי

עבודה מסכמת זו הוגשה כחלק מהדרישות לקבלת תואר

"מוסמך למדעים" M.Sc. במדעי המחשב

באוניברסיטה הפתוחה

החטיבה למדעי המחשב

על-ידי

זוהר ואנונו חדד

העבודה הוכנה בהדרכתו של ד"ר לאוניד ברנבויס

יולי 2024

תוכן עניינים

3.....	רשימת טבלאות
3.....	רשימת איורים
4.....	רשימת קיצורים
6.....	הקדמה
7.....	מבוא
8.....	רכב אוטונומי
8.....	מרכיבי הרכב האוטונומי
9.....	רמות אוטונומיה
11.....	יתרונות וחסרונות
13.....	תעשייה
14.....	מחקר
15.....	סקירה והשוואה של חיישנים שונים ברכב אוטונומי
17.....	חיישנים
17.....	מצלמה
18.....	מכ"מ
19.....	לידאר
21.....	חיישנים קוליים
22.....	השוואת חיישנים
24.....	מסקנות השוואת חיישנים
25.....	היתוך חיישנים
28.....	חיבוריות
29.....	עדכונים באוויר-OTA
30.....	מודל תקשורת
32.....	טכנולוגיות תקשורת
34.....	טכנולוגיות תקשורת לטווח קצר : Bluetooth, BLE, ZigBee ו-UWB
38.....	טכנולוגיות תקשורת לטווח בינוני : DSRC ו-WiFi
45.....	טכנולוגיות תקשורת לטווח ארוך : C-V2X ו-5G-NR
49.....	השוואת תקשורות
51.....	מסקנות השוואת תקשורות
53.....	מערכות קיימות
53.....	מערכת סיוע מתקדמת לנהג
55.....	סקירה מערכת קיימת
58.....	סקירה סימולטור קרלה
59.....	מסקנות העבודה
61.....	סיכום
62.....	רשימת מקורות

רשימת טבלאות

24	טבלה 1- השוואה יכולות בין חיישנים
37	טבלה 2- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח קצר [11]
41	טבלה 3- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח בינוני [11]
47	טבלה 4- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח ארוך [11]
52	טבלה 5- השוואת סוגי תקשורות
54	טבלה 6- סיווג טכנולוגיות רכבים אוטונומיים לפי רמות אוטונומיה [9]
54	טבלה 7- מיפוי חיישנים למערכות [5]
55	טבלה 8- שימוש בחיישנים ומערכות ADAS בחברות רכבים מסחריות [5]
60	טבלה 9- השוואה בין יכולות תחושה של נהגים וחיישנים בכלי רכב אוטומטיים [7]

רשימת איורים

8	איור 1- רכב אוטונומי חכם ומחובר [1]
8	איור 2- רכב אוטונומי חכם [2]
9	איור 3- רמות אוטונומיה [3]
10	איור 4- רמות אוטונומיה, אדם מכונה [2]
15	איור 5- דיאגרמת בלוקים של מערכת רכב אוטונומי
19	איור 6- אינפרא אדום, אורכי גל
22	איור 7- חיישנים בנהיגה אוטונומית [5]
23	איור 8- תצוגת מידע מהחיישנים [6]
25	איור 9- ארכיטקטורת מערכת רכב אוטונומי [4]
26	איור 10- גריד מיפוי מיקום תפוס [3]
27	איור 11- מערכת תפיסת אובייקט נע ע"י ריבוי חיישנים [3]
31	איור 12- סקירת רכב לכל התצורות (V2X) [1]
32	איור 13- סוגי טכנולוגיות ברכב אוטונומי [11]
33	איור 14- מערכת תקשורת כלי רכב [11]
38	איור 15- שכבות ארכיטקטורת תקשורת [12]
49	איור 16- מערכות אלחוטיות ברכב [10]
50	איור 17- רכב מחובר [8]
50	איור 18- טכנולוגיות תקשורת [8]
56	איור 19- מיפוי חיישנים בטסלה [14]
59	איור 20- ארכיטקטורת רכב אוטונומי [9]
60	איור 21- ארכיטקטורת מערכת אוטונומית [7]

3GPP -	3rd Generation Partnership Project
5G-NR -	Fifth Generation-New Radio
ACC -	Adaptive Cruise Control
ADAS -	Advance Driver Assistance Systems
AEB -	Automatic Emergency Braking
AI -	Artificial Intelligence
AV -	Autonomous Vehicle
BLE -	Bluetooth Low Energy
BPSK -	Binary Phase Shift Keying
BSD -	Blind Spot Detection
C-V2X -	Cellular Vehicle To Everything
CCH -	Control Channel
CRC -	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA -	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DS -	Direct Sequences
DSRC -	Dedicated Short-Range Communication
eMBB -	enhanced Mobile BroadBand
ECU -	electronic control unit
EDCA -	Enhanced Distributed Channel Access
FCW -	Forward Collision Warning
FHSS -	Frequency Hopping Spread Spectrum
FoV -	Field of View
IMU -	Inertial Measurement Unit
IoT -	Internet of Things
LDW -	Lane Departure Warning
LiDAR -	Light Detection and Ranging
LKA -	Lane Keep Assist
LoS -	Line of Sight
LTE -	Long-Term Evolution
MAC -	Media Access Control
MEC -	Multi-access Edge Computing
MEMS -	Micro-ElectroMechanical System
ML -	Machine Learning
mMTC -	massive Machine Type Communication
NFC -	Near Field Communication
OBU -	On Board Unit
OTA -	Over the air

OQPSK -	Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying
QoS -	Quality of Service
RADAR -	Radio-Detection and Ranging
RSU -	Road Side Unit
SAE -	Society of Automotive Engineers
SCH -	Service Channels
SPS -	Software Provisioning Server
TA -	Trusted Authority
TH -	Time Hopping
TSR -	Traffic Sign Recognition
uRLLC -	ultra-Reliable Low Latency Communication
UWB -	Ultra-Wide Band
V2I -	Vehicle to Infrastructure
V2N -	Vehicle to Network
V2P -	Vehicle to Pedestrian
V2V -	Vehicle to Vehicle
V2X -	Vehicle to Everything
VANET -	Vehicular Ad-hoc Network
VPL -	Vehicle Positioning and Localization
VTMs -	Vehicle Telematics Modules
Wi-Fi -	Wireless Fidelity

הקדמה

תחום הרכב האוטונומי הינו אחד מהתחומים המסקרנים והמאתגרים כיום. עבודה זו מציגה סקירה מקיפה של כלי רכב אוטונומיים, דנה בהגדרתם, רמות השונות של אוטונומיה ויתרונותיהם וחסרונותיהם. הוא בוחן את התחום כולו מרמת החיישנים עד לרמת האלגוריתמים בתעשייה ובמחקר, ומדגיש את הצעדים המשמעותיים שנעשו ואת הפוטנציאל העתידי. לעבודה זו מספר מטרות:

- המטרה הראשונה הינה סקירה מפורטת והשוואה של החיישנים העיקריים המשמשים ברכבים אוטונומיים - מצלמות, מכ"מ, לידאר וחיישנים קוליים, תוך בחינת החוזקות והחולשות שלהם בתרחישים שונים. בנוסף, נסביר את המושג היתוך מידע שהינו חלק משמעותי בתהליכים של אוטונומיות הרכב.
- המטרה השנייה הינה סקירה והשוואה של טכנולוגיות תקשורת חיוניות לתפעול הרכב האוטונומי, כולל תקשורת בטוחים שונים: קצר, בינוני וארוך (DSRC, Bluetooth, Wi-Fi, 5G-NR, C-V2X), תוך ניתוח תפקידיהם ויעילות בשיפור הקישוריות והבטיחות ברכב.

עבודה מסכמת זו הינה החלק התאורטי המלווה את פרויקט הגמר המעשי הנעשה בתחום זה – חניה אוטונומית.

כלי רכב אוטונומיים (Autonomous vehicles) מייצגים שינוי מהותי בטכנולוגיית התחבורה, שעומדת לחולל מהפכה בתנועה של אנשים וכלי רכב. רוב התאונות כיום נגרמות כתוצאה מטעות אנוש, וזהו בדיוק הגורם המרכזי שרכב אוטונומי יכול למנוע.

כלי רכב אוטונומיים מוגדרים ככלי רכב המסוגלים לחוש את סביבתם ולפעול עם התערבות אנושית מינימלית או ללא התערבות אנושית, כלי רכב אוטונומיים ממנפים טכנולוגיות מתקדמות כדי לנווט, לקבל החלטות ולבצע משימות נהיגה.

האגודה של מהנדסי רכב (SAE) מגדירה שש רמות של אוטומציה של נהיגה- החל מרמה 0 (ללא אוטומציה) עד לרמה 5 (אוטומציה מלאה). כל אחת מהן מייצגת צעד לקראת אוטונומיה מלאה.

פריסת כלי רכב אוטונומיים מבטיחה יתרונות רבים, כולל הגברת הבטיחות, צמצום עומסי התנועה וניידות משופרת עבור אוכלוסיות שונות.

עם זאת, יש לטפל באתגרים כמו מגבלות טכנולוגיות, מכשולים רגולטוריים וקבלה חברתית. עבודה זו מתעמקת במרכיבי הליבה של מערכות כלי רכב אוטונומיים, תוך התמקדות בחיישנים מסוג: מצלמות, מכ"מ, לידאר וחיישנים קוליים, חיישנים אלה מאפשרים תפיסה סביבתית ובשילוב היתוך מידע כלי הרכב יוכל לקבל החלטות מה לעשות במצב זה, לאן לפנות, באיזה מהירות ועוד.. וכמובן לבצע את ההחלטות שהתקבלו ע"י שליטה המערכות ההיגוי והבלימה של הרכב.

בנוסף העבודה מתמקדת גם בטכנולוגיות התקשורת המקלות על אינטראקציות בין רכב לכל דבר (V2X). באמצעות ניתוח השוואתי של חיישנים וטכנולוגיות תקשורת אלו, מטרת עבודה היא לספק תובנות לגבי תפקידיהם, היתרונות והחסרונות שלהם ולתרום לשיח מתמשך על עתיד התחבורה האוטונומית.

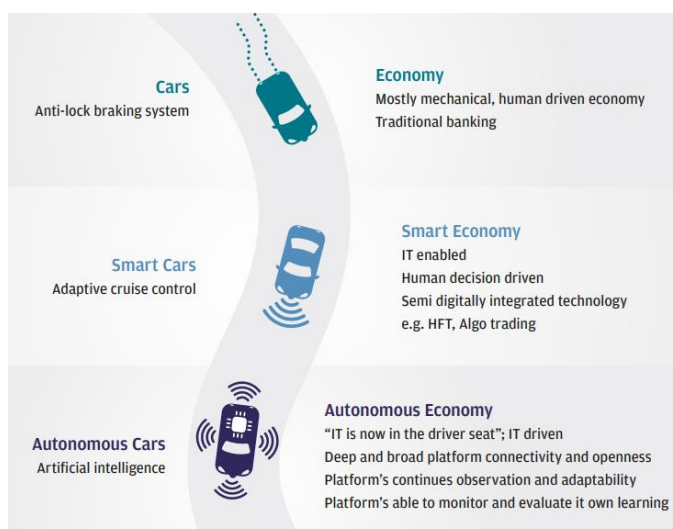
רכב אוטונומי הינו רכב המסוגל לנהוג בכביש ללא התערבות של נהג ובכל מצב אפשרי. רכב אוטונומי הינו **חכם ומחובר**, רכב חכם מקבל מידע מחיישנים שונים ברכב, מבצע חישובים ומריץ אלגוריתמים שונים על סמך המידע שהגיע - היתוך מידע העוזר להבין את הסביבה, לקבל החלטות ולשלוט בתנועת הרכב [1]. רכב מחובר מקבל מידע מהחיישנים שלו ומפיץ את המידע לשאר הרכבים -שיתוף מידע. החיישנים של הרכבים קוראים את סביבת המכונית כל הזמן, משתפים את המידע הרלוונטי שלהם לשאר הרכבים ומקבלים מידע משאר הרכבים אליהם. כלי רכב אוטונומיים (AVs), הידועים גם כמכוניות בנהיגה עצמית, הם כלי רכב המצוידים בטכנולוגיה המאפשרת להם לנווט ולפעול ללא התערבות אנושית.



איור 1- רכב אוטונומי חכם ומחובר [1]

מרכיבי הרכב האוטונומי

1. חיישנים : איסוף נתונים מהסביבה ע"י חיישני מצלמות, מכ"מ, לידאר וחיישנים קוליים.
2. מערכות תפיסה : היתוך מידע מנתוני החיישנים כדי להבין את סביבת הרכב, כולל זיהוי עצמים, הולכי רגל וכלי רכב אחרים.
3. לוקליזציה : קביעת המיקום המדויק של הרכב באמצעות GPS, מפות בחדות גבוהה ונתוני חיישנים.
4. תכנון וקבלת החלטות : יצירת אסטרטגיית נהיגה על ידי ניתוח הסביבה וקבלת החלטות לגבי מהירות, כיוון ותמרונים.
5. מערכות בקרה : ביצוע החלטות נהיגה על ידי שליטה על ההיגוי, ההאצה והבלימה של הרכב.



איור 2- רכב אוטונומי חכם [2]

רמות אוטונומיה

בתחום הרכב האוטונומי תהליך הנהיגה האוטונומית היא טכנולוגיה ברכב המאפשרת ניווט כלי הרכב בכביש. רמות אוטונומיה מוגדרות עבור רמת מעורבות של תהליך הנהיגה של הרכב מול האדם. היתרונות בנהיגה אוטונומית, מלבד נוחות הנהיגה באים לידי ביטוי גם בהיבט הבטיחותי-מסייע בהפחתת התאונות בכבישים, רוב התאונות בכבישים נובעות מטעויות אנוש. רמות אוטונומיה לרכב הוגדרו ע"י איגוד מהנדסי הרכב SAE. רמות אוטונומיה מוגדרת בין 0-5, כאשר רמה 0 היא הרמה הנמוכה ביותר (נהיגה מלאה של האדם), ו-5 היא הגבוהה ביותר (נהיגה מלאה של הרכב, אוטונומיות מלאה).

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	

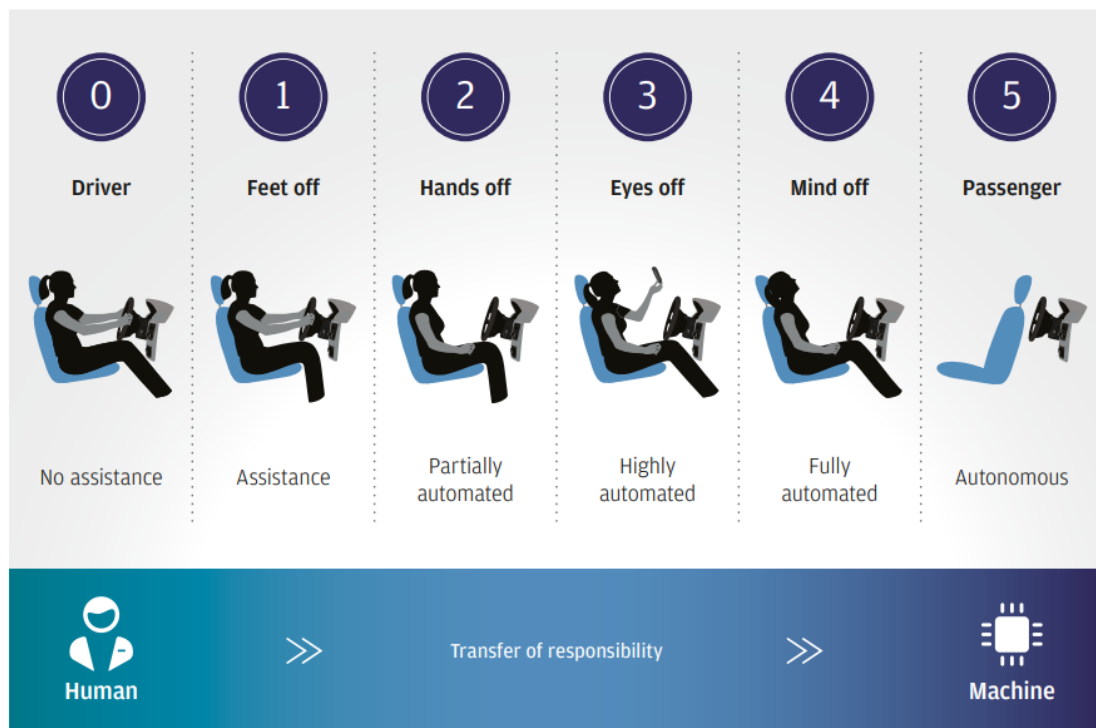
Copyright © 2021 SAE International.

	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	• automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR • adaptive cruise control	• lane centering AND • adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

איור 3- רמות אוטונומיה [3]

נציג את רמות האוטונומיה :

- רמה 0 (ללא אוטומציה): **הנהג** מבצע את כל משימות הנהיגה ללא עזרת **הרכב**.
- רמה 1 (סיוע לנהג): **הרכב** יכול לסייע בהיגוי או בהאצה/האטה, אך לא בשניהם בו זמנית, **הנהג** ללא שימוש קבוע בדוושות הרכב. דוגמאות: בקרת שיוט אדפטיבית וסיוע בשמירה על נתיב.
- רמה 2 (אוטומציה חלקית): **הרכב** יכול לשלוט הן בהיגוי והן בתאוצה/האטה בתנאים מסוימים, אך על **הנהג** להישאר מעורב ולפקח על הסביבה, ללא שימוש קבוע בהגה. דוגמאות: הטייס האוטומטי של טסלה והסופר קרוז של GM.
- רמה 3 (אוטומציה גבוהה): **הרכב** יכול לבצע את כל משימות הנהיגה בתנאים ספציפיים, אך **הנהג** חייב להיות מוכן להשתלט עליו כאשר יתבקש, ללא הסתכלות קבועה על הדרך.
- רמה 4 (אוטומציה מלאה): **הרכב** יכול לבצע את כל משימות הנהיגה ברוב הסביבות ללא התערבות אנושית, אך הוא עדיין עשוי לדרוש **נהג** אנושי בתנאים מסוימים, כגון מזג אוויר קשה או נסיעה בשטח, ללא ריכוז בנסיעה.
- רמה 5 (אוטונומיה): **הרכב** יכול לבצע את כל משימות הנהיגה בכל תנאי ללא כל התערבות אנושית, ללא **נהג**. רמה זו עדיין לא זמינה מסחרית.



Source: SAE International, 2016

איור 4- רמות אוטונומיה, אדם מכונה [2]

יתרונות וחסרונות

היתרונות של כלי רכב אוטונומיים :

1. בטיחות משופרת :

- הפחתת טעויות אנוש : טעות אנוש היא הגורם המוביל לתאונות דרכים. AVs יכולים להפחית תאונות על ידי ביטול גורמים כגון נהיגה מוסחת, עייפות ונהיגה לקויה.
- ציות עקבי לחוקי התעבורה : ניתן לתכנת AVs כך שיפעלו בהתאם לכל כללי התעבורה באופן עקבי, תוך צמצום הפרות ותאונות אפשריות.

2. יעילות מוגברת :

- זרימת תנועה מיטבית : AVs יכולים לתקשר אחד עם השני ועם תשתית תנועה כדי לייעל את זרימת התנועה, להפחית עומס ולמזער את זמני הנסיעה.
- יעילות דלק : נהיגה אוטונומית יכולה לייעל את דפוסי ההאצה והבלימה, להוביל ליעילות דלק טובה יותר ולהפחית פליטות.

3. נגישות משופרת :

- ניידות לכולם : AVs יכולים לספק ניידות לאנשים שאינם יכולים לנהוג, כגון קשישים, נכים, ואלה ללא רישיון נהיגה.
- נוחות : AVs מציעים את הנוחות של לא להתמקד בנהיגה, ומאפשרים לנוסעים לעסוק בפעילויות אחרות במהלך הנסיעה.

4. יתרונות כלכליים :

- עלויות הובלה נמוכות יותר : AVs יכולים להפחית את עלויות ההובלה באמצעות שיתוף נסיעות יעיל והפחתת הצורך בבעלות אישית על רכב.
- מודלים עסקיים חדשים : AVs מאפשרים מודלים עסקיים חדשים, כגון שירותי נסיעה אוטונומיים ושירותי משלוח, העלולים ליצור הזדמנויות עבודה חדשות וצמיחה כלכלית.

5. יתרונות סביבתיים :

- פליטות מופחתות : נהיגה אוטונומית יכולה להוביל לפליטות נמוכות יותר. בנוסף, AVs רבים מפותחים ככלי רכב חשמליים (EVs), התורמים לצמצום טביעות הפחמן.
- שימוש יעיל במשאבים : AVs יכולים להפחית את הצורך במקומות חניה ולאפשר ניצול טוב יותר של המרחב העירוני.

6. ניהול תנועה טוב יותר :

- תחזוקה חזויה : AVs יכולים לעקוב אחר מצבם ולהודיע על צרכי תחזוקה, למנוע תקלות ולהבטיח זרימת תנועה חלקה יותר.
- תיאום עם תשתית : אינטגרציה עם תשתית עיר חכמה יכולה לשפר את מערכות ניהול התנועה.

החסרונות של כלי רכב אוטונומיים :

1. בטיחות ואמינות :
 - כשלים טכניים : AVs מסתמכים על מערכות מורכבות שעלולות להיכשל, שעלולות להוביל לתאונות אם לא מנוהלות כראוי.
 - תנאים שליליים : AVs יכולים להיאבק בתנאי מזג אוויר שליליים כגון גשם כבד, שלג או ערפל, שעלולים לפגוע בביצועי החיישן.
2. סוגיות אתיות ומשפטיות :
 - דילמות אתיות : תכנות AVs לקבלת החלטות במצבים קריטיים, כגון תאונות בלתי נמנעות, מעלה שאלות אתיות לגבי תעדוף חיים.
 - אחריות ואחריות : קביעת אחריות משפטית במקרה של תאונה שבה מעורב AV היא מורכבת ודורשת מסגרות רגולטוריות ברורות.
3. קבלת הציבור :
 - אמון וקבלה : השגת אמון הציבור בטכנולוגיית AV היא מאתגרת, במיוחד לאחר תאונות בפרופיל גבוה הכוללות AVs.
 - התנגדות לשינוי : אנשים מסוימים עשויים להיות עמידים לאימוץ AVs עקב חששות לגבי בטיחות, אובדן עבודה או אובדן הנאה מנהיגה.
4. עקירת עבודה :
 - השפעה על התעסוקה : האימוץ הנרחב של AVs עלול להוביל לעקירת עבודה בתעשיות הקשורות לנהיגה, כגון נהגי מוניות, נהגי משאיות ואנשי משלוח.
5. דרישות תשתית :
 - שדרוג תשתיות : נדרשת השקעה משמעותית לשדרוג תשתית לתמיכה ב-AVs, כולל אותות תעבורה חכמים, נתיבים ייעודיים וקישוריות משופרת.
 - יכולת פעולה הדדית : להבטיח שמערכות AV ורכיבי תשתית שונים עובדים בצורה חלקה יחד היא אתגר גדול.
6. עלות ונגישות :
 - עלויות ראשוניות גבוהות : הטכנולוגיה שמאחורי AVs היא יקרה, ועלולה להפוך אותם לפחות נגישים לאנשים וקהילות בעלי הכנסה נמוכה יותר.
 - תחזוקה ותיקונים : AVs עשויים לדרוש תחזוקה ותיקונים מיוחדים, שעלולים לעלות ביוקר.
7. פרטיות ואבטחה :
 - פרטיות נתונים : AVs אוספים כמויות גדולות של נתונים, מה שמעורר חששות לגבי אופן השימוש וההגנה בנתונים אלה.
 - איומי אבטחת סייבר : AVs פגיעים לפריצות והתקפות סייבר, שעלולות לסכן את פעולתם ובטיחותם.

לסיכום, בעוד שרכבים אוטונומיים מציעים יתרונות פוטנציאליים משמעותיים, הם גם מציגים חסרונות ואתגרים רבים. האיזון בין היתרונות והחסרונות הללו יהיה קריטי ככל שטכנולוגיית AV ממשיכה להתפתח ולהשתלב בחברה.

תעשייה

כלי רכב אוטונומיים (AV) מחוללים מהפכה בתעשיות שונות וממשיכים להוות מוקד מרכזי של מחקר ופיתוח. נסקור מספר חברות בתעשייה הלוקחות חלק בעבודה מול מכוניות אוטונומיות לצורכיהן:

1. יצרני רכב:

- Waymo : ה-Waymo של Alphabet היא מובילה בטכנולוגיית נהיגה אוטונומית, המפעילה שירות נסיעה אוטונומי לחלוטין באזורים מסוימים. הם משתמשים בשילוב של לידאר, מכ"מ ומצלמות.

- טסלה : מערכות הטייס האוטומטי ומערכות נהיגה עצמית מלאה (FSD) של טסלה מציעות תכונות מתקדמות של סיוע לנהג, אם כי הן דורשות פיקוח נהג ואינן אוטונומיות לחלוטין.

- GM קרוז : קרוז של ג'נרל מוטורס בוחנת רכבים אוטונומיים בסביבות עירוניות ומטרתה להשיק שירות הסעות מסחריות.

2. שירותי הסעות ומשלוחים:

- Uber השקיעו בטכנולוגיית רכב אוטונומי, החברה שואפת לפתח רכבי שיתוף נסיעות אוטונומיים עבור הפלטפורמה שלה.

בתעשייה עבור כל חברה תהליך הביצוע ("איך" ובעזרת "מה") אינו מפורסם ואינו חשוף לקהל אך האפשרויות ידועות הן מבחינת שימוש בסנסורים והן בשימוש באלגוריתמים השונים.

ישנם מחקרים רבים בתחום טכנולוגיית הרכב האוטונומי, הן חיישנים ופיתוחם והן אלגוריתמים וטכנולוגיות שונות על מנת להגיע למערכות ובשאיפה לרכב אוטונומי מלא.

1. מוסדות אקדמיים :

אוניברסיטאות כמו MIT וסטנפורד נמצאות בחזית מחקר הרכב האוטונומי, הן בוחנות תחומים כמו ראייה ממוחשבת, למידת מכונה ורובוטיקה.

2. הממשלה והמגזר הציבורי :

ממשלות ברחבי העולם מממנות פרויקטי מחקר לקידום טכנולוגיית AV והקמת מסגרות רגולטוריות. למשרד התחבורה האמריקאי ולאיחוד האירופי יש מספר יוזמות התומכות במחקר AV.

3. פרויקטים משותפים :

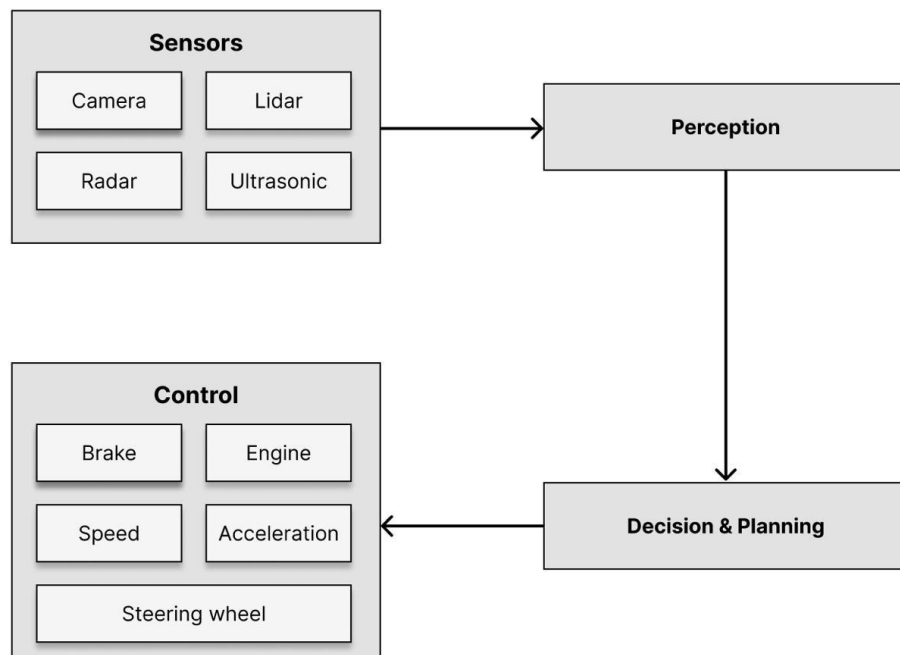
פרויקטים משותפים גרמו להתקדמות משמעותית בנהיגה אוטונומית על ידי חיבור בין חוקרים מובילים וחברות לפתרון אתגרים מורכבים.

כמה היבטים כלליים שחוקרים מתמקדים בהם :

- שילוב חיישנים : חוקרים עובדים על שילוב חיישנים שונים, כגון חיישנים אולטראסוניק, מצלמות, לידאר ומכ"מ, כדי לספק נתונים מקיפים על סביבת הרכב.
 - תפיסת סביבה : אלגוריתמי ראייה ממוחשבת משמשים לעיבוד נתוני חיישנים וליצירת תפיסה מפורטת של הסביבה. זה כולל זיהוי עצמים, הולכי רגל, כלי רכב אחרים והבנת הגיאומטריה של הסביבה.
 - זיהוי ומעקב אחר אובייקטים : לרוב משתמשים באלגוריתמים של למידת מכונה לזיהוי ומעקב אחר אובייקטים מדויקים. אלגוריתם זה עוזר לרכב לזהות ולעקוב אחר מכשולים, הולכי רגל וכלי רכב אחרים, חיוניים לנסיעה בטוחה.
 - מיפוי : מיפוי בהבחנה גבוהה (HD) משמש כדי לספק מידע מפורט על הכביש, מקומות החניה, רמזורים ותשתיות אחרות.
 - מערכות בקרה : אלגוריתמי בקרה שולטים בתנועות הרכב, כולל היגוי, האצה ובלימה, כדי לבצע את הנסיעה בצורה מדויקת ובטוחה.
 - שיקולי בטיחות : החוקרים מתמקדים ביישום אמצעי בטיחות, כגון הימנעות מהתנגשות ובלימת חירום, כדי להבטיח שמערכות פועלת בבטחה בתרחישים שונים.
 - למידת מכונה ויכולת הסתגלות : חלק מהמחקרים כוללים שימוש בלמידת מכונה כדי לאפשר למערכת להסתגל לסביבות השונות וללמוד מנתונים מהעולם האמיתי.
- תהליך המחקר והפיתוח לא נגמר, העובדים בתחום משכללים ומשפרים ללא הרף את האלגוריתמים הללו באמצעות סימולציות ובדיקות בעולם האמיתי כדי לשפר את הביצועים והבטיחות הכוללים של המערכות. התחום הוא דינמי ומחקר מתמשך תורם לאבולוציה של טכנולוגיות נהיגה אוטונומית.

סקירה והשוואה של חיישנים שונים ברכב אוטונומי

את מערכת הרכב האוטונומי ניתן לחלק לארבע קטגוריות עיקריות כפי שהיא מוצגת באיור 5. הרכב מכיר את העולם באמצעות חיישנים (Sensors) רבים ושונים המורכבים על הרכב, אלו הם רכיבי חומרה שאוספים נתונים על הסביבה. המידע מהחיישנים מעובד בבלוק תפיסה (Perception) שבו מקבלים את נתוני החיישנים ומעבדים אותם למידע משמעותי- היתוך מידע. בבלוק תכנון והחלטות (Decision & Planning) משתמשים בפלט מבלוק התפיסה לבצע החלטות ולתכנן התנהגות ומסלולים. בבלוק הבקרה (Control) נבטיח שהרכב עוקב אחר המסלול שמתקבלת כפלט מבלוק התכנון ושולח פקודות בקרה ושליטה לרכב [4].



איור 5- דיאגרמת בלוקים של מערכת רכב אוטונומי

החיישנים בכלי רכב אוטונומיים ממלאים תפקיד מכריע, הם השלב הראשון בתהליך והם משמשים לאיסוף נתונים המנותחים על ידי המחשב ברכב האוטונומי ומשמשים לשליטת ההיגוי, הבלם והמהירות של הרכב. בנוסף לחיישני הרכב, המידע ממפות הסביבה המאוחסנות בענן ונתונים שהועלו מהמכוניות האחרות משמשים אף הם על מנת לקבל החלטות לגבי שליטה ברכב. ברכב אוטונומי יותקנו מספר חיישנים שכל סוג חיישן מספק מידע אחר, מיקום החיישנים והסוגים השונים מאפשרים קבלת מידע אמיתי, מקיף ומידיי על סביבת הרכב. ע"י היתוך המידע המגיע מהחיישנים נקבל תמונת מצב כוללת יותר המתאימה ליותר תרחישים.

נסקור את החיישנים הבאים :

- מצלמה - Camera
 - מכ"מ - Radar
 - לידאר - LiDAR
 - חיישנים קוליים - Ultrasonic
- בנוסף ברכב אוטונומי יש יכולות להתחבר ולשתף את המידע המתקבל.

נסקור את סוגי התקשורות לפי טווחים :

- תקשורת טווח קצר - Bluetooth, BLE, ZigBee, UWB
- תקשורת טווח בינוני - DSRC, Wi-Fi
- תקשורת טווח ארוך - C-V2X, 5G-NR

חיישנים

ישנם מספר סוגים של חיישנים הנפוצים בכלי רכב אוטונומיים, כל אחד עם החוזקות והחולשות שלו [4] [5] [6] [7]. נסקור כאן את הסוגים השונים:

מצלמה

מצלמות Cameras, מצלמות היו אחד מסוגי החיישנים הראשונים ששימשו ברכבים אוטונומיים והן כיום הבחירה העיקרית של יצרני הרכב. לרכבים החדשים יש עשרות מצלמות שונות המותקנות על כלי רכב, מצלמות מאפשרות לרכב אוטונומי ממש לדמיין את סביבתו. מצלמה היא חיישן הכרחי בנהיגה אוטונומית, יש אינסוף שימושים עבור יישומים לנהיגה עצמית המקבלים כקלט את נתוני המצלמות ברכבים. ניתן להשתמש במצלמות גם בתוך הרכב לאינטראקציה בין אדם למכונה. המצלמות מזהות נתונים חזותיים כמו תמרורים, סימון נתיבים וכלי רכב אחרים. מצלמות המותקנות בקדמת הרכב מאפשרות למכונית לראות לאן היא נוסעת, מצלמה בחלק האחורי מסייעת בנסיעה לאחור. מצלמות בצידי הרכב מימין ומשמאל לרכב מאפשרות מבט של 360 מעלות סביב הרכב, מאפשרת לראות את תמונת המציאות של סביבת הרכב, מספקת מבט עילי על הסביבה הקרובה שלו. מצלמות לוכדות מידע ויזואלי בצורה של תמונות או סרטונים.

דוגמאות:

- מצלמות הפונות קדימה לתכונות כמו אזהרת סטייה מנתיב, זיהוי תמרורים וזיהוי הולכי רגל.
 - מצלמות אחוריות לסיוע בחניה ונסיעה לאחור.
 - מצלמות סראונד או 360 מעלות כדי לספק מבט ממעוף הציפור של סביבת הרכב.
- יתרונות:
- רזולוציה: מספק תמונות ברזולוציה גבוהה, חיוניות לסיווג וזיהוי אובייקטים. יכול ללכוד צבע, יכולת חשובה בכדי לזהות עצמים.
 - חסכוני: בדרך כלל זול יותר מלידאר ומרדאר.
- חסרונות:
- מזג האוויר: הביצועים עלולים להיפגע בתנאי מזג אוויר גרועים ובסביבות עם תאורה חלשה.
 - טווח: הטווח האפקטיבי קצר יותר בהשוואה ללידאר ולרדאר.
 - עיבוד: דורש כוח עיבוד משמעותי לניתוח תמונה בזמן אמת.

מכ"מ (מגלה כיוון ומרחק) – Radar (Radio Detection and Ranging).
 חיישני מכ"מ פולטים גלי רדיו, הגלים יוצאים מהמכ"מ מגיעים לעצמים בסביבה וחוזרים חזרה.
 הזמן שלוקח לגלים לחזור עוזר לקבוע את המרחק והמהירות של עצמים בייחס למיקום החיישן.
 המכ"מ משתמש באפקט הדופלר כדי למדוד מהירות ישירות. אפקט דופלר הוא תופעת שינוי
 התדירות הנצפית של גל, כתוצאה מתנועה יחסית בין מקור הגל לצופה. אפקט דופלר חשוב
 לאיחוי חיישן מכיוון שהוא נותן את המידע על המהירות כפרמטר מדידה עצמאי והוא גורם
 לאלגוריתמי ההיתוך להתכנס הרבה יותר מהר.
 מכ"מ לטווח ארוך הוא מכ"מ מיקרוגל במהירות 77 גיגה-הרץ, בעל רזולוציה נמוכה אך יכול
 למדוד מהירות ולזהות כלי רכב ומכשולים במרחק של 200 מ'.
 מכ"מ לטווח קצר/בינוני הוא טכנולוגיה בוגרת וזולה בפסי 24 גיגה-הרץ ו-76 גיגה-הרץ. חיישן זה
 יכול לזהות מהירות ומרחק, אך אלומות רחבות ואורכי גל ארוכים מגבילים את הרזולוציה
 ומייצרים אותות חזרה מורכבים.
 למרות שהמכ"מ יעיל יותר ממצלמות ולידאר במצבים נבחרים כמו מזג אוויר גרוע, לרדאר יש
 פחות דיוק זוויתי ומייצר פחות נתונים מאשר לידאר. בניגוד למצלמות, לרדאר אין הזנות וידאו
 עתירות נתונים לעיבוד, אך יש לו מהירויות עיבוד נמוכות יותר הנדרשות לטיפול בפלט נתונים
 בהשוואה ללידאר ומצלמות.
 מכ"מ יכול לשמש ללוקליזציה על ידי הפקת מפות מכ"מ של הסביבה, יכול לראות מתחת לכלי
 רכב אחרים ולזהות מבנים וחפצים שהיו מעורפלים אחרת. מבין כל החיישנים במכונית, המכ"מ
 מושפע הכי פחות מגשם או ערפל ויכול להיות בעל שדה ראייה רחב, כ-150 מעלות, או טווח ארוך,
 מעל 200 מטרים. בהשוואה ללידארים ומצלמות, למכ"מים יש רזולוציה נמוכה, במיוחד בכיוון
 האנכי.

דוגמאות:

- בקרת שיוט אדפטיבית (ACC) לשמירה על מרחק מעקב בטוח מהרכב שלפניו.
- ניטור נקודה עיוורת (BSM) לאיתור כלי רכב בנתיבים סמוכים.
- אזעקת תנועה חוצה אחורית כדי להתריע על כלי רכב שמתקרבים מהצדדים בעת נסיעה לאחור.

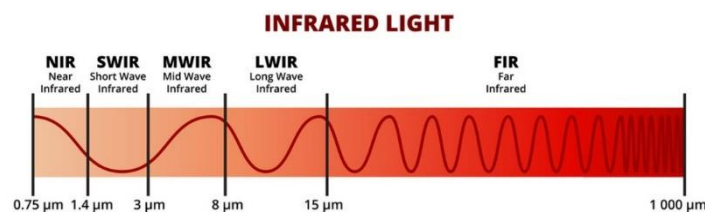
יתרונות:

- מזג אוויר: מתפקד היטב בתנאי מזג אוויר שונים, כולל גשם, ערפל ושלג.
 - טווח: מסוגל לזהות עצמים ממרחקים ארוכים, לרוב עד 250 מטר.
 - מדידה: יכול למדוד את המהירות של עצמים נעים במדויק.
- חסרונות:
- רזולוציה: רזולוציה נמוכה יותר בהשוואה ללידאר ומצלמות, וכתוצאה מכך מיפוי סביבתי פחות מפורט.

לידאר

המילה לידאר בלועזית נוצרה משילוב המילים אור (Light) ורדאר (Radar), ומבטאת את קיצור המילים "גילוי אור ומדידתו" LiDAR (Light Detection And Ranging). לידאר היא טכנולוגיית מדידת מרחק על ידי הארת המטרה בקרן לייזר ומדידת הזמן שלוקח לקרן האור לחזור למקלט. לידאר משתמש במערכת סריקת לייזר עם יחידת מדידה אינרציאלית (IMU) ומקלט GNSS. כלומר, הוא מוציא קרן לייזר, פולסי אור, כדי למדוד את המרחק מיחידת לייזר לאובייקטים אחרים. פולס האור מגיע לאובייקט במרחב וחוזר למקלט, כך הוא מתגלה על ידי חיישן בלידאר. מחשב המחובר ליחידה IMU מודד את הזמן בין הפולס הראשוני להחזרת האור ובאמצעות מהירות האור מחשב את המרחק שעבר האור. יחידות סריקה של מערכת LiDAR יכולות לירות מאות אלפי פולסים בשנייה. ניתן לעבד כל אחת ממדידות הלייזר היוצאות, או החוזרות, להדמיה תלת מימדית המכונה 'ענן נקודות'. כך מידע זה משמש ליצירת מפה תלת מימדית מפורטת של הסביבה. יחידות סריקה סיבובית של מערכת LiDAR - מסתובב במהירות מסוימת ומשתמש בסריקה סיבובית מכנית של 360° בכיוון האופקי על פני שדה הראייה כדי לאסוף מידע דינמי ע"י שליחת קרן לייזר בפולסי אור מוחזרים למקלט על ידי העצמים במרחב. ישנו סוג נוסף, לידאר עם מראות MEMS. מראת פליטת ה-MEMS יכולה לשלוט על זווית פליטת הלייזר ב- 360° . בהפעלת הלידאר המראות רוטטות וכך יש אפשרות לשנות את זווית קרני הלייזר לסריקה, במקום להזיז את קרן הלייזר באופן מכני.

קרן הלייזר פועלת בגלי אור (אורך הגל שבו משתמשים למדידה מותאם לעצם הנמדד). בלידאר לרכבים אוטונומים בדרך כלל משתמשים באורך גל של 905 ננו מטר בטווח NIR או 1550 ננו מטר בטווח SWIR. לייזרים IR אלה הוכחו כאמינים ואפשריים מבחינה כספית עבור יצרניות הרכב.



איור 6- אינפרא אדום, אורכי גל

ללידאר יש רזולוציה מרחבית גבוהה בהרבה מזו של מכ"מ בגלל קרן הלייזר הממוקדת יותר, המספר הגדול יותר של שכבות סריקה בכיוון אנכי והצפיפות הגבוהה של נקודות לידאר לכל שכבה. סוג זה של לידארים אינו יכול למדוד את מהירותם של עצמים ישירות וצריך להסתמך על המיקום השונה בין שתי סריקות או יותר. לידארים מושפעים יותר מתנאי מזג האוויר ומלכלוך על החיישן.

לידארים יכולים למפות סביבה סטטית וכן לזהות ולזהות כלי רכב נעים, הולכי רגל וחיות בר. כרגע המגבלה היא עלות גבוהה, עם זאת, הטכנולוגיה מתקדמת בכיוון להקטנת העלות וגודל החיישן.

דוגמאות :

- מיפוי מדויק ומידול סביבתי.
- זיהוי ומעקב אחר אובייקטים.
- תפיסה מוגברת בתרחישים מורכבים.

יתרונות :

- דיוק : יכול למדוד מרחקים במדויק ובדיוק גבוה, לספק מפות תלת מימד מפורטות.
- טווח : יעיל לטווחים ארוכים, לרוב עד 100-200 מטר.
- כיסוי : יחידות לידאר מסתובבות יכולות לספק תצוגה מלאה של 360 מעלות מסביב לרכב.

חסרונות :

- עלות : עלות גבוהה של יחידות לידאר, אם כי המחירים יורדים עם הזמן.
- מזג האוויר : הביצועים יכולים להיות מושפעים מתנאי מזג אוויר קשים כמו ערפל, גשם ושלג.
- גודל ומשקל : גדול וכבד יותר בהשוואה לכמה חיישנים אחרים.

חיישנים קוליים

חיישני קוליים Ultrasonic Sensors, חיישנים אלה משתמשים בעקרונות של אולטרסאונד כדי לזהות עצמים סביב הרכב. בדומה לאופן שבו עטלפים משתמשים בהד, חיישנים אלה פולטים גלי קול בתדר גבוה שבני אדם אינם יכולים לשמוע טווח תדרים 20-40 kHz. כאשר הגלים הללו פוגעים באובייקט, הם קופצים חזרה לחיישן. הזמן שלוקח לגל לחזור מאפשר לחיישן לחשב את המרחק בינו לבין האובייקט. לחיישנים אלה טווח מוגבל מאוד בדרך כלל פחות מ-3 מטר. לכן כדי לקבל תצוגה בשדה ראייה FoV מלא נצטרך מספר חיישנים. חיישנים אולטרסוניים יכולים לעבוד טוב בתנאים מזג אוויר גרועים ויכולים לזהות גם עצמים נייחים וגם נעים.

דוגמאות :

- מיפוי מדויק ומידול סביבתי.
- זיהוי ומעקב אחר אובייקטים.
- תפיסה מוגברת בתרחישים מורכבים.

יתרונות :

- עלות : זול וקל לשילוב.
- זיהוי טווח קרוב : מצוין לזיהוי עצמים קרובים, בדרך כלל בטווח של מטרים ספורים.

חסרונות :

- טווח : טווח קצר מאוד, לא מתאים לניווט במהירות גבוהה.
- רזולוציה : רזולוציה נמוכה, אין אפשרות לספק מידע מפורט על הסביבה.

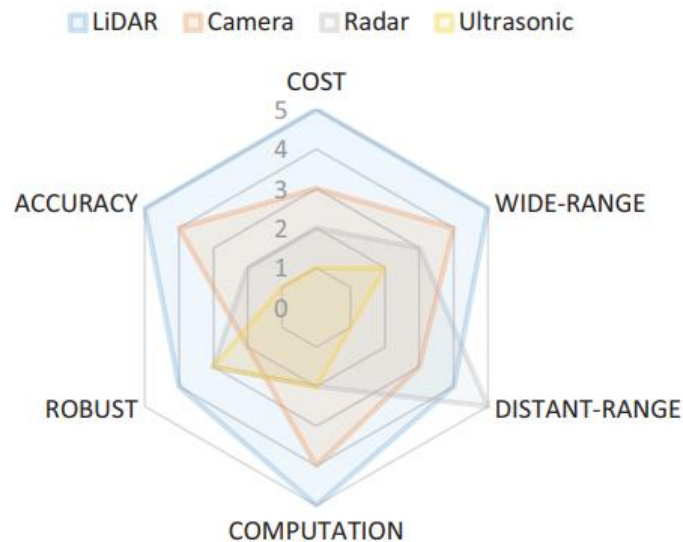
השוואת חיישנים

לכל אחד מהחיישנים האלו יש את החוזקות והמגבלות שלו, אבל על ידי שילוב הנתונים שלהם, כלי רכב מסוגלים לקבל תצוגה טובה, מיידית ומקיפה יותר של 360 מעלות של סביבתם.

הפלט של החיישנים השונים הם קלט הנתונים המועברים ליחידת עיבוד מרכזית המשתמשת באלגוריתמי היתוך חיישנים כדי להבין טוב יותר את הרכב וסביבתו כדי לקבל החלטות בצורה הטובה ביותר.

לדוגמה באיור 7, בעוד שמצלמות מיומנות בסיווג עצמים, הן עשויות להתקשות להעריך מרחק, במיוחד בתנאי מזג אוויר גרועים. במקרים אלה נשתמש בנתוני הלידאר והמכ"מ, חיישנים אלו מצטיינים בהערכת מרחק. המערכת יכולה לקבל החלטות מדויקות יותר על ידי מיזוג הנתונים מכל החיישנים האלו מה שמוביל לנהיגה בטוחה ויעילה יותר.

פרמטרים : עלות, דיוק, מזג אוויר, חישוב, טווח מרחק, טווח זווית.



איור 7- חיישנים בנהיגה אוטונומית [5]

באיור 8, נציג את קלט המידע שמגיע מהחיישנים השונים.



איור 8- תצוגת מידע מהחיישנים [6]

מסקנות השוואת חיישנים

- דיוק וטווח: לידאר מצטיין במיפוי סביבתי, דיוק ואורך טווח, מה שהופך אותו לאידיאלי למיפוי 3D מפורט. רדאר מציע גם זיהוי לטווח ארוך אך ברזולוציה נמוכה יותר. מצלמות מספקות תמונות ברזולוציה גבוהה אך בעלות טווח מוגבל ורגישות לתנאי תאורה.
 - ביצועי מזג אוויר: הרדאר מתגבר על חיישנים אחרים בתנאי מזג אוויר קשים. לידאר ומצלמות רגישות יותר לגורמים סביבתיים כמו ערפל, גשם ושלג.
 - עלות ומורכבות: מצלמות וחיישנים קוליים חסכוניים ופשוטים יחסית לשילוב. לידאר, למרות שהוא יעיל מאוד הוא יקר ומורכב יותר.
 - מקרי שימוש: לכל סוג חיישן יש יישומים ספציפיים שבהם הוא הכי טוב. לדוגמא:
 - לידאר מצוין ליצירת מפות בחדות גבוהה
 - מכ"מ לזיהוי ומדידת מהירות של עצמים מרוחקים
 - מצלמות לזיהוי וסיווג עצמים
 - חיישנים קוליים לזיהוי מטווח קרוב בזמן חניה
- בכלי רכב אוטונומיים, שילוב של חיישנים אלה משמש בדרך כלל למינוף החוזקות המשלימות שלהם ולספק מערכת תפיסה חזקה ואמינה. גישה מרובת חיישנים זו מבטיחה שהרכב יכול לפעול בצורה בטוחה ויעילה במגוון רחב של תנאי נהיגה.

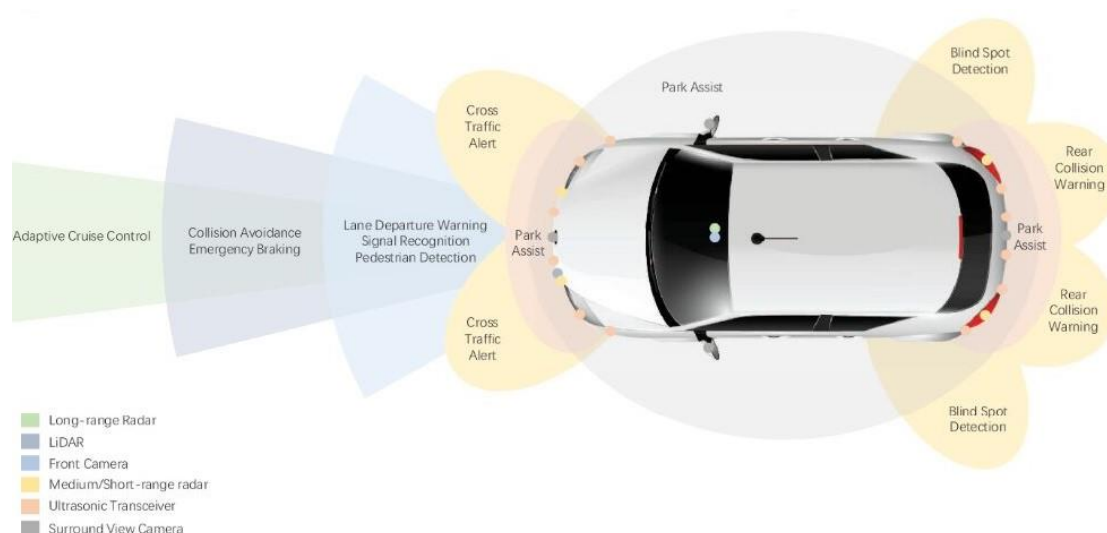
טבלת 1, מסקנות שהתקבלו אחרי השוואת יכולות בין החיישנים:

סוג נתונים	עלות	רזולוציה	מזג אוויר	טווח	זמן עיבוד
מצלמה	תמונות/וידאו	נמוכה	גבוה, צבע	נמוך	בינוני
(רדאר)	מהירות/מרחק	בינונית	נמוך	גבוה	נמוך
מכ"מ					
לידאר	מרחק	גבוהה	בינוני	גבוה	נמוך
קולי	מרחק	נמוכה	נמוך	גבוה	נמוך

טבלה 1- השוואת יכולות בין חיישנים

היתוך חיישנים

היתוך חיישנים הוא גישה לשילוב נתונים המועברים ממקורות שונים כך שהמידע המתקבל בטוח יותר ממה שהיה אפשרי כאשר נעשה שימוש במקורות אלו בנפרד, זה חשוב במיוחד כאשר סוגים שונים של מידע מחיישנים שונים משולבים יחד. לדוגמה באיור 9, מוצג ארכיטקטורת רכב אוטונומי המכיל מספר חיישנים במקומות שונים ברכב שכל אחד תורם לקבלת מידע.



איור 9- ארכיטקטורת מערכת רכב אוטונומי [5]

ברכב האוטונומי חשוב להצטייד במצלמה על מנת לשכפל ראייה אנושית, אך המידע על מרחק המכשולים יהיה הטוב ביותר שנרכש באמצעות החיישנים כמו לידאר או מכ"מ. מסיבה זו, היתוך חיישנים של מצלמה עם נתוני לידאר או מכ"מ חשוב מאוד מכיוון שישנם כאלה משלימים. מצד שני, שילוב מידע מהלידאר וממכ"מ יספק מידע וודאי יותר לגבי מרחק המכשול לפני הרכב או מרחק כללי של העצמים בסביבה.

בשלב זה של היתוך המידע נקבל קלטים מסוגים שונים נעבור תהליכי עיבוד מידע כדי להגיע לפלטים ולמידע הכי מהימן והכי מלא עבור הרכב האוטונומי, כיום משתמשים הרבה בתהליכי בינה מלאכותית AI ובפרט למידת מכונה ML. ברכב אוטונומי ניתן לבצע היתוך חיישנים עבור אינסוף מטרות ע"י שיטות שונות הקיימות היום ושעוד יפותחו בעתיד.

דוגמאות להיתוך חיישנים [4]:

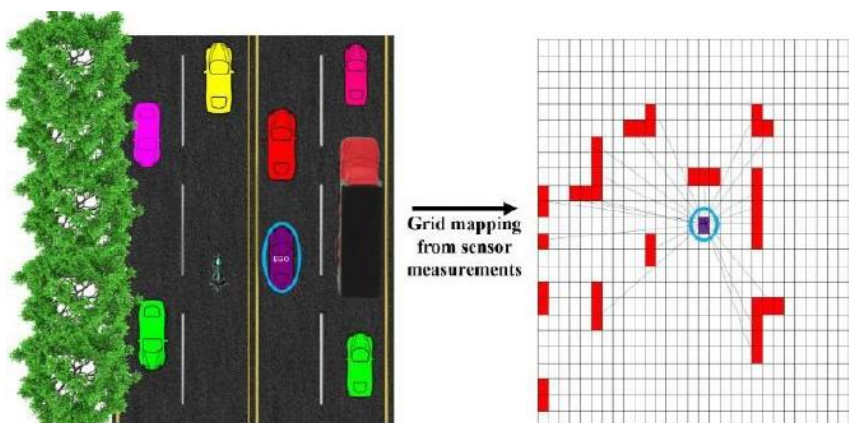
א. היתוך חיישנים לזיהוי אובייקטים תלת ממדיים

היתוך חיישנים מנתוני מצלמה ולידאר נותן פתרון אופטימלי מבחינת מורכבות החומרה של המערכת, רק שני סוגי חיישנים משולבים, וכיסוי המערכת, מצלמה לראייה ולידאר לזיהוי מכשולים משלימים זה את זה. כאן נתוני התמונה מתמזגים עם נתוני ענן נקודות תלת-ממדיים.

גישות חדשניות להשגת היתוך חיישנים באמצעות רשתות עצביות נוטות לטפל בכל אות ברשת עצבית אחרת, ולאחר מכן לשלב את הייצוגים המתקבלים לרשת עצבית חדשה ולקיים היתוך מידע ברמה גבוהה.

ב. היתוך חיישנים למיפוי רשת תפוסה

מיפוי רשת תפוסה משמש לניווט ולוקליזציה של כלי רכב אוטונומיים בסביבות דינמיות, איור 10. לפתרון בעיה זו, נעשה שימוש בהיתוך חיישנים ממצלמות ולידאר. היתוך חיישנים מעבד כל חיישן משלים לאחר, כאשר המצלמה מספקת מידע דו-ממדי ברמה גבוהה כמו צבע, עוצמה, צפיפות, מידע קצה ולידאר מספקת נתוני ענן נקודות תלת-ממדיים.

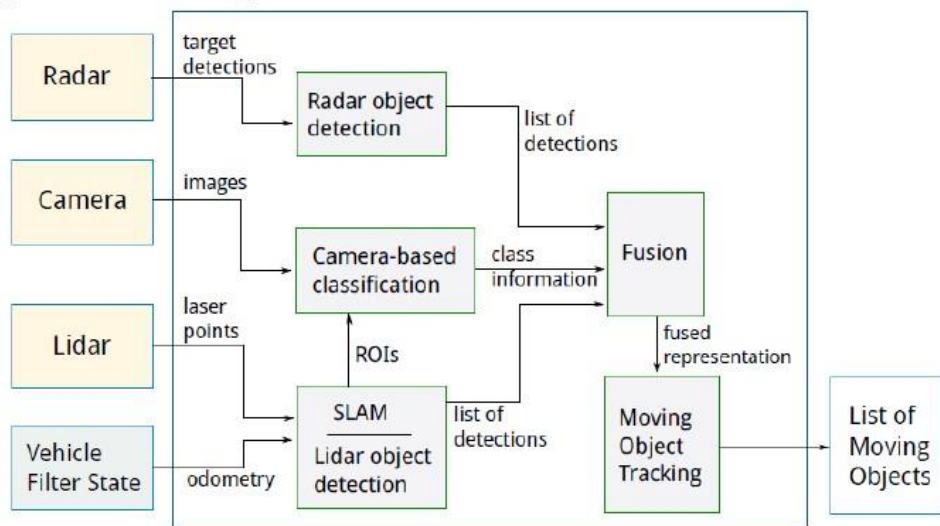


איור 10- גריד מיפוי מיקום תפוס [4]

ג. היתוך חיישנים לזיהוי ומעקב אחר אובייקט נע

זיהוי ומעקב אחר אובייקטים בתנועה הם אחד ההיבטים המאתגרים ביותר של תחום הרכב האוטונומי. כיוון שפתרון בעיה זו הוא חיוני לנהיגה אוטונומית, יכולת הדירוג והביצועים של הפתרון חשובים מאוד, לכן לצורך פתרון בעיה זו נוהגים להשתמש בכל החיישנים הקיימים שמותקנים על הרכב- היתוך חיישנים של נתוני מצלמה, מכ"מ ולידאר.

איור 11, מציג גישה חדשה בתחום זה מבצעת זיהוי ברמת הראדר והלידאר, לאחר מכן שולחת אזורים מעניינים מענני הנקודות של הלידאר לתוך המודל סיווג מבוסס מצלמה, ולאחר מכן ממזגת את כל המידע הזה יחד. המידע ממודל ההיתוך מזין את מודול המעקב, לרשימת העצמים הנעים. על ידי הכללת סיווג האובייקטים מזיהוי חיישנים מרובים.



איור 11- מערכת תפיסת אובייקט נע ע"י ריבוי חיישנים [4]

חיבוריות

חיבור כלי רכב אוטונומיים (AVs) זה לזה ולתשתית הוא חיוני לשיפור הבטיחות, היעילות והביצועים הכוללים שלהם. טכנולוגיות תקשורת שונות מפותחות ומיושמות כדי לאפשר שיתוף מידע בין רכבים. מכוניות מחוברות עוזרות להשיג בטיחות גבוהה יותר בכביש על ידי מתן אפשרות לנהגים להישאר מעודכנים במצב הנהיגה הנוכחי. עבור מכוניות בנהיגה עצמית, אנשים מצפים שהן יתוכננו וילמדו לקבל החלטות חכמות התומכות בסביבה בטוחה על הכביש. בנוסף קבלת חווית נהיגה אופטימלית ע"י תכנון המסלול הטוב ביותר, חיזוי פקקי תנועה וחיזוי המועד הטוב ביותר לתזמן נסיעה.

תהליך החלפת הנתונים הוא פשוט יחסית עבור יצרנים וספקי רכב רבים, אך החלק התחרותי בארכיטקטורה הוא איחוד, אבטחה ופרטיות הצרכן. עם התכונות המחוברות הללו, המודולים פותחים נקודות כניסה רבות להאקרים פוטנציאליים. זה יכול להוביל לאובדן רכב ואולי חיים, האקרים עלולים לגרום לתאונות ולשלוט מרחוק בכלי רכב. לכן, נרצה להמשיך ולהשאיר את הרכב מחובר ועדכני ונשתמש בעדכוני OTA כדי להעביר לרכב עדכוני תוכנה למודלים של הרכב, מתיקוני באגים, תיקוני אבטחה וכן יכולות חדשות.

חלק מהפונקציות של מכונית מחוברת כוללות את הדברים הבאים:

- סיוע אוטומטי בצד הדרך במקרה של תאונות
- שיחות מידע טלמטיקה (לדוגמא מיקום הרכב) לספקי שירותי חירום
- מעקב אחר רכב גנוב
- שירות מרחוק (הפעלה/כיבוי של רכב, נעילת/ביטול נעילת רכב)
- עדכוני רכב
- הזרמת וידאו / גלישה באינטרנט

עדכוני Over-the-Air (OTA) יכולים לשנות קוד במודולים של הרכב אשר מעדכנים את התוכנה שלהם לעשות דברים חדשים [15].

פתרון זה מאפשר עדכונים אלחוטיים למערכות הבקרה של הרכב מאובטחות ומאומתות. בדומה לאופן שבו סמארטפונים והתקנים מחוברים אחרים מקבלים עדכונים, רכבים אוטונומיים יכולים להוריד ולהתקין תוכנה מרחוק עם עדכוני OTA. תיקוני באגים, תיקוני אבטחה ותכונות או יכולות חדשות יכולים להיכלל בשדרוגים אלה. עדכוני OTA הם חיוניים עבור כלי רכב אוטונומיים מכיוון שהם מאפשרים תחזוקה ושיפור שוטפים של המערכת מבלי לדרוש את המכונית להילקח פיזית לשירות. בנוסף, במקרה של פגיעות אבטחה או בעיה אחרת, ניתן להשתמש בעדכוני OTA כדי להפיץ ולפרוס עדכונים נחוצים במהירות. העדכונים הרגילים בדרך כלל מחזוריים פעם בתקופה שנקבעה מראש ע"י החברה. עדכונים דחופים, קריטיים כמו תיקוני אבטחה, יעלו ברגע שיהיו מוכנים. העדכונים מגיעים כשידור OTA על גבי רשתות סלולריות \ תשתיות V2X. העדכון נשלח בהתחלה לשרת אספקת תוכנה SPS והם משודרת למודלים פנימיים ברכב VTMs. תחילה מורידים את העדכון, מאמתים אותו ומאחסנים אותו במקום ביניים זמני עד להתקנתו. בכל שלב, אימות השלמות, ההעברה והאחסון מועדים להתקפות שונות. רוב עדכוני ה-OTA עבור כלי רכב אוטונומיים מתוכננים להתרחש בן לילה או בזמנים אחרים שבהם הרכב אינו בשימוש. דבר זה מבטיח שהתקנת העדכון לא תפריע לפעולה הרגילה של הנהג של הרכב. אם עדכון ה-OTA הופך זמין בזמן שהרכב בשימוש, תהליך העדכון בדרך כלל יושהה עד לסיום הנסיעה הנוכחית, העדכון יורד ברקע ויותקן בהזדמנות המתוכננת הבאה. במקרים נדירים של עדכוני חירום בעיות בטיחות או אבטחה קריטיות, העדכון עלול להפריע לפעולת הרכב הרגילה, במערכת הבקרה תינתן הודעה לנהג על עדכון דחוף וכי יש לעצור את הרכב בבטחה.

בקרת משתמש : תינתן התראה של עדכון קיים במערכת, לנהג יש בדרך כלל שליטה על תהליך עדכון OTA, כגון היכולת לדחות או לתזמן עדכונים לזמן נוח יותר. עבור מכשירים המחוברים למערכת המידע והבידור או הקישוריות, היכולת להיכנס לתוכנת המערכות דרך יחידת העיבוד ECU ("המוח") יכולה להוביל להחלפת טכניקות הונאה עם תוכנות זדוניות. ביחידת העיבוד מתבצעות כל התהליכים המרכזיים מקליטת הנתונים ועיבודם ועד לתהליך קבלת ההחלטות לכן יחידת העיבוד מכונה גם "המוח" בדומה לגוף האדם.

ככל שפונקציונליות הרכב הולכת וגדלה, כך גם כמות מודולי החומרה והתוכנה בתוך הרכב. מגמה זו מגבירה את מורכבות התוכנה, העלות והמשקל של הרכב.

להלן סקירה והשוואה של מודלים וטכנולוגיות תקשורות עיקריות:

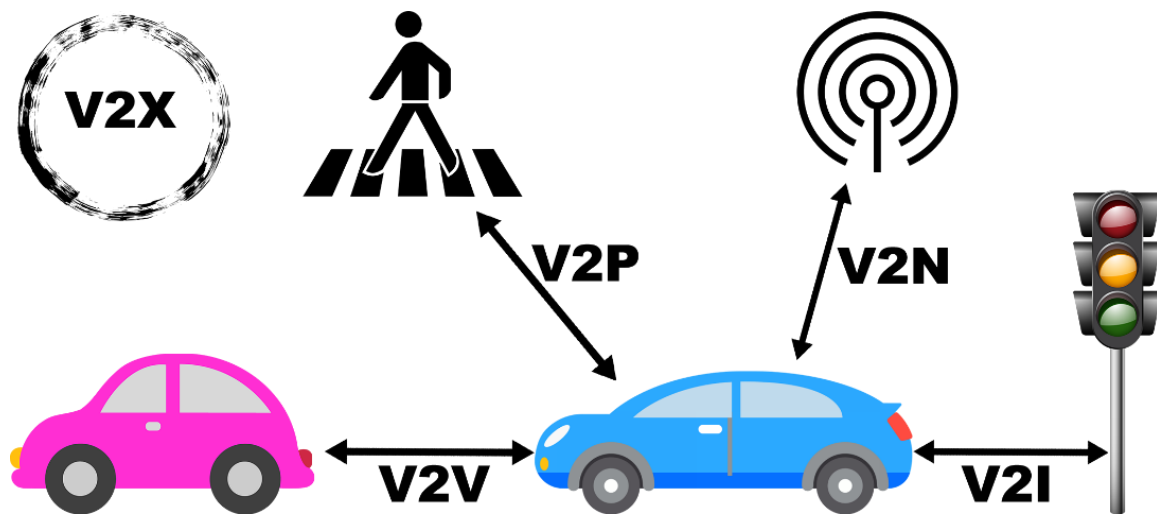
מודל תקשורת

בחלק זה נסקור את מודל התקשורת שהתקשורות חיבוריות משתמשות, המודל נקרא V2X Vehicle-to-Everything [1].

V2X הוא מודל תקשורת המקיף מגוון טכנולוגיות המשמשות להקלת התקשורת בין כלי רכב וגופים אחרים כגון תשתיות, הולכי רגל ורשתות. המודל מגדיר את סוגי האינטראקציות (מתואר באיור 12: V2V, V2I, V2P, V2N) ואת המטרות של תקשורת אלו, כגון שיפור הבטיחות, היעילות וחווית הנהיגה הכוללת.

סוגי האינטראקציות במודל V2X:

1. תקשורת V2V, Vehicle-to-vehicle (מרכב לרכב):
 - תיאור: מאפשר לכלי רכב לשתף מידע, מידע מרכב אחד מועבר לרכב אחר. כגון מהירות, מיקום וכיוון זה עם זה.
 - לדוגמה: במקרה של תאונה, נהגים אחרים יכולים להיות מודעים למצב חירום זה.
 - יישומים: הימנעות מהתנגשות, סיוע בשינוי נתיב, בקרת שיוט אדפטיבית שיתופית.
 - יתרונות: מפחית את הסבירות לתאונות בכך שהוא מאפשר לכלי רכב להגיב לתנועות של כלי רכב סמוכים בזמן אמת.
2. תקשורת V2I, Vehicle-to-infrastructure (מרכב לתשתית):
 - תיאור: מאפשר לכלי רכב להעביר נתונים לתשתית אחרת.
 - לדוגמה: במקרה של תאונה, להעביר את המידע למוקד חרום להזמין אמבולנס.
 - יישומים: עדיפות איתות תנועה לרכבי חירום, עדכוני תנועה בזמן אמת, מגבלות מהירות דינמיות.
 - יתרונות: משפר את זרימת התנועה, מפחית עומס ומשפר את הבטיחות בדרכים על ידי אספקת כלי רכב עם מידע בזמן על תנאי הדרך ואותות תנועה.
3. תקשורת V2P, Vehicle-to-Pedestrian (מרכב להולך רגל):
 - תיאור: מאפשר לכלי רכב לתקשר עם הולכי רגל ורוכבי אופניים באמצעות סמארטפונים או מכשירים אחרים.
 - יישומים: אזהרות בטיחות הולכי רגל, התראות קרבה לרוכבי אופניים.
 - יתרונות: משפר את הבטיחות של הולכי רגל ורוכבי אופניים על ידי התראה לנהגים על נוכחותם, במיוחד באזורים עירוניים.
4. תקשורת V2N, Vehicle-to-Network (מרכב לרשת):
 - תיאור: מחבר את כלי הרכב לרשתות סלולריות ולאינטרנט, ומאפשר גישה לשירותי ענן לאחסון נתונים וניתוח מידע לאחר מכן.
 - יישומים: עדכונים באוויר, ניווט ומידע על תנועה בזמן אמת, שירותי מידע בידור.
 - יתרונות: מספק לכלי רכב גישה למגוון רחב של שירותים ומידע, שיפור חווית הנהיגה הכוללת וביצועי הרכב.

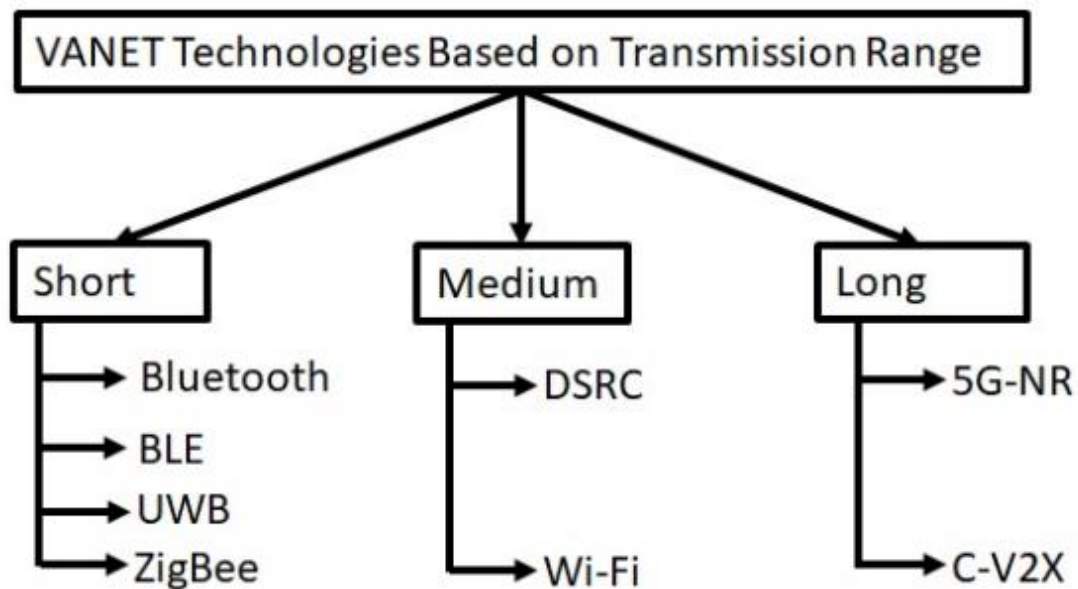


איור 12- סקירת רכב לכל התצורות (V2X) [1]

טכנולוגיות תקשורת

בחלק זה נסקור את סוגי התקשורות העיקריים ברכבים אוטונומיים [10] [11] [12]. נציג את החומרה הנדרשת על מנת להשתמש בטכנולוגיה, על איזה פרוטוקולים היא מתבססת, כיצד מתמודדים עם הפרעות בתקשורת, באיזה אלגוריתמים משתמשים, מה החסכון באנרגיה האפשרי ומה היתרונות והחסרונות בשימוש בסוג תקשורת זה.

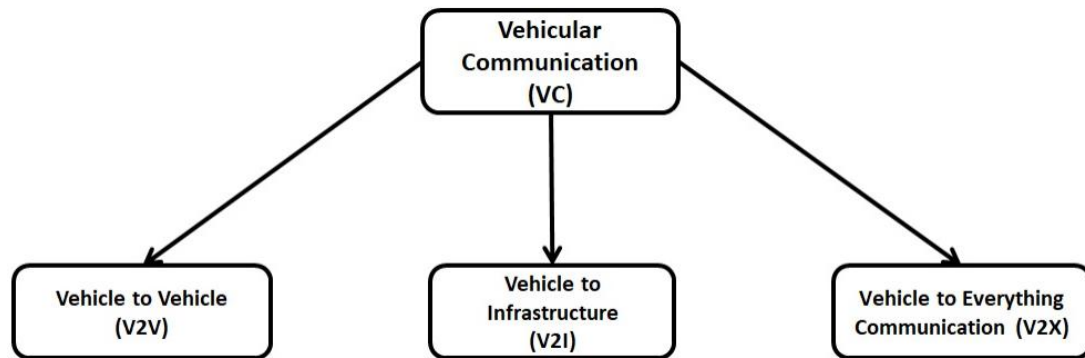
לאחר שסקרנו את מודל תקשורת כלי רכב לכל דבר (V2X). בחלק זה נסקור את רשתות האד-הוק לכלי רכב (VANETs), נחלק את סוגי הטכנולוגיות לפי גודל טווח: קצר, בינוני וארוך.



איור 13- סוגי טכנולוגיות ברכב אוטונומי [11]

VANETs הם תת-מחלקה מתפתחת של רשתות אד-הוק ניידות המסוגלות ליצור באופן ספונטני רשת של מכשירים/רכבים ניידים. ניתן להשתמש ב-VANET לתקשורת מרכב לרכב (V2V) ורכב לתשתית (V2I).

המטרה העיקרית של טכנולוגיה כזו היא לייצר ביטחון בכבישים. לדוגמה, במהלך תנאים מסוכנים כמו תאונות ופקק תנועה, כלי הרכב יכולים לתקשר זה עם זה ועם הרשת כדי לשתף מידע חיוני.



איור 14- מערכת תקשורת כלי רכב [11]

המרכיבים העיקריים של טכנולוגיית VANET הם:

- On-board unit (OBU) יחידה מובנית: שימוש: מותקן בכלי רכב כדי לאפשר תקשורת V2X. הוא מתקשר עם RSUs, OBUs אחרים. בעת שימוש: ברציפות במהלך פעולת הרכב עבור משימות כמו קבלת עדכוני תנועה, אזהרות התנגשות ותקשורת עם תשתית.
- Roadside Unit (RSU) יחידת דרכים: שימוש: יחידות ניידות פרוסות לאורך כבישים כדי לתקשר עם OBUs. הם מעבירים מסרים בין כלי רכב ותשתיות. בעת שימוש: ממוקם במקומות מרכזיים (צמתים, כבישים מהירים) כדי לנהל את זרימת התנועה, לספק התראות בזמן אמת ולשפר את הבטיחות.
- Trusted Authority (TA) רשות מהימנה: שימוש: מספק שירותי אבטחה כגון אימות, ניהול אישורים והצפנה עבור תקשורת V2X. בעת שימוש: בכל תקשורת V2X כדי להבטיח חילופי דברים מאובטחים ומהימנים בין כלי רכב, RSUs.

רכיבים אלו משמשים יחד ליצירת רשת תקשורת מאובטחת ואמינה עבור כלי רכב אוטונומיים ומערכות תחבורה חכמות.

- Bluetooth :

טכנולוגיה אלחוטית לטווח קצר בשימוש נרחב לחיבור מכשירים כמו סמארטפונים, אוזניות ומכוניות. הוא מציע קצבי נתונים מתונים וידוע במגוון שלו.

- BLE (Bluetooth Low Energy) :

גרסה של Bluetooth המיועדת לצריכת חשמל נמוכה, אידיאלית עבור מכשירי IoT כמו מכשירים לבישים וחיישנים.

חומרה :

שבב Bluetooth, אנטנה, רכיבים תומכים כמו מיקרו-בקר.

פרוטוקולים :

IEEE 802.15.1

הפרעות :

מטופלות באמצעות קפיצת תדר אדפטיבית (AFH) וטכניקות תיקון שגיאות.

אלגוריתמים :

AFH למניעת הפרעות.

חסכון באנרגיה :

BLE יעיל ביותר, עם צריכת חשמל נמוכה, אידיאלי עבור מכשירים המופעלים על ידי סוללה.

יתרונות :

Bluetooth : תמיכה רחבה, אמין, טווח בינוני.

BLE : חסכוני באנרגיה, אידיאלי עבור IoT וציוד לביש.

חסרונות :

טווח מוגבל (במיוחד BLE), פוטנציאל להפרעות בסביבות צפופות. BLU לוקח זמן לגלות מכשירים וליצור חיבור אינו מתאים לשימוש בישומי רכב רגישים.

** IoT-Internet of Things, הכוונה לרשת של חפצים פיזיים "דברים" המאפשרים תקשורת בין החפצים, איסוף וניתוח המידע.

- ZigBee :

פרוטוקול אלחוטי בעל הספק נמוך וקצב נתונים נמוך המשמש לרשתות רשת, במיוחד בבתים חכמים ובהגדרות תעשייתיות.

חומרה :

מודול רדיו ZigBee, רכיב מיקרו-בקר, אנטנה.

פרוטוקולים :

IEEE 802.15.4 משתמש בטופולוגיית רשת Mesh.

הפרעות :

רשת Mesh מאפשרת ניתוב מחדש של נתונים דרך נתיבים חלופיים במקרה של הפרעות.

אלגוריתמים :

BPSK – משמש ברשת בקצב נתונים נמוך, מווסת את העברה של אות הספק כדי לייצג נתונים בינאריים.

OQPSK – משמש ברשת בקצב נתונים גבוה, מווסת את העברה של אות הספק בצורה יעילה יותר, מפחית את הסבירות לשגיאות ומשפר את הביצועים בסביבות רועשות.

חסכון באנרגיה :

יעילה מאוד, מיועדת לתקשורת בהספק נמוך וקצב נתונים נמוך, עלות נמוכה, המשמשת לעתים קרובות במכשירי בית חכם.

יתרונות :

רשת Mesh מגבירה את האמינות והטווח, חסכונית באנרגיה, אידיאלית לאוטומציה ביתית.

חסרונות :

קצב נתונים נמוך יותר, פחות נמצא בכל מקום מ-Bluetooth, מורכב יותר ליישום.

- UWB (Ultra-Wideband) :

טכנולוגיה אלחוטית המשתמשת בפולסים בעוצמה נמוכה ובתדר גבוה למעקב אחר מיקום מדויק וקצבי נתונים גבוהים למרחקים קצרים.

חומרה :

מקלטים משדרים ואנטנות, רכיב מיקרו-בקר.

פרוטוקולים :

IEEE 802.15.4z משתמש בטכנולוגיית פולסי רדיו לתקשורת.

הפרעות :

מטפל בהפרעות עם ספקטרום מפוזר עם קפיצות זמן, מזעור הפרעות.

אלגוריתמים :

TH - משמש להפצת אות בפרצי זמן קצרים במרווחי זמן שונים לפי רצף פסאודו-אקראי.
DS - משמש להפצת אות בצורה שבה מתפזר על פני פסי תדרים רחב על ידי הכפלתו ברצף רעש פסאודו-אקראי.

חסכון אנרגיה :

יעילות אנרגטית מתונה, עם צריכת חשמל גבוהה יותר בהשוואה ל-BLE ו-ZigBee אך עם דיוק וקצבי נתונים מעולים.

יתרונות :

דיוק גבוה במיקום ומרחקים, קצבי נתונים גבוהים, הפרעות נמוכות.

חסרונות :

צריכת אנרגיה גבוהה יותר, טווח קצר יותר, תמיכת חומרה פחות נפוצה.

** מיקרו-בקר microcontroller - בקר זעיר.

מכיל: יחידת עיבוד, זיכרון נדיף, זיכרון קריאה בלבד, אפיקי קלט/פלט וקוצבי זמן.

Standards	Bluetooth	BLE	ZigBee	UWB
Specifications	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.3
Frequency	2.402–2.481	2.402–2.481	868/902–968 MHz, 2.4 GHz	3.1–10.6 GHz
Bandwidth	1	2	0.3/0.6 MHz, 2 MHz	500 MHz–7.5 GHz
Rate	1–3 Mbps	1 Mbps	20–250 kbps	480 Mbps
Range	10 m	50 m	75–100 m	75 m
Latency (msec)	100	6	30	0.1
Modulation	GFSK	GFSK	BPSK, O-QPSK	BPSK-QPSK
Data Protection	16-bit CRC	24-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC

טבלה 2- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח קצר [11]

- יישומים :

- טכנולוגיות התקשורת לטווח קצר יכולות לסייע ביישומי רכב שונים. נציג חלק מהיישומים:
 - לוקליזציה של רכב: ה-GPS הממשמש בכלי הרכב יכול לקבוע בקלות את מיקומו של הרכב אך בסביבה העירונית הצפופה לוקליזציה שלו הופכת למאתגרת יותר. עם זאת, טכנולוגיות אלו לטווח קצר, במיוחד UWB, יכולות לסייע ללוקליזציה בסביבות צפופות מכיוון שהן אינן דורשות את קו הראייה (LoS) ויכולות לחדור בקלות אל המכשולים. ניתן להתייחס ל-UWB כטכנולוגיה המועדפת עבור לוקליזציה מבוססת טווח, במיוחד עבור כלי הרכב הנעים בסביבות מקובצות צפופות.
 - סיוע בנהיגה בזמן אמת: ניתן להשתמש בטכנולוגיות תקשורת קצרות טווח אלו לתקשורת בין RSUs ו-OBU של הרכב לאיסוף נתוני נהיגה בזמן אמת אשר עשויים לסייע בסיוע בנתיב והימנעות מתאונות דרכים.
 - זיהוי רכב: טכנולוגיות אלו צורכות פחות אנרגיה; לכן, הם יכולים להיות שימושיים ליישום ברחבות אגרה שבהן זיהוי וסיווג הרכב ממלא תפקיד מכריע לגביית מס.
 - אזהרת התנגשות קדימה במהירות נמוכה: ניתן להשתמש בטכנולוגיות קצרות טווח אלו לתקשורת V2V לטווח קצר במהירויות נמוכות, שבהן ניתן להשתמש למניעת התנגשויות בין כלי הרכב הנוהגים בעצמם או לסיוע בנתיב וחניה. טכנולוגיה זו מציעה את הפתרון הטוב ביותר למנוע התנגשויות קדימה בין מכוניות בנהיגה עצמית במהירויות נמוכות.

- תקשורת טווח קצר - DSRC (Dedicated Short-Range Communications)

DSRC היא טכנולוגיית תקשורת אלחוטית שתוכננה במיוחד לשימוש ברכב, המאפשרת לכלי רכב לתקשר זה עם זה ועם תשתית בצד הדרך. ה-DSRC הוא גרסה שונה של טכנולוגיית ה-Wi-Fi.

חומרה:

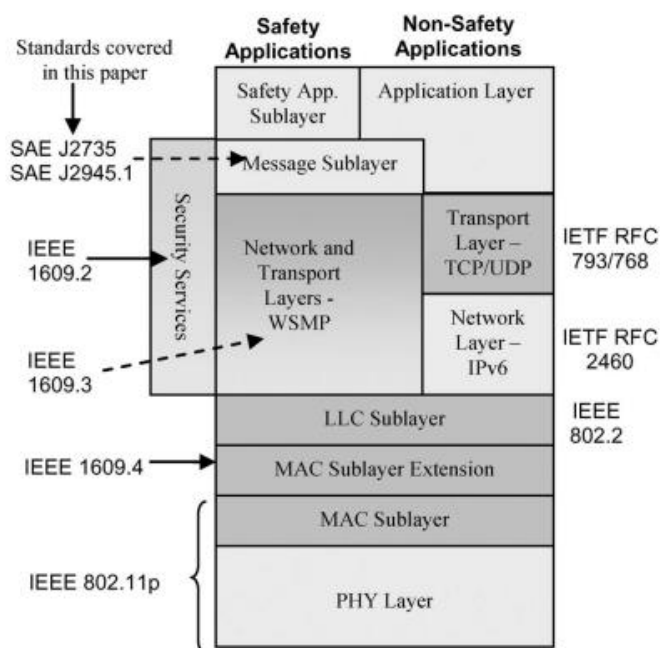
OBU,RSU ואנטנה.

פרוטוקולים:

IEEE 802.11p : מהווה את הבסיס ל-DSRC, הטיפול בשכבות הפיזיות וה-Mac (בקרת גישה למדיה).

IEEE 1609.x : חבילה של סטנדרטים המכונה גל (גישה אלחוטית בסביבות כלי רכב), המכסה אבטחה, שירותי רשת ופעולות על גבי מספר ערוצים.

SAE J2735 : מגדיר את ערכות ההודעות ופורמטים של V2V (רכב לרכב) ו-V2I (רכב לתשתית) תקשורת.



איור 15- שכבות ארכיטקטורת תקשורת [12]

הפרעות:

יתירות: מספר RSUs ו-OBUs מבטיחים שאם אחד נכשל, אחרים יכולים להשתלט.

תיקון שגיאות: מנגנונים מובנים לגילוי ותיקון שגיאות תעבורה.

עדיפות: ניתן עדיפות לשליחת מסרים קריטיים לבטיחות על פני סוגים אחרים של תקשורת, ומבטיחים כי הם מועברים גם במהלך הפרעות.

אלגוריתמים:

CSMA/CA : מנהל גישה לערוץ התקשורת ומפחית את הסבירות להתנגשויות נתונים.
אלגוריתמי ניתוב : ניתוב נתונים ביעילות ברשת הרכב.

חסכון באנרגיה :

מכשירי DSRC פועלים בדרך כלל עם מחזורי חובה נמוכים, ומשדרים רק במידת הצורך לשמירה על אנרגיה.
אסטרטגיות אפקטיביות לניהול כוח משמשות הן ב- OBU והן ב- RSU כדי למזער את צריכת האנרגיה, במיוחד בתקופות סרק.

יתרונות :

מציעה זמן השהיה נמוך מאוד דבר החיוני מאוד ליישומים קריטיים לבטיחות.
אמינה, טכנולוגיה מוכחת עם ביצועים חזקים בתנאים שונים.
פרוטוקולים מתוקננים מבטיחים תאימות בין מערכות יצרנים שונים.

חסרונות :

מוגבל לתקשורת לטווח קצר, רוחב פס מוגבל בהשוואה לטכנולוגיות חדשות יותר, מה שעלול להגביל את כמות הנתונים שניתן להעביר. קצב הטמעה איטי יותר בהשוואה לטכנולוגיות חדשות יותר.

- תקשורת אלחוטית - Wi-Fi

טכנולוגיה זו היא הליבה של כלי רכב אוטונומיים מחוברים מכיוון שהיא מאפשרת העברת נתונים באופן מידי, המספקת לנהג הצעות לאופטימיזציה של התנהגות נהיגה באופן כללי ובמקרי חירום.

חומרה:

מודול Wi-Fi, אנטנה.

פרוטוקולים:

IEEE 802.11a : סטנדרטים לתקשורת Wi-Fi תפוקה גבוהה.

הפרעות:

שימוש בנקודות גישה מרובות Wi-Fi כדי להבטיח כיסוי ולהפחית אזורים מתים. פרוטוקולי בקשה חוזרת אוטומטית (ARQ) לחבילות אבודות מחדש.

אלגוריתמים:

CSMA/CA : לניהול גישה למדיום האלחוטי.

חסכון באנרגיה:

מצב חיסכון בחשמל, מודולים של Wi-F יכולים להיכנס למצבים בעלי עוצמה נמוכה כאשר הם לא מעבירים באופן פעיל.

יתרונות:

בדומה ל-DSRC, מציעה השהייה נמוכה המתאימה ליישומים בזמן אמת. קלה וזולה יותר לפריסה באזורים מקומיים בהשוואה לרשתות סלולריות.

חסרונות:

טווח מוגבל, בדומה ל-DSRC. רוחב פס נמוך יותר, מה שעשוי להגביל יישומים עתירי נתונים. פוטנציאל להפרעות מרשתות ומכשירי Wi-Fi אחרים.

**** מודול :** רכיב חומרה עצמאי המספק פונקציות ספציפיות, כגון קישוריות Wi-Fi או Bluetooth, בתוך התקן. הוא כולל את המשדרים, האנטנות ומעגלי העיבוד הדרושים.

**** CSMA/CA :** פרוטוקול רשת המשמש למניעת התנגשויות נתונים ברשתות אלחוטיות כמו Wi-Fi. לפני העברת נתונים, מכשיר מאזין לרשת כדי לבדוק אם הערוץ נקי (תחושת הספק). אם הערוץ פנוי, המכשיר שולח אות המציין שהוא עומד לשדר, ועוזר למנוע התנגשויות. אם הערוץ תפוס, המכשיר ממתיך ומנסה שוב. שיטה זו חיונית לניהול תעבורת רשת והבטחת העברת נתונים יעילה באמצעי תקשורת משותפים.

Parameters	Wi-Fi	DSRC
Specifications	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p
Width in channel	20	10
Signalling	OFDM	OFDM
Data Rate (Mbps)	upto 54	upto 27
Modulation type	upto 64QAM	upto 64QAM
Symbol duration (micro sec.)	4	8
Guard Time (micro sec.)	0.8	1.6
FFT Size	64	64
FFT period (micro sec.)	3.2	6.4
Preamble duration (micro sec.)	16	32
Sub carrier spacing (MHz)	0.3125	0.15625
Frequency spectrum (GHz)	5	5.9
Latency (msec)	50	100
Range (m)	100	300

טבלה 3- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח בינוני [11]

- יישומים :

- **בטיחות תעבורה** : ניתן להשתמש בטכנולוגיית DSRC לשיפור בטיחות התנועה. היא מאפשרת לכלי רכב לזהות את המחסומים ולהימנע מתאונות התנגשות בכבישים. בעזרת DSRC, הרכב יכול לזהות עיקול חד ולהזהיר מכוניות אחרות. אם מתרחשת תאונה בכביש, כלי הרכב יכולים להעביר הודעת התראה לכלי רכב אחרים כדי למנוע התנגשויות.
- **מערכת ניהול תנועה** : DSRC יכולה לסייע בהקמת מערכת ניהול תנועה הכוללת ניהול צי כבישים מהירים, עקיפה בטוחה ועוד. כלי הרכב יכולים לעקוף בביטחה ולשמור על פער רצוי במהלך החלפת נתיב. אם רכב מסוים רוצה לשנות את הנתיב שלו, הוא ישלח את הבקשה לכלי רכב אחרים לשינוי נתיב. לכן, הרכב יכול לנהל בצורה מושלמת את התעבורה באמצעות תקשורת DSRC.
- **ניהול רכב** : ניתן להשתמש ב-DSRC כדי לזהות כלי רכב רשומים ולספק להם מעבר אוטומטי. מכאן שניתן לחסום הסגת גבול עם רכב שאינו רשום.

- מגבלות :

1. **בעיית טרמינל נסתר** : מתרחשת ברשתות אלחוטיות כאשר שני מכשירים (טרמינלים) אינם מסוגלים לזהות את השידורים אחד של השני בשל היותם מחוץ לטווח של זה, אך שניהם יכולים לתקשר עם מקלט משותף. זה מוביל להתנגשויות פוטנציאליות במקלט כאשר שני הטרמינלים מנסים לשלוח נתונים בו-זמנית, לא מודעים לפעילותו של השני.
2. **בעיית עומסים** : ככל שמספר הרכבים האוטונומיים עולה, עומס התקשורת גדל גם הוא, מה שגורם לצפיפות ועומס. עומס זה מוביל לעיכוב ולאובדן הודעות מידע המשפיעים על ביצועי הרשת, מה שמוביל לעיכובים בתקשורת ולאמינות מופחתת.
3. **קושי בשינוי תדרים מהיר** : רכב שנוסע במהירות גבוהה צריך לשנות מספר טופולוגיות עבודה לאורך זמן. שני סוגים של מסירה מתרחשים : (1) מסירה אופקית (2) מסירה אנכית. מסירה אופקית היא מסירה של ה-AV הנע מ-RSU אחד לאחר, ואילו מסירה אנכית היא מסירה של AV בין תחנות בסיס LTE סלולריות שונות. מסירה אנכית אורכת זמן רב יותר בהשוואה למסירה אופקית. מה שגורם לפגיעה באות ומשפיעים על הדיוק והאמינות של התקשורת.
4. **בעיית חיבור** : בעיית זו מתרחשת כשכלי רכב נעים בין אזורי תקשורת. המהירויות היחסיות מעבירות את תדר האות והאות במקלט הוא בתדר שונה בהשוואה לאות השידור. שמירה על חיבור חלק יכולה להיות מאתגרת, ולהוביל להפרעות תקשורת אפשריות.

בחלק זה נסקור את העומס ברשת VANET [18].

עומס ברשת הוא נושא קריטי במיוחד עבור רכבים אוטונומיים התלויים בחילופי נתונים בזמן אמת על מנת לקבל החלטות. עומס ברשת ב-VANET נוצר עקב הצפיפות הגבוהה של כלי רכב, העברות נתונים תכופות כאשר כלי רכב נעים והצורך בכמויות גדולות של נתונים כדי להבטיח תקשורת בין רכב לרכב (V2V) ורכב לתשתית (V2I).

רוחב הפס כולו מחולק לשבעה ערוצים של 10 מגה-הרץ כל אחד ופס שמירה של 5 מגה-הרץ כדי להפחית הפרעות. ערוץ אחד משמש כערוץ בקרה (CCH) המשמש לשליחת הודעות בטיחות ו-6 ערוצים אחרים משמשים כערוצי שירות (SCH) המשמשים לשליחת הודעות שירות.

DSRC MAC מורכב משני חלקים :

1. שכבה תחתונה – IEEE 802.11p.

2. שכבה עליונה – IEEE 1609.4 נקרא גם שכבת ה-MAC העליונה.

DSRC לא משתמש מנגנוני שליחה רגילים, בשכבה העליונה, IEEE 1609.4, מיושם מנגנון עדיפויות EDCA לאספקת שיפור QoS ומנגנון החלפת ערוצים.

להלן כמה אתגרים שמציבים עומס ברשת ב-VANET :

1. העברת נתונים מושהית, עומס עלול להוביל לעיכובים בשליחת ובקבלה של הודעות בטיחות קריטיות, כגון אזהרות התנגשות, התראות תנועה או אותות בלימת חירום. לעיכובים אלו עלולות להיות השלכות חמורות, שכן אפילו זמן אחזור קטן עלול להיות מסוכן בתנועה מהירה ועלול להוביל להתנגשויות.
2. איבוד הודעות, בסביבת VANET צפופה, הסיכוי לאובדן הודעות עולה. תנועה מהירה, יחד עם הפרעות מכלי רכב אחרים, עלולה להוביל לכך שחלק ניכר מהמנות לא יגיעו ליעדן. אובדן הודעות עלול להוביל לנתונים לא שלמים או לא מדויקים, וכתוצאה מכך קבלת החלטות לקויה, במיוחד בסביבות מורכבות עם מספר רכבים.
3. תפוקה מופחתת, ככל שמספר כלי הרכב וההודעות המועברות ברשת גדל, תפוקת הרשת הכוללת יכולה לרדת. תפוקה מופחתת זו עלולה לגרום לצוואר בקבוק בשיתוף נתונים, במיוחד באזורים עירוניים צפופים או בזמני תנועה שיא. כלי רכב אוטונומיים דורשים קצבי נתונים גבוהים כדי להעביר נתוני חיישנים, הזנות וידאו ומידע מורכב אחר לכלי רכב ולתשתית בקרבת מקום. תפוקה מופחתת עלולה להוביל לפגיעה במודעות המצב ולהגביל את הטווח וההיענות של מערכות רכב אוטונומיות.

כדי לשפר את הביצועים של VANETs ולהתמודד עם העומס ברשת, יש מספר אסטרטגיות:

1. לשלוט בקצב השידור (הפחתת זמן השידור) = בקרת קצב שידור אדפטיבית, התאמה באופן דינמי את קצב שליחת ההודעות בהתבסס על רמת העומס הנוכחית ברשת. כאשר מגלים עומס, קצב השידור מופחת, ומפחית את כמות הנתונים הזורמת ברשת.
2. לשלוט בקצב יצירת הודעות beacon (הפחתת העומס המוצע) = הפחתת התדירות של השידורים, הודעות ביקון הן שידורים תקופתיים המספקים עדכוני סטטוס (כגון מהירות, מיקום וכיוון) לכלי רכב קרובים. בתנועה צפופה או באזורים צפופים, ניתן להפחית באופן דינמי את קצב ההודעות כך שנוצרות פחות הודעות ובכך להקל על עומס הרשת.
3. לשלוט בכוח השידור (הקטנת הטווח ובכך אזור המחלוקת) = שליטה בכוח ההעברה, צמצום טווח התקשורת כדי להגביל את אזור המחלוקת ברשת על ידי התאמת כוח השידור, ניתן לשנות באופן דינמי את אזור הכיסוי של האות של כל רכב. הפחתת עוצמת השידור מורידה את הטווח שבו כלי רכב אחרים מקבלים את האות, ולמעשה מקטין את מספר כלי הרכב המתמודדים על אותם משאבי רשת.
4. לשלוט בגודל CW וערך AIFS (הפחתת הסתברות להתנגשות) = אופטימיזציה של פרמטרי תזמון בשכבת בקרת גישה בינונית (MAC), ערכי גודל חלון המחלוקת (CW) וערכי הבוררות בין-מסגרת (AIFS) הם פרמטרי תזמון השולטים כיצד כלי רכב ניגשים לערוץ הרשת. התאמת גודל ה-CW מגדילה את זמן ההפסקה ומקטינה את הסיכוי שמספר כלי רכב ינסו לשדר בו זמנית. באופן דומה, ניתן להתאים את ערך ה-AIFS על בסיס עדיפות, מה שמאפשר להודעות בעדיפות גבוהה יותר זמן המתנה קצר יותר, כך פוחת ההסתברות להתנגשויות הודעות.
5. תוכניות תעדוף הודעות (מתן עדיפות רבה יותר להודעות חירום) = הטמעת פרוטוקולים מבוססי עדיפות (לדוגמה EDCA), שימוש בפרוטוקולים שמתעדפים הודעות חירום או בטיחות על פני נתונים לא קריטיים כדי להבטיח שידור בזמן.

פתרונות כאלה יכולים לתמוך בכך שתהיה פעולה בטוחה ויעילה של רכבים אוטונומיים.

- **תקשורת רכב לרכיב כלשהו- (C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)**
טכנולוגיית תקשורת המאפשרת לכלי רכב לתקשר זה עם זה (V2V), עם תשתית (V2I), עם הולכי רגל (V2P) ועם הרשת (V2N). הוא משתמש ברשתות סלולריות, כולל 4G ו-5G-NR, כדי לספק תקשורת אמינה עם זמן אחזור נמוך לבטיחות וניהול תנועה משופרים.

חומרה:

מודם סלולרי, כרטיס SIM (לאימות רשת ומנול), אנטנה.

פרוטוקולים:

3GPP standards (LTE, 5G).

הפרעות:

ניהול תשתית רשת סלולרית עם תיקון שגיאות, שימוש במספר גדול של אנטנות תמיכה במעבר בין רשתות, מעבר לרשת דור קודם (3G,4G) במידה ולא קיים רשת 5G.

אלגוריתמים:

תזמון והקצאת משאבים- אלגוריתמים דינמיים לניהול משאבי רשת ולהבטיח איכות השירות.

חסכון באנרגיה:

משתנה בהתאם לסוג הרשת, 5G חדש יותר חסכוני יותר באנרגיה מאשר LTE.

יתרונות:

מנצל תשתית סלולרית קיימת ומספק כיסוי רחב.
ניתנת להרחבה מאוד, נהנית מהתקדמות מתמשכת בטכנולוגיה הסלולרית.
מציע רוחב פס גבוה יותר, במיוחד עם 5G, המאפשר יישומים עתירי נתונים BIG DATA.

חסרונות:

זמן השהיה גבוה יותר בהשוואה ל-DSRC, אם כי 5G מפחית זאת באופן משמעותי.
מסתמכת על זמינות ואיכות של רשת סלולרית.
עלויות תפעול גבוהות יותר בשל הסתמכות על רשתות סלולריות.

- תקשורת סלולרית – 5G-NR

הדור החמישי של רשתות סלולריות הוא הדור האחרון של טכנולוגיה סלולרית, המציע מהירויות נתונים מהירות במיוחד, זמן השהיה נמוך וקישוריות מסיבית, דבר המאפשר תמיכה בתקשורת בזמן אמת ונהיגה אוטונומית.

חומרה :

מודול 5G, מודם 5G, כרטיס SIM, אנטנה.

פרוטוקולים :

3GPP - מגדיר פרוטוקולים עבור גישה לרדיו, העברת נתונים, איתות וניהול רשת, המבטיח תאימות ויכולת פעולה הדדית בין רכיבי רשת והתקנים שונים.
רדיו חדש (NR) New Radio : מגדיר את ממשק האוויר עבור 5G, תוך התמקדות בתקשורת במהירות גבוהה ובזמן השהיה נמוך.
5G Core Network (5GC) : ארכיטקטורת ליבה חדשה המיועדת לגמישות, תומכת בשירותים כמו חיתוך רשת ומחשוב קצה.

הפרעות :

חתך רשת : יוצר מספר רשתות וירטואליות על תשתית פיזית אחת כדי להבטיח המשכיות השירות.
מחשוב קצה : מפחית את זמן האחזור ומבטיח עיבוד מקומי במהלך הפרעות ברשת.

אלגוריתמים :

תקשורת מסוג מכונה מאסיבית mMTC - דורשת רוחב פס נמוך, צריכת אנרגיה נמוכה וצפיפות חיבור גבוהה כדי לחבר מספר רב של חיישנים.
רוחב פס הנייד והמשופר eMBB - עבור יישומים הדורשים קצבי נתונים גבוהים במיוחד.
תקשורת uRLLC - נדרשת עבור יישומים הדורשים עיכובים נמוכים במיוחד יחד עם שיעור שגיאות נמוך.

חסכון באנרגיה :

מכשירים יכולים להיכנס למצבי שינה כדי לחסוך בחשמל.
פרוטוקולים יעילים באנרגיה - אופטימיזציה של פרוטוקולי תקשורת להפחתת צריכת האנרגיה.

יתרונות :

מהירויות העברת נתונים גבוהות במיוחד, המאפשרות הזרמת וידאו בהבחנה גבוהה בזמן אמת ויישומים אחרים עתירי נתונים.
זמן השהיה נמוך במיוחד מה שהופך אותו למתאים ליישומי בטיחות קריטיים.
תומך במספר עצום של מכשירים מחוברים.

חסרונות:

מצריכה השקעה ניכרת בתשתיות חדשות. הכיסוי עשוי להיות מוגבל לאזורים עירוניים וייתכן שייקח זמן עד שהוא יתפשט. עלויות גבוהות יותר הקשורות לפריסה ותחזוקה של תשתית 5G.

** מודם: מכשיר הממיר נתונים דיגיטליים ממחשב לפורמט המתאים לאמצעי שידור (כמו קווי טלפון, כבלים או לוויין) ולהיפך. מודמים משמשים בעיקר לגישה לאינטרנט דרך רשתות תקשורת שונות.

Parameters	C-V2X	5G-NR V2X
Subcarrier spacing (kHz)	15	up to 240
Carrier aggregation	Up to 32	up to 16
Channel Bandwidth (MHz)	20	400
Latency (msec)	<10	<1
Reliability	95–99%	99.9–99.999%
Channel Coding	Turbo	LDPC, Polar
Network Slicing	No	YES
Waveform	SC-FDMA	OFDM
Control and data multiplexing	FDM	TDM
Modulation	16 or 64QAM	256 QAM
Communication Type	Broadcast	Broadcast, multicast and unicast
Re-transmission	Blind	PSFCH
Security and privacy	Basic	Advanced
Positioning accuracy (m)	>1	0.1
Frequency Spectrum	800/1800 MHz	700 MHz/3.6 and 26 GHz
Range	100 m to >5 Km	50 m to >5 Km

טבלה 4- השוואת טכנולוגיות תקשורת טווח ארוך [11]

- יישומים : מנקודת מבט של יישום מעשי וביצועים
- אבטחה ופרטיות הן קריטיות לתפעול AV דבר זה תלוי בטכנולוגיית התקשורת. לשם כך, חשוב להבטיח את האבטחה של אינטראקציות V2X.
- ניהול ותיאום יש השפעה ישירה על ביצועי הרשת ולכן דורשים אופטימיזציה. תשתית רשת אל מורכבות ממרכיבים שונים המופצים על פני הרשת. הניצוח של תשתית כזו מאפשר תיאום בין כל רכיבי הרשת השונים המעורבים במחזור החיים של כל בלוק משאבי עבודה. דבר זה כרוך בניהול שירותים המאפשרים אוטומציה של פריסה, תחזוקה, ניהול, תצורה, שדרוג ותיקון של כל רכיב של המערכת.
- לאיכות השירות (QoS) יש אילוצים מחמירים ברשתות V2X כולל זמן השהייה, קיבולת וכו'.
- מספר הליכים, כגון משא ומתן בין רשת, הקמת קישוריות, ניידות תכנון וניהול משתמש וכו' משפיעים ישירות על אספקת השירות ואיכותו. eMBB ו-uRLLC מאפשרים תכונות המוצעות על ידי 5G עבור V2X במטרה לספק QoS רצוי למשתמשים.
- שירותי קצה : מציעה מתן גישה ייחודית של אספקת משאבי חישוב ואחסון בקצה הרשת.
- מאפשר לרשת לארח יישומים קרובים יותר ל-AVs וכתוצאה מכך זמן השהייה מופחת.
- Multi-Access Edge Computing (MEC) מנצל את ארכיטקטורת הרשת, ולכן מפחית את דרישת זמן ההשהיה של ה-AVs. מכיוון שמשתמשי כלי רכב הם ניידים מאוד, ניתן לתמוך בשליחות נתונים תכופות באמצעות ניהול משאבים בקצה הגישה לרשת.

**** (Multi-access Edge Computing) MEC** - הוא תפיסת ארכיטקטורת רשת המקרבת משאבי ושירותי מחשוב ענן לקצה הרשת, ליד משתמשי הקצה או התקנים. על ידי עיבוד נתונים בקצה, MEC מפחית את זמן ההשהיה, משפר את עיבוד הנתונים בזמן אמת ומשפר את ביצועי הרשת הכוללים. זה חיוני עבור יישומים הדורשים זמן השהיה נמוך, כגון רכבים אוטונומיים. MEC מאפשר קבלת החלטות מהירה יותר ומפחית את הצורך לשלוח נתונים חזרה למרכזי נתונים מרכזיים, ובכך מייעל את השימוש ברוחב הפס.

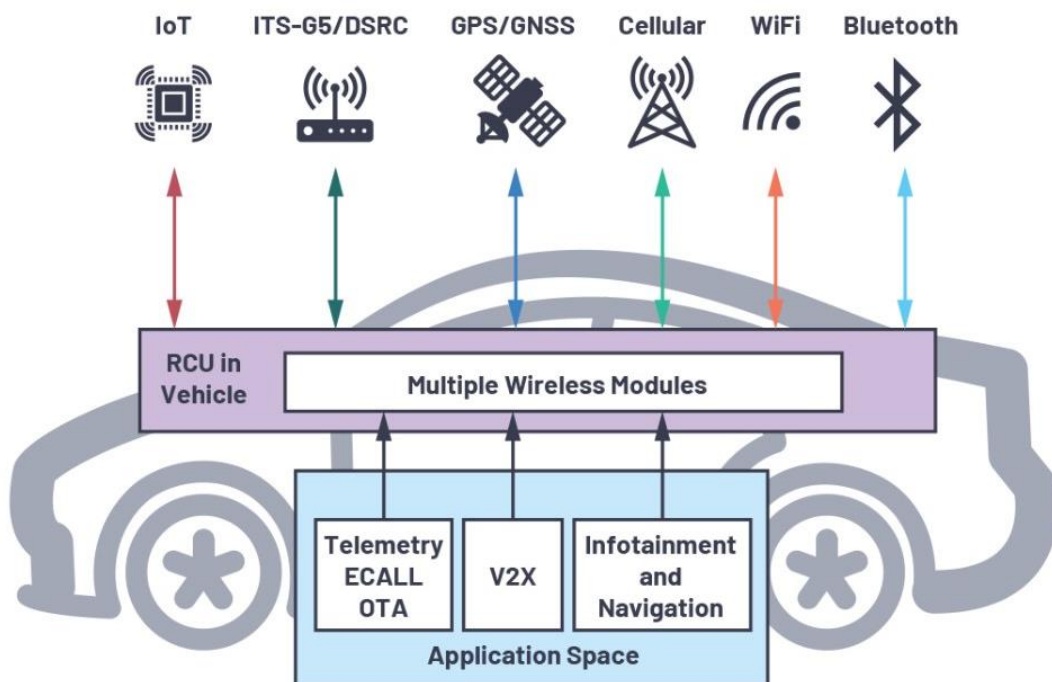
סיכום :

כל טכנולוגיית תקשורת - Wi-Fi, 5G-NR, C-V2X, DSRC, Bluetooth - ממלאת תפקיד ייחודי במערכת האקולוגית של כלי רכב אוטונומיים. הם שונים בדרישות חומרה, פרטוקולים, אסטרטגיות לטיפול בהפרעות, אלגוריתמים ויעילות אנרגטית. הבנת ההבחנות הללו חיונית לשילוב טכנולוגיות אלו ביעילות כדי להבטיח תקשורת אמינה, יעילה ומאובטחת ב-AVs, ובכך לשפר את הבטיחות והביצועים התפעוליים שלהם.

השוואת תקשורות

- זמן השהיה: Wi-Fi ו-DSRC מציעים את השהיה הנמוכה ביותר, מה שהופך אותם לאידיאליים עבור יישומים קריטיים לבטיחות. 5G גם מספק זמן השהיה נמוך מאוד אך דורש השקעה משמעותית בתשתית.
- כיסוי: C-V2X מספקים את הכיסוי הרחב ביותר, נהנה מרשתות סלולריות קיימות.
- רוחב פס: 5G מציע את רוחב הפס הגבוה ביותר ותומך ביישומים עתירי נתונים. C-V2X מציע גם רוחב פס גבוה, במיוחד עם רשתות 5G. ל-DSRC ול-Wi-Fi יכולות רוחב פס נמוכות יותר.
- עלות: Wi-Fi ו-DSRC הם בדרך כלל זולים יותר לפריסה באזורים מקומיים. C-V2X ו-5G כרוכים בעלויות גבוהות יותר עקב שימוש ברשת ותשתית.
- מדרגיות: 5G ו-C-V2X ניתנים להרחבה מאוד.

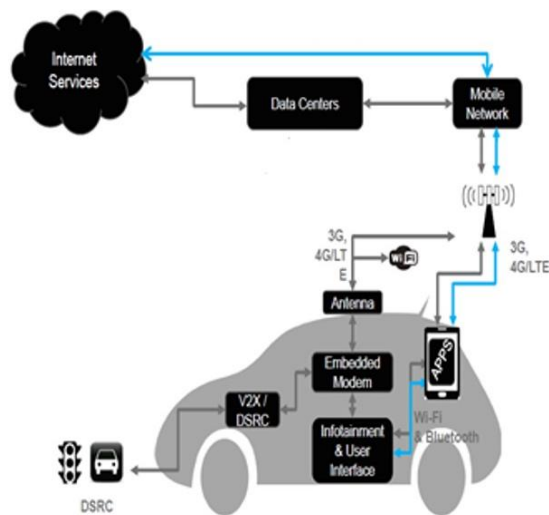
מציג את התקשורות הקיימות כיום ←



איור 16- מערכות אלחוטיות ברכב [10]

דוגמא לשימוש בתקשורות [8], איור 17 מציג ארכיטקטורה טיפוסית למכונית מחוברת, עם מודולי חומרה רבים שיכולים לקיים אינטראקציה עם העולם החיצון. להלן מודולי החומרה המאפשרים קישוריות לכל דבר מחוץ לרכב:

- V2X/DSRC - תקני V2X מוגדרים וצפויים לפעול באמצעות טכנולוגיית DSRC.
- מודם TCU/Embedded : ה-TCU, המכיל בדרך כלל מודם המספק חיבור לאינטרנט לרכב על בסיס חיבור סלולרי באמצעות 2G, 3G, 4G.
- מערכת בידורית : מערכת מידע בידור מספקת לרכב ממשק משתמש (UI) ופונקציונליות רדיו/בידור/מדיה, המעניקה לנהג את היכולת להתחבר דרך Wi-Fi או Bluetooth.



איור 17- רכב מחובר [8]

טכנולוגיה האלחוטית המאפשרת את הקישוריות בין המודולים בתוך ומחוץ לרכב:

Vehicle Module	Technology	External to the Vehicle
V2X	DSRC	Vehicle/Infrastructure
TCU	2G/3G/4G	Telematics Services
Infotainment	Bluetooth/Wi-Fi	Smartphone/Home

איור 18- טכנולוגיות תקשורות [8]

- תקשורת ייעודית לטווח קצר (DSRC): הוא ערוץ תקשורת אלחוטי קצר טווח המיועד לשימוש ברכב.
- רשת סלולרית (2G, 3G, 4G) - הן טכנולוגיות טלקומוניקציה ניידות. הם מבוססים על סט של תקנים המשמשים לתקשורת סלולרית שעליכם לעמוד בהם כדי להשתמש בשירותים וברשתות.
- Wi-Fi : טכנולוגיית תקשורת אלחוטית מקומית.
- Bluetooth : גלי רדיו קצרי טווח, תקשורת פנימית בתוך הרכב, בעלי עוצמה נמוכה.
- NFC : תקשורת שדה קרובה (NFC), תקשורת פנימית בתוך הרכב, בעלי עוצמה נמוכה.

עקב הגידול בתנועת הכבישים, עולה גם האפשרות לתאונות והתנגשויות. המטרה העיקרית של פיתוח כלי רכב לנהיגה עצמית/אוטונומית היא להפוך את הנהיגה לבטוחה ואמינה יותר, כמו גם להפחית את העומס. לשם כך, רכבים אלו צריכים לתקשר בצורה מדויקת עם רכבים אחרים וסביבתם. תהליך זה מתחיל בשלב התפיסה כאשר הרכב הנוהג בעצמו אוסף מידע מהסביבה באמצעות חיישנים שונים. למרות שהנתונים המתקבלים מהחיישנים עשויים להיות לא מדויקים, תהליך ההיתוך מאפשר לרכבים האוטונומיים לעבד את הנתונים הגולמיים האלה ולהשיג תוצאות מדויקות. לאחר ניתוח הסביבה טופולוגיית הרשת האד-הוקית מאפשרת ל-AVs לתקשר זה עם זה ועם תשתית הרשת כדי להבטיח בטיחות בדרכים וזרימת תנועה.

סוגים שונים של תקשורת כלי רכב (V2V, V2I, V2X) המבוצעת על ידי AVs משתמשים בטכנולוגיות שונות. סקר זה מבדיל את הטכנולוגיות הללו על בסיס טווח השידור. כתוצאה מכך, Bluetooth, BLE, ZigBee ו-UWB מקובצים כטכנולוגיות לטווח קצר, בעוד ש-DSRC ו-Wi-Fi נחשבות לטכנולוגיות לטווח בינוני. באופן דומה, C-V2X ו-5G-NR מזוהות כטכנולוגיות ארוכות טווח.

בעבודה זו ביצעתי השוואה בין כל הטכנולוגיות הללו במטרה לזהות את היישומים של תקשורת V2X שבהם כל טכנולוגיה מנוצלת בצורה הטובה ביותר.

טכנולוגיית תקשורת לטווח קצר, לפי המאפיינים העיקריים שלו ומציע את השימוש בו עבור כמה יישומי V2X שאין להם דרישות זמן שהייה קפדניות כגון אזהרת התנגשות קדימה, בדיקת אגרה וזיהוי רכב. עם זאת, הם לא יכולים לתמוך ביישומים כגון נהיגה מרחוק, תחזוקה מרחוק וכו' בגלל היעדר קצבי נתונים וזמן שהייה שלהם. מתוך ארבע הטכנולוגיות לטווח קצר, UWB בולט מכיוון שהוא יכול לייצר את קצב הנתונים הגבוה ביותר והשהייה נמוכה, ולפיכך, ניתן להשתמש בו עבור יישומי רכב שהוזכרו לעיל.

טכנולוגיות לטווח בינוני כגון DSRC ו-Wi-Fi יכולות לספק ניידות גבוהה יותר לרכבים אוטונומיים. טכנולוגיית DSRC מספקת גמישות גבוהה יותר ומתאימה יותר לתקשורת V2X בהשוואה ל-Wi-Fi. יתרה מזאת, טכנולוגיית DSRC מסייעת לרכבים אוטונומיים עם יישומים שונים כגון הימנעות מהתנגשות, סיוע בשינוי נתיב וכו'. עם זאת, לטכנולוגיית DSRC יש מגבלות מסוימות כגון בעיית עומסים, קושי בשינוי תדרים מהיר, בעיות חיבור. בהתבסס על מגבלות אלו ודרישות ההשהיה הנמוכות במיוחד, טכנולוגיית DSRC אינה מספקת לחלוטין את הצרכים המגוונים של ניידות V2X.

טכנולוגיות ארוכות טווח כגון C-V2X ו-5G-NR מאפשרות טכנולוגיות למערכות תחבורה חכמות עתידיות. יישומי רכב שונים דורשים קצב נתונים גבוה, זמן שהייה נמוך ותקשורת אמינה וטכנולוגיית ה-5G-NR מסוגלת לספק תקשורת מסיבית מסוג מכונה (mMTC), פס רחב נייד משופר (eMBB) ותקשורת עם זמן שהייה נמוך במיוחד (uRLLC) לכן הוא מתאים לתקשורת V2X.

בטבלה 5, נציג סיכום השוואה של סוגי התקשורות הקיימים, טווח שימוש, סוגי טכנולוגיות, איזה מסוגי מודלי תקשורת V2X מתאימים לשימוש, מה המטרה ודוגמאות שימוש.

Communication Type	Range	Technology	Model	Purpose	Example
Short Range	10 meters	Bluetooth, BLE, ZigBee, UWB	V2V, V2P	Localized communication for close-proximity tasks.	- "Pedestrian Detected: Slow Down" - "Maintain Distance"
Medium Range	300–500 meters	DSRC, Wi-Fi	V2V, V2I	Safety-critical communication and traffic efficiency in medium-range scenarios.	- "Red Light Ahead" - "Emergency Brake Signal"
Long Range	Up to several km	5G-NR, C-V2X	V2X	Broad communication for cloud updates, traffic management, and remote monitoring.	- "Traffic Congestion Detected: Route Change" - "Firmware Update Available"

טבלה 5- השוואת סוגי תקשורות

מערכת סיוע מתקדמת לנהג

בחלק זה נסקור את מערכות סיוע לנהג מתקדמות - Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) [13]. ADAS היא מערכת משולבת בתעשיית הרכב המבטיחה את כל תכונות הבטיחות האפשריות ושיפור החוויה בנהיגה. מערכות אלו משתמשות בחיישנים, מצלמות, מכ"מ וטכנולוגיות אחרות כדי לנטר את סביבת הרכב, לנתח נתונים, לזהות סכנות פוטנציאליות, סיוע במניעת תאונות ולסייע לנהג במשימות נהיגה שונות ובכך גם יפחיתו את ההשפעה של טעויות האנוש. מערכות ADAS הן צעד מכריע לקראת כלי רכב אוטונומיים או נהיגה עצמית, מכיוון שהן מייצגות גשר בין נהיגה ידנית מסורתית לנהיגה אוטונומית מלאה. חיבור הטכנולוגיות והמערכות הללו הן מה שיוצר בסופו של דבר רכב אוטונומי.

דוגמאות למערכות סיוע קיימות:

- בקרת שיוט אדפטיבית (ACC) Adaptive Cruise Control
שומר על מהירות ומרחק קבועים מהרכב שלפניו, ומשנה את מהירותו בהתאם לתנועה. זה מפחית את הצורך להאיץ או להאט באופן ידני, מה שהופך את הנהיגה לבטוחה ונוחה יותר.
- אזהרת סטייה מנתיב (LDW) Lane Departure Warning
מערכות המשתמשות בחיישני מצלמה כדי לזהות סמני נתיב, מזהירות נהגים אם רכבם מתחיל לצאת מהנתיב שלו מבלי להשתמש באיתות. פונקציה זו ממלאת תפקיד מפתח בהימנעות מתאונות הנגרמות על ידי הסחות דעת או עייפות.
- סיוע לשמירה על נתיב (LKA) Lane Keep Assist
הרחבת היכולות של אזהרת סטייה מנתיב (LDW), מערכת זו מסייעת בשמירה על הנתיב (LKA) היא מבצעת באופן יזום התאמות היגוי קלות כדי להבטיח שהרכב יישאר במרכז הנתיב שלו, תוך מזעור הסיכון להיסחפות בטעות מחוץ לנתיב ולשפר את הבטיחות במהלך נסיעות ארוכות.
- אוטומציה של בלימת חירום (AEB) Automating Emergency Braking
מערכות המשתמשות בחיישנים כדי לנתח התנגשויות פוטנציאליות עם כלי רכב אחרים, הולכי רגל או עצמים מלפנים. אם הנהג לא מצליח לפעול באופן מידי, המערכת תפעיל אוטומטית את הבלמים כדי למנוע או למזער את השפעת ההתנגשות.
- זיהוי נקודה עיוורת (BSD) Blind Spot Detection
מערכת זו מבצעת סריקה על אזורי הרכב שהנהג אינו יכול לראות ומתריע בפני הנהג כאשר כלי רכב אחרים נמצאים בנקודות העיוורת הללו. זה מסייע בהסטת נתיבים בצורה בטוחה ומשפר את הבנת הנהג את סביבתו.

- אזהרת התנגשות קדימה (FCW) Forward Collision Warning מערכות זו מותקנות עם מצלמות מלפנים, עוקבות אחר המהירות והמרחק של הרכב מלפנים, ומתריעות בפני הנהג על התנגשויות אפשריות באמצעות אזהרות חזותיות וקוליות ועוזרות להימנע מתאונות.
- זיהוי תמרורים (TSR) Traffic Sign Recognition מערכת זו משתמשת במצלמות ובטכנולוגיית זיהוי תמונה כדי לנתח ולזהות תמרורים, ומציעה לנהגים אזהרות חזותיות או שמיעתיות כדי להנחות אותם לפעול לפי כללי התנועה.

דוגמא למערכות ברמות אוטונומיה שונות:

מהנדסי איגוד הרכב (SAE) הגדיר שש רמות של אוטונומיה, החל מרמה 0 (ללא אוטומציה) לרמה 5 (אוטונומית מלאה). טבלה 6 מציגה עבור כל רמת אוטונומיות תיאור קצר של רמת האוטומציה שסיפק הרכב, ודוגמאות לטכנולוגיות נפוצות העובדים ברכב באותה רמה. בנוסף מוסבר בטבלה את סוג החיישנים איתם עובדים בכל רמה כדי להגיע להפעלה תקינה של הטכנולוגיות המוצגות. הטבלה היא כלי שימושי להבנת רמות האוטונומיה השונות ואת היכולות של כלי רכב אוטונומיים בכל רמה.

Level	Name	Technologies	Sensors
0	Driver Only	–	–
1	Assisted	Active Cruise Control (ACC) Lane Departure Warning System (LDWS)	Ultrasonic Sensor Long Range Radar (LRR) Camera
2	Partial Automation	Lane Keep Assist (LKA) Park Assist (PA)	All Sensors from Level – 1 Short Range Radar (SRR)
3	Conditional Automation	Automatic Emergency Braking (AEB) Driver Monitoring (DM) Traffic Jam Assist (TJA) Dead Reckoning (DR)	All Sensors from Level – 2 LIDAR Long Distance Camera Stereo Camera Thermal Camera
4	High Automation	Sensor Fusion	All Sensors from Level—3
5	Full Automation	Automatic Pilot (AP)	All Sensors from Level—3

טבלה 6- סיווג טכנולוגיות רכבים אוטונומיים לפי רמות אוטונומיה [9]

דוגמא למערכות בשימוש חיישנים שונים, טבלה 7.

Classification in this paper	ADAS functions	Camera	LiDAR	Radar	Ultrasonic
Traffic Sign Detection	Traffic Sign Recognition	✓			
	Lane Departure Warning	✓			
	Lane Centering	✓			
Road Detection System	Lane Keeping Assistance	✓			
	Adaptive Cruise Control	✓		✓	
	Intersection Assistance	✓			
	Collision Avoidance	✓	✓	✓	
	Parking Assistance	✓		✓	✓
Moving Object Detection	Pedestrian Detection	✓	✓		
	Cross Traffic Alert	✓		✓	✓
	Emergency Braking System	✓	✓	✓	
	Blind Spot Detection			✓	✓
	Rear Collision Warning			✓	

✓: This sensor is usually applied for the forward ADAS function.

טבלה 7- מיפוי חיישנים למערכות [5]

סקירה מערכת קיימת

חלק זה סוקר מערכת קיימת בה משתלבות טכנולוגיות תקשורת וחיישנים.

Brand	Country	Model	Sensors					ADAS Features
			LIDAR	Camera	Radar	Ultrasonic	GPS	
Tesla	USA	Model S (AUTOPilot)	-	3 Front 2 Side 2 Rear 1 Backward	1 Forward-facing Long-range	12	✓	Emergency Braking System Parking Assistance Lane Change Assistance Lane Departure Warning Blind Spot Detection Adaptive Cruise Control Lane Centering Lane Keeping Post Collision Braking Pre-Collision Assist Braking Lane Detection Traffic Signal Recognition Moving Object Detection Active Distance Assist Active Lane Change Active Speed Limit Assist Emergency Stop Assist Blind Spot Lane Keeping Traffic Sign Recognition Active Parking Active Cruise Control Collision Warning Lane Departure Warning Dynamic Brake Control Lane Keeping Assistant Lateral Collision Avoidance Adaptive Cruise Control Turn Assist Adaptive Cruise Assist Active Lane Assist Collision Avoidance Assist Traffic Sign Recognition Speed Limit Distance Alter Adaptive Cruise Control Pilot Assist Lane Keeping Aid Passing assistance Rear Collision Warning Blind Spot Information Traffic Jam Pilot Lane Keeping Assist Cross Traffic Alert-Front Traffic Sign Recognition Advanced Parking
Ford	USA	Escape (Co-Pilot360)	-	1 Front 1 Reverse Camera	1 Forward-facing Long-range 2 Short-range	12	✓	
Cadillac	USA	CT6 (SuperCruise)	-	1 Forward 4 Surround-View 1 Driver (monocular&thermal)	1 Long-range 5 Short-range	12	✓ (with HD map)	
Benz	Germany	S Class	-	1 Front (stereo) 4 Surround-View	2 Front Multi-mode 1 Front Long-range 2 Rear Multi-purpose	12	✓	
BWM	Germany	7 Series(Pro)	-	3 Front 4 Surround-View 1 Driver (thermal)	1 Long-range 4 Short-range	12	✓	
Audi	Germany	A8	✓	1 Front 4 Surround-View 1 Thermal Front	1 Long-range 4 Medium-range	12	✓	
Volvo	Sweden	XC90	-	1 Front 4 Surround-View	1 Long-range 1 Medium-range	12	✓	
NIO	China	ES8 (NIOpilot)	-	3 Front 4 Surround View 1 Driver Monitoring	1 Medium-range 4 Short-range	12	✓	

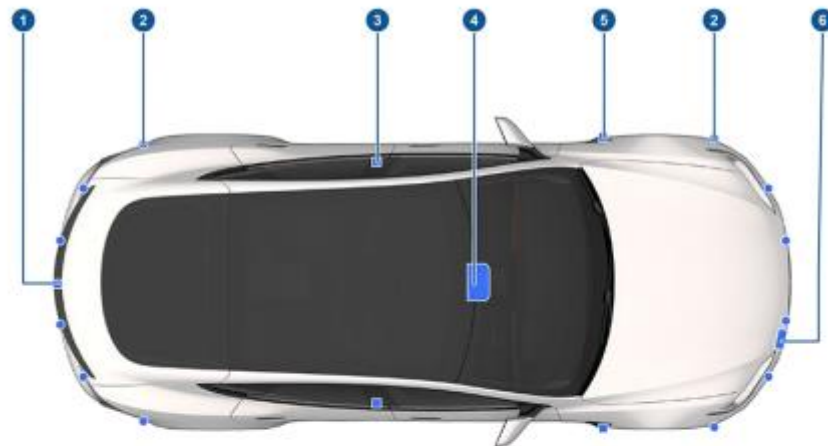
טבלה 8- שימוש בחיישנים ומערכות ADAS בחברות רכבים מסחריות [5]

נבחר ברכב טסלה מודל S לסקירה מלאה של חיישנים, תקשורות ומערכות קיימות.

טסלה מודל S [14]:

חיישנים: ברכב זה יש 8 חיישנים מהסוגים הבאים: מצלמות, חיישנים קוליים ומכ"מ. מפורט באיור 19.

Your Model S includes the following components that actively monitor the surrounding area:



1. A camera is mounted above the rear license plate.
2. Ultrasonic sensors (if equipped) are located in the front and rear bumpers.
3. A camera is mounted in each door pillar.
4. Two cameras are mounted to the windshield above the rear view mirror.
5. A camera is mounted to each front fender.
6. Radar (if equipped) is mounted behind the front bumper.

Model S is also equipped with high precision electronically-assisted braking and steering systems.

איור 19- מיפוי חיישנים בטסלה [14]

תקשורת: הטסלה משתמש בעיקר ברשתות סלולריות (4G LTE) עבור עדכונים דרך האוויר, ניווט ותכונות קישוריות. הוא גם תומך ב-Wi-Fi עבור עדכוני תוכנה מהירים יותר כאשר הוא מחובר. בנוסף, רכבי טסלה מתקשרים זה עם זה ועם שרתי טסלה באמצעות פרוטוקולים פנימיים ברשתות אלו. בלוטות' משמש גם לחיבור סמארטפונים לרכב.

לדגם טסלה מודל S יש יכולת של טייס אוטומטי Autopilot משודרגת מאוד, יכולת זו מורכבת משימוש במספר מערכות ADAS.

מערכות ADAS :

- בקרת שיוט מודעת לתנועה : שומרת על המהירות שלך ועל מרחק מעקב מתכוון מהרכב שלפניך, אם יש כזה.
- היגוי אוטומטי : שומר על המהירות והמרחק שלך מרכב מוביל תוך שמירה חכמה על Model S בנתיב שלו.
- החלפת נתיב אוטומטית : מעביר את דגם S לנתיב סמוך כאשר אתה מפעיל את האיתות והיגוי אוטומטי פעיל.
- ניווט על טייס אוטומטי : מנחה באופן פעיל את דגם S מהרמפה של הכביש המהיר ליציאה, כולל ביצוע החלפת נתיב, ניווט מחלפים, הפעלה אוטומטית של האיתות ויציאה ליציאה הנכונה.
- חניה אוטומטית : חנייה מדגם S, במקביל או בניצב.
- זימון : מזיז את Model S קדימה או אחורה, גם כשאתה מחוץ לרכב. זה שימושי לחניה במקומות חניה צרים.
- זימון חכם : מזיז את דגם S ממקום חניה ודרך סביבות מורכבות יותר, מתמך סביב מכשולים וכלי רכב אחרים, כדי לפגוש אותך או ללכת ליעד שנקבע מראש.
- בקרת רמזורים ותמרור עצור : שומר על המהירות שלך, שומר על מרחק מעקב ושומר על דגם S בנתיב שלו תוך האטה ועצירה לרמזורים ותמרורים.
- היגוי אוטומטי ברחובות העיר -נהיגה עצמית מלאה בפיקוח : ניסיונות לנסוע ליעדך על ידי מעקב אחרי עיקולים בכביש, עצירה וניהול משא ומתן בצמתים, תמרורי עצור וצמתים, ביצוע פניות ימינה ושמאלה וכניסה/יציאה מכבישים מהירים.

שילוב מערכות : החיישנים מכניסים נתונים ל-AI המשולב של טסלה, שמעבד מידע זה כדי לנווט ולקבל החלטות. רכיב התקשורת מסייע לרכבי טסלה לקבל עדכונים ומידע בזמן אמת, תוך שילוב נתונים חיצוניים עם מידע מהחיישנים כדי לייעל את ביצועי הרכב. השילוב של תקשורת וחיישנים מבטיח שכלי רכב יכולים להבין את סביבתם, לתקשר זה עם זה ולקבל החלטות נהיגה מושכלות, מה שמשפר משמעותית את הבטיחות והיעילות התפעולית.

סקירה סימולטור קרלה

סימולטור CARLA הוא פלטפורמת קוד פתוח המיועדת לחקר נהיגה אוטונומית. זה מאפשר למשתמשים לדמות תרחישי נהיגה וסביבות שונות, תוך שילוב של טכנולוגיות תקשורת וחיישנים.

סימולטור CARLA מכיל [17]:

1. חיישנים: הסימולטור כולל לידאר, ראדאר, מצלמות ו-GPS, הניתנים להרכבה על כלי רכב. חיישנים אלה אוספים נתונים על הסביבה, ומספקים קלטים הכרחיים לאלגוריתמים לקבלת החלטות.
2. טכנולוגיות תקשורת: CARLA תומכת בתקשורת רכב-אל-הכל (V2X), כולל רכב-לרכב (V2V) ותשתית רכב-לתשתית (V2I). אינטגרציה זו מאפשרת לרכבים מדומים להחליף מידע כמו אותות תנועה, מהירויות רכב ומיקומם.
3. היתוך ועיבוד נתונים: נתוני חיישנים וקלטי התקשורת מעובדים באמצעות ממשקי ה-API של CARLA, התומכים במגוון למידת מכונה ובינה מלאכותית. הנתונים המעובדים משמשים כדי לדמות קבלת החלטות בזמן אמת והתנהגות רכב, תוך חיקוי הדוק של תנאי העולם האמיתי.
4. בדיקת תרחישים: חוקרים יכולים ליצור ולבדוק תרחישי נהיגה מורכבים, כמו סביבות תנועה עירוניות בתנאים שונים. שילוב התקשורת והחיישנים מאפשר בדיקה של אסטרטגיות נהיגה מתקדמות, תמרונים שיתופיים ותגובות חירום.

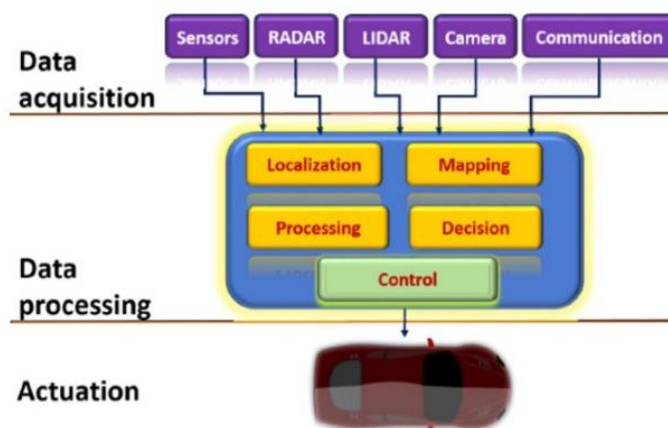
הארכיטקטורה הגמישה של CARLA מאפשרת פיתוח מתמשך של מערכות נהיגה אוטונומיות, מה שהופך אותה לכלי רב עוצמה לבדיקה כיצד ניתן לשלב חיישנים וטכנולוגיות תקשורת בכלי רכב אוטונומיים.

בחלק המעשי של התואר בניתי בסימולטור CARLA תהליך של חניה אוטונומית, בתהליך זה השתמשתי בחיישן מצלמה וע"י קבלת הקלט מהחיישן- תמונה, ביצעתי ע"י שימוש באלגוריתמיות של עיבוד תמונה האם החניה פנויה או תפוסה ולפי זה ביצעתי את החניה או שהמשכתי לחפש חניה אחרת. בסימולטור זה יצרתי מספר תרחישים של חניה במקביל ובניצב, חניה פנויה/תפוסה וכו..

אחד ההיבטים העיקריים של המוטיבציה לפיתוח כלי רכב אוטונומיים היה הורדת מספר תאונות הדרכים וצמצום גורם אנושי כגורם לתאונות. הרעיון היה שיהיה רכב אוטונומי שיהיה אמין יותר מאדם. כדי להשיג את המשימה המתבקשת הזו, כלי רכב צריכים לא רק לחקות התנהגות אנושית, אלא להשיג ביצועים טובים יותר. לאמינות החיישנים ומערכת היתוך החיישנים יש תפקיד מכריע בתהליך זה. לרכבים חייבים להיות לא רק מצלמות שישכפלו את המראה האנושי, אלא גם את החיישנים מכ"מ ולידאר כדי לחוש את המכשול, למפות את הסביבה, וכולם יחד כדי להיות אוטונומיים לחלוטין.

הוכח כי על ידי הגדלת מספר המקורות השונים של האותות (חיישנים), מודלי התפיסה (קבלת ההחלטות) משתפרים, ומשיגים אמינות גבוהה יותר של הרכב האוטונומי. תוספת של סוגים שונים של חיישנים למערכת הרכב האוטונומי מובילה להבנה טובה יותר של המעקב, שבו יש חשיבות מכרעת לא רק למידע מפורט על משתמשי דרך אחרים, על עצמים דינמיים אלא גם על עצמים נייחים.

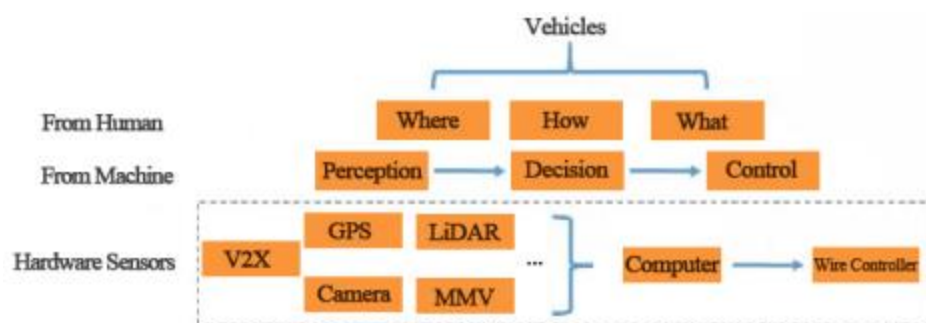
באיור 20, מציג את הארכיטקטורה הפונקציונלית של מכונית אוטונומית. הארכיטקטורה מחולקת למספר בלוקים פונקציונליים, שכל אחד מהם אחראי על סט ספציפי של משימות. הבלוקים הפונקציונליים העיקריים של הארכיטקטורה הם קבלת נתונים, עיבוד נתונים והפעלה - הרכיבים המבצעים את הפקודות ממערכת הבקרה כמו האצה, בלימה והיגוי. כל השלבים האלה הם מה שגורמים לרכב להפוך לאוטונומי [9].



איור 20- ארכיטקטורת רכב אוטונומי [9]

באיור 21, נחدد את הבלוקים שדיברנו אליהם לשכבות. המערכת האוטונומית כוללת את שכבת התפיסה (קבלת נתונים וקבלת תפיסה למציאות), שכבת ההחלטה (עיבוד נתונים וקבלת החלטות), שכבת בקרה (שליטה והפעלת הרכב). חיישני חומרה שונים בשכבת התפיסה לוכדים את מידע המיקום של הרכב ומידע על הסביבה החיצונית, החיישנים הקיימים ברכב כוללים לידר, מצלמה, מכ"מ ועוד... [7].

בהתבסס על פרטי הקלט משכבת התפיסה, שכבת ההחלטה ממודלת את הסביבה ומקבלת החלטות ושולחת את הוראות לביצוע רכב. לבסוף, שכבת הבקרה ממירה את ההוראות של שכבת ההחלטה להתנהגות הפעולה של הרכב.



איור 21- ארכיטקטורת מערכת אוטונומית [7]

טבלה 9, לחיישנים שונים יש עקרונות ופונקציות שונות, שיכולות למלא את היתרונות שלהם בתרחישים שונים לשימוש וקשה להחליף זה את זה. לדוגמא, אם לידר מותקנים על גג המכונית, אז החלק התחתון של הרכב הוא אזור מעגלי שלא ניתן למדוד. בעתיד, אי אפשר לממש נהיגה אוטונומית רק על ידי הסתמכות על חיישן יחיד המגמה היא לשלב חיישנים שונים כך שיוכלו להשלים זה את זה ובסופו של דבר לשפר את הדיוק. הרכבים ללא נהגים של ימינו מקבלים לעתים קרובות מידע על ידי שילוב נתונים מחיישנים מרובים כמו לידר, מצלמות ורדאר [7].

Performance aspect	Human	AV			CV	CAV
		Radar	Lidar	Camera	DSRC	CV+AV
Object detection	Good	Good	Good	Fair	n/a	Good
Object classification	Good	Poor	Fair	Good	n/a	Good
Distance estimation	Fair	Good	Good	Fair	Good	Good
Edge detection	Good	Poor	Good	Good	n/a	Good
Lane tracking	Good	Poor	Poor	Good	n/a	Good
Visibility range	Good	Good	Fair	Fair	Good	Good
Poor weather performance	Fair	Good	Fair	Poor	Good	Good
Dark or low illumination performance	Poor	Good	Good	Fair	n/a	Good
Ability to communicate with other traffic and infrastructure	Poor	n/a	n/a	n/a	Good	Good

טבלה 9- השוואה בין יכולות תחושה של נהגים וחיישנים בכלי רכב אוטומטיים [7]

הפיתוח והפריסה של כלי רכב אוטונומיים (AV) מהווים קפיצת מדרגה משמעותית בטכנולוגיית התחבורה, ומבטיחה לשפר את הבטיחות, היעילות והניידות. עבודה זו חקרה את ההיבטים הרב-גוניים של AVs, כולל ההגדרות שלהם, רמות האוטונומיה והיתרונות והחסרונות שהם מציגים. בחינת חיישנים כגון מצלמות, מכ"מ, לידאר וחיישנים קוליים מדגישה את המורכבות והתחכום הנדרשים כדי לאפשר נהיגה אוטונומית. כל סוג חיישן תורם עוצמות ייחודיות ועומד בפני מגבלות ברורות, המחייבות שילוב של טכנולוגיות אלו כדי להשיג תפיסת רכב אמינה.

יתר על כן, הניתוח של טכנולוגיות תקשורת - Wi-Fi, 5G-NR, C-V2X, DSRC, Bluetooth - מדגיש את התפקידים הקריטיים שלהן במתן אינטראקציות בין רכב לכל דבר (V2X). טכנולוגיות אלו מבטיחות קישוריות איתנה וחילופי נתונים, אשר חיוניים לפעולה חלקה של AVs בסביבות שונות. בעוד שלכל טכנולוגיה יש את היתרונות והאתגרים הספציפיים שלה, השילוב וההתפתחות שלה יהיו קריטיים לעתיד התחבורה האוטונומית.

ככל שהתעשייה מתקדמת, מחקר ופיתוח מתמשכים יתייחסו למגבלות הנוכחיות ויסלול את הדרך לרכבים אוטונומיים לחלוטין. בסופו של דבר, השילוב המוצלח של AVs בחיי היומיום טומן בחובו את הפוטנציאל לשנות את התחבורה, להפוך אותה לבטוחה יותר, יעילה יותר ונגישה יותר לכולם.

- [1] (2020) Connected and Autonomous Car, ITU.
<https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Africa/Documents/PRIDA%202020%20-%20ONLINE%20Capacity%20building%20%26%20digital%20services/Course%20materials%20II.pdf>
- [2] Intrator, Yoav & Morgan, J. (2018). Technology INSIGHTS | GLOBAL Autonomous Economy: Coming Sooner Than You Think.
- [3] SAE international's (2021), SAE Levels of Driving Automation,
<https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>
- [4] Kocić, J., Jovičić, N., & Drndarević, V. (2018, November). Sensors and sensor fusion in autonomous vehicles. In 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR) (pp. 420-425). IEEE.
- [5] Li, X., Lin, K. Y., Meng, M., Li, X., Li, L., Hong, Y., & Chen, J. (2021). Composition and application of current advanced driving assistance system: A review. arXiv preprint arXiv: 2105.12348.
- [6] Koon J. , (2023). How Many Sensors For Autonomous Driving? .
<https://semiengineering.com/how-many-sensors-for-autonomous-driving/>
- [7] Wang, P. (2021, November). Research on comparison of lidar and camera in autonomous driving. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2093, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- [8] Dakroub, H., Shaout, A., & Awajan, A. (2016). Connected car architecture and virtualization. *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 9(2016-01-0081), 153-159.
- [9] Padmaja, B., Moorthy, C. V., Venkateswarulu, N., & Bala, M. M. (2023). Exploration of issues, challenges and latest developments in autonomous cars. *Journal of Big Data*, 10(1), 61.
- [10] Aziz, D., Hurley, F., & Bohm, C. Advanced Connectivity Architecture for 5G-V2X and DSRC.
- [11] Ahangar, M. N., Ahmed, Q. Z., Khan, F. A., & Hafeez, M. (2021). A survey of autonomous vehicles: Enabling communication technologies and challenges. *Sensors*, 21(3), 706.
- [12] Kenney, J. B. (2011). Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. *Proceedings of the IEEE*, 99(7), 1162-1182.
- [13] Farhad Shaikh (2024). Advance Driver Assistance Systems (ADAS).
- [14] (2021). Model S Owner's Manual.
https://www.tesla.com/ownersmanual/models/en_us/

- [15] Wong, W. K. (2023). Secure Over-the-Air Software Updates for Autonomous Vehicle Firmware. *Journal of Artificial Intelligence Research and Applications*, 3(2), 1-23.
- [16] CARLA Documentation.
<https://carla.readthedocs.io/en/latest/>
- [17] Mohammed, Marwan & Shareef, Shareef & Ghafoor, Kayhan. (2022). Adaptive and Optimized Control Channel Utilization in Vehicular Ad Hoc Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. 10.1155/2022/1393090.