

פיתוח מערכת אוטונומית לריסוס בבתי צמיחה לפלפל

Development of an autonomous system for spraying peppers in greenhouses

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אביטל בכר¹, יעל אידן², אמיר שפירא³, רון ברנשטיין¹, ויקטור אלחנתי¹, אוהד בן שחר⁴, אברהם גמליאל¹, גיא לידור¹, איתמר דר^{1,2}, טימאה איגנט¹, אבי כהן¹, ויקטור בלוד¹, יוסף גרינשפון¹, לביא רוזנפלד¹, סבטלנה דוברינין⁵, רבקה אופנבך⁶

¹המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, ²המחלקה להנדסת תעשייה וניהול, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, ³המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, ⁴המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, ⁵שירות הדרכת המקצוע, משרד החקלאות, ⁶מ"פ ערבה תיכונה וצפונית

Avital Bechar (avital@agri.gov.il); Inst. of Agri. Eng., A.R.O. P.O.Box 6, Bet-Dagan, 50250

אוגוסט 2013

אלול תשע"ג

האם הנך מאשר את ציון הפסקה הבאה בדף הפתיחה לדו"ח כן/לא מחק את המיותר*
הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים



חתימת החוקר

תקציר

במדינת ישראל כ- 29,000 דונם פלפל מתוכם כ- 16,800 דונם בערבה (בעונת 2008 – 2009). רוב הגידול הוא בבתי צמיחה כאשר בערבה הגידול מתבצע רק בבתי צמיחה. ריסוס חומרי הדברה הינו אחד מתהליכי הגידול השכיחים וההכרחיים בשלבי הגידול והקטיפה בפלפל ומצריך עבודת ידיים רבה. פעולת הריסוס הינה אינטנסיבית ומתבצעת בתדירות של אחת לשבוע עד עשרה ימים. כיום שלב הריסוס מתבצע באופן ידני בצוותים של פועל אחד עד שניים כאשר בממוצע כל פועל מכסה שטח של כ- 50 דונם במהלך העונה. בשל מבנה חלקות הפלפל בבתי צמיחה וצורת הגידול, רוחב המעברים בתוך השורות הינו כ- 40 ס"מ בלבד ובשל כך השימוש במרססים ממוכנים קיימים אינו אפשרי. מטרת המחקר היא לפתח מערכת אוטונומית לריסוס פלפל בבתי צמיחה. מערכת אוטונומית תביא לחסכון בידיים העובדות בשלב הריסוס בפלפל, חיסכון בחומרי ההדברה, קבלת פילוג ריסוס אחיד לאורך השורה ולגובהה. התועלת הצפויה מהמחקר הינה חיסכון בידיים עובדות והפניית כח האדם ממשימות ריסוס לעבודות יצרניות ובכך לגרום להקטנת עלויות הייצור, העלאת רווחיות הענף ושרידות המשק והפחתת התלות בזמינות כח האדם. בקרה מתמדת של כמות החומר המרוסס וקבלת פילוג ריסוס אחיד לאורך השורה ולגובהה אשר יעלה את אפקטיביות הריסוס, יאפשר להקטין את כמויות חומרי ההדברה המיושמות וצמצום פגיעה בעובדים כתוצאה ממגע עם חומרי ההדברה. בוצעו סקר של מבני הצמיחה הקיימים לפלפל, מדידות גיאומטריות של מבני הצמיחה, החלוקה הפנימית לחלקות וחקירה של שיטות הריסוס הקיימות בחממות ובתי רשת לפלפל. בוצע איפיון המערכת, נבחנו 3 חלופות

לפיתוח. פותח מודל לבחינת ביצועי המרסס כתלות במשתני התכן. פותחה סימולציה לחישוב התפלגות חומר הריסוס על שיח הפלפל לאורך ציר הגובה כתלות במספר הפומיות, סוג הפומיות, המרחק ביניהן ומשתנים נוספים. פותח מדד ליעילות פיזור החומר ומודל תיפעול מרסס אוטונומי במבנה צמיחה. נמצאו המשתנים הדומיננטים במערכת ובוצעו ניתוחי רגישות עליהם לבדיקת השפעתם. הוכשרה והותאמה חממה רב תכליתית במכון להנדסה חקלאית לבחינה בתנאי שדה ובצורה מיידיית ומדויקת של המערכות השונות, החיישנים, מערכת הריסוס והאלגוריתמים לאוטונומיות. נבנתה מערכת ניסוי המבוססת על פלטפורמת TXT לבחינת חיישנים ואלגוריתמים בתנאי שדה אמיתיים במבני צמיחה לפלפל. לשם בחינת המערכת פותחו אלגוריתמים אשר הביאו את המערכת לאוטונומיות חלקית. פותחה מערכת ראייה ממוחשבת, אדפטיבית ייחודית לזיהוי שבילים במבני צמיחה בסביבות בילתי מובנות ודינמיות. השיטה המשלבת אלגוריתם למידה מודרך (Supervised learning) מבוסס עץ החלטה CART לצורך סיווג הפיקסלים בתמונת צבע. פותחו אלגוריתמים לזיהוי קצה השורה והיכולת לביצוע סיבוב למעבר הבא בזמן אמת ולתנועת המרסס ממעבר אחד לשני. פותחו שני ממשק שליטה ידניים מבוססי xbox ו-Wii לצורך ניווט הפלטפורמה הרובוטית על ידי מפעיל המערכת בכדי לנייד את המערכת בין בתי הצמיחה השונים ולאזור התפעול/אכסון של המערכת. הותאם מרסס מסחרי מסוג ריקשה לביצוע המשימה באופן אוטונומי. פותחו מערכת בקרת היגוי ומערכת ממוחשבת לניווט ושליטה במרסס. כמו כן המרסס הותאם לשליטה ופעולה ללא יד אדם. לאחר הרכבת כל תתי המערכות, ההתאמות הנדרשות בכדי להפוך המרסס המסחרי לאוטונומי והבאת אב הטיפוס הראשון לפעיל, בוצעו ניסויי מעבדה במצב off line ו- real time וניסויים בחממה במצבי on line ו- real time. בוצע תכן של אב טיפוס שני המאפשר כניסה למעברים של חלקות פלפל בחממות מסחריות. הותאמה מערכת הריסוס למשימת ריסוס רובוטי בחממות פלפל מסחריות. באיפיון המערכת נמצא כי החלופה המועדפת הינה פלטפורמה אוטונומית גדולה בעלת מיכל בנפח מעל 50 ל'. הטיית מוט הריסוס בניצב לכיוון הנסיעה פוגעת ביעילות הריסוס ועל כן בעת בניית מרסס אוטונומי יש להוסיף אלמנט מייצב למוט הריסוס. סטייה ממרכז נתיב הנסיעה של הרובוט גורמת אף היא לירידה חדה בביצועים. במודל התיפעול נמצא כי הנצילות המירבית התקבלה עבור מיכל של 100 ל' וחלקות בעלות שורות באורך 60 מ'. מערכת הראייה הממוחשבת הגיע להצלחה של 93% בממוצע בתמונות בדידות ולהצלחה מלאה בניסויים. אב טיפוס הראשון נסע בהצלחה באופן אוטונומי במעברים בין השורות באורך כ- 18 מ' ללא פגיעה בשורות או בצמחים. אלגוריתם זיהוי סוף שורה ויכולת סיבוב זיהה בצורה מלאה בזמן אמת את נקודות סוף השורה וביצע בהצלחה את ההחלטה על יכולת הסיבוב. האלגוריתם לתמרון המעבר בין השורות עבד בצורה חלקית. ניסויים ושיפור האלגוריתמים עדיין מתבצעים.

תוכן עניינים

5.....	מבוא.....	1
5.....	רקע מדעי.....	1.1
5.....	מטרות המחקר.....	1.2
6.....	שיטות וחומרים.....	2
6.....	סקר מבני צמיחה.....	2.1
7.....	חקירת שיטות הריסוס הקיימות במבני צמיחה לפלפל.....	2.2
8.....	התאמת חממה.....	2.3
8.....	פיתוח מודל ניתוח יעילות פיזור חומר הריסוס.....	3
11.....	איפיון המערכת.....	4
13.....	פיתוח אלגוריתמים לתנועה בחממה.....	5
13.....	פיתוח אלגוריתם אדפטיבי לתנועה בתוך שורות בתנאים דינמיים.....	5.1
14.....	פיתוח אלגוריתם לזיהוי קצה שורה ויכולת סיבוב.....	5.2
16.....	פיתוח אלגוריתם לפניה בסוף שורה וכניסה לשורה חדשה.....	5.3
17.....	פלטפורמה לבחינת האלגוריתמים.....	6
17.....	פיתוח הפלטפורמה.....	6.1
18.....	פיתוח ממשק שליטה ידני על המערכת הרובוטית.....	6.2
18.....	אב טיפוס I.....	7
18.....	התאמת מרסס מסחרי ופיתוח מערכת הבקרה וההיגוי.....	7.1
20.....	פיתוח היחידה האוטונומית.....	7.2
20.....	אב טיפוס II.....	8
20.....	מיזעור מרסס.....	8.1
22.....	התאמת מערכת הריסוס.....	8.2
24.....	ניווט.....	9
25.....	סיכום ומסקנות.....	10
26.....	תודות.....	11

1 מבוא

1.1 רקע מדעי

במדינת ישראל כ- 29,000 דונם פלפל מתוכם כ- 16,800 דונם בערבה (בעונת 2008 – 2009), רובם בבתי צמיחה (בערבה הגידול מתבצע רק בבתי צמיחה). גידול פלפל בבתי צמיחה מאופיין בצמחים גבוהים בעלי נוף צפוף וסבוך, ומרווח קטן בין השורות. תנאים אלה, יחד עם עונת הגידול הארוכה מהווים כר נוח להתבססות והתפרצות פגעים שונים כגון תריפס הפרחים המערבי ומחלת הקימחונית. שיטות גידול אלה פוגמות באפשרות ליישום יעיל של אמצעי הדברה באמצעי יישום ממונעים. גידול פלפל מתאפיין ביישום אינטנסיבי ומוצלח של הדברה ביולוגית כנגד מזיקים. עם זאת מתחייבות מעת לעת פעולות הדברה בתכשירים כימיים כדי להתמודד עם לחץ פגעים גדול או עם פגעים שאין כיום כנגדם אמצעי הדברה ביולוגיים (כנגד קמחונית לדוגמה). ריסוס תכשירי הדברה הינו אחד מתהליכי הגידול השכיחים וההכרחיים בשלבי הגידול והקטיף בפלפל ומצריך עבודת ידיים רבה. הריסוס מתבצע מתוך צורך להגן על הצומח מפני מזיקים ומחלות הפוגעים ביבול ומפחיתים את התנובה. פעולת הריסוס הינה אינטנסיבית ומתבצעת בתדירות של אחת לשבוע עד עשרה ימים. כיום שלב הריסוס מתבצע באופן ידני בצוותים של פועל אחד עד שניים כאשר בממוצע כל פועל מכסה שטח של כ- 50 דונם במהלך העונה שהינם כ- 4 ימי עבודה לדונם בחישוב כלל שנתי. בבתי צמיחה לגידול ירקות כגון עגבניות, מלונים ועוד מופעלים זה מספר שנים מרססים מתנייעים שונים. מרססים אלה מבוססים על מפוח אויר צירי ונעים בין השורות. גידול הפלפל, לעומת זאת, מאופיין בשתי שורות צמודות בערוגה, אשר יוצרות "קיר" צמחי רחב וצפוף. בנוסף לכך, המרווח בין השורות במרבית בתי הצמיחה לגידול פלפל הוא צר ביותר ואינו מאפשר את תנועת המרססים המתנייעים (רוחב המעברים בתוך השורות הינו כ- 40 ס"מ בלבד). שיטות ריסוס הנפוצות בפלפל הן: (1) ריסוס באמצעות מוט ריסוס אנכי בלחץ הידראולי או באמצעות מרסס גב הדף אויר. אמצעים אלה ובמיוחד מוט הריסוס האנכי מתאפיינים בנפחי תריסס גבוהים ופיזור לא אחיד של התריסס בחלקי הצמח השונים. כאשר מדובר על יישום תכשירי הדברה סיסטמיים, אלה מתפזרים באופן משני ברקמות הצמח ועל כן, יעילותם אינה נפגמת כל כך מיישום לקוי. לעומתם, ההצלחה בהדברה באמצעות תכשירים דוגמת תכשירי נחושת, גופרית, ומיצויים צמחיים שונים (עץ האיזדרכת, ועוד) תלויה באיכות היישום, ובצורך להביא את התכשיר בכמות הדרושה לכל מקום בצמח. (2) מרססים המבוססים על מפוח צד, שנעים בשביל מרכזי במבנה ומפזרים תריסס למרחק אל תוך שורות הגידול אשר ניצבות במקביל או בניצב לתנועת המרסס. הפעלת המרססים מתבססת על פיזור התריסס למרחק רב וביטול הצורך לנוע בתוך שורות הגידול. יתרונותיו של מרסס מסוג זה מתמקדים בהספקים הגבוהים וההתאמה למגבלות הגידול. אולם, השילוב של שני משתנים מפריעים, דהיינו, צמחים גדולים וסבוכים ומרווח צר בין הערוגות, עלול להפריע לפיזור יעיל של תכשירי ההדברה בתוך הנוף הסבוך.

פיתוח של מערכת אוטונומית לריסוס פלפל בבתי צמיחה והתאמת יחידת הריסוס למערכת הרובוטית ולריסוס בין שורות פלפל, יאפשר להקטין את כמות הידיים העובדות המושקעות בריסוס ולהפנותן לביצוע משימות יצרניות אשר יגדילו את תפוקת המשק, רווחיות ושרידות החקלאי. בנוסף, תהיה הפחתה בכמויות תכשירי ההדברה שבשימוש כתוצאה מריסוס מדויק. אשר יקטינו את הסכנות הטמונות בחשיפה של עובדים לחומרי הדברה, את כמות החומר על המוצר החקלאי ויגדילו את רווחיות הענף.

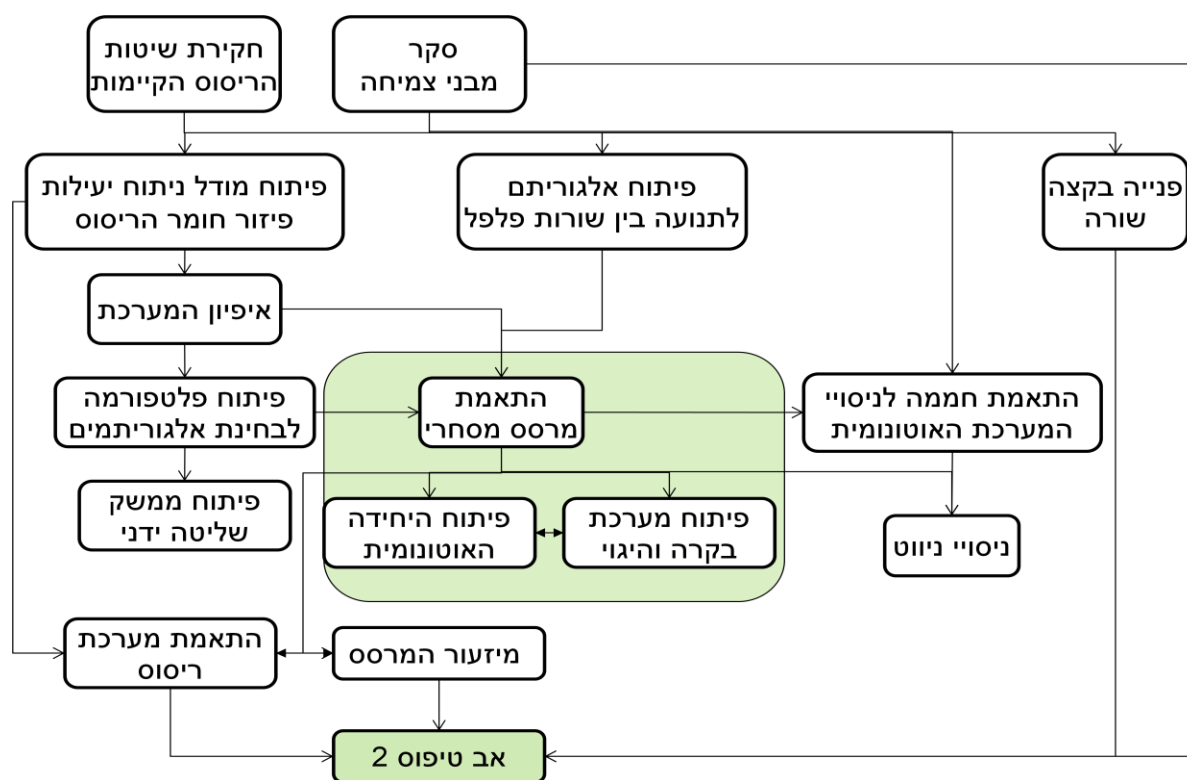
1.2 מטרת המחקר

- איפיון של מערכת ריסוס אוטונומית הכוללת את מערכות המשנה הבאות: פלטפורמה נושאת, מערכת הנעה ובקרת היגוי, מערכת ניווט, מערכת זיהוי, מערכת ריסוס, מערכת בקרה ראשית. חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי של חלופות שונות.

- פיתוח אלגוריתמים לזיהוי נתיב ההתקדמות, המטרות לריסוס, היגוי ובקרה המערכת האוטונומית ובקרת הריסוס למשימת ריסוס פלפל בבתי צמיחה.
- תכנון מפורט ובנית אב טיפוס של מערכת ריסוס אוטונומית עבור פלפל בבתי צמיחה, ובדיקת ביצועיה.
- הוכחת היתכנות ריסוס סלקטיבי בניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים.

2 שיטות וחומרים

ביצוע המחקר כלל שלבים רבים (איור 1) אשר בחלקם הצריכו עבודה בשילוב של מספר תחומים במקביל ובחלקם סדרתית. המחקר החל בסקר מבני צמיחה של מבנים הקיימים בערבה לגידול פלפלים ובחקירת שיטות הריסוס הקיימות במבני צמיחה לפלפל. על סמל הנתונים שהתקבלו פותחו אלגוריתמים לתנועה בחממת פלפל ומודל לניתוח יעילות הריסוס. במקביל אופיינה המערכת לריסוס אוטונומי בבתי צמיחה לפלפל, פותחה פלטפורמה לבחינת האלגוריתמים השונים ופותח ממשק ידני לשליטה בפלטפורמה. בגמר פיתוח השלבים הללו פותח אב טיפוס ראשון שכלל התאמת מרסס מסחרי מיושן ריקשה של האחים רז, יחידה אוטונומית ומערכת בקרה והיגוי. חממת הרובוטיקה שבמכון להנדסה חקלאית הותאמה לניסויי אב הטיפוס הראשון ובוצעו ניסויי ניווט ראשוניים. בהמשך בוצע פיתוח יכולת הפניה בקצה שורה לשורה חדשה המורכב מאלגוריתם לזיהוי קצה השורה ואלגוריתם לביצוע התימרון. פותחה מערכת ריסוס חדשה המותאמת לריסוס רובוטי ובוצע תכנון למיזעור מרסס מסחרי מסוג צייקו של מרססי דגניה בכדי שיוכל לפעול באופן לא מאויש בחממה מסחרית. בפרקים הבאים יורחב על כל שלב שתואר באיור 1.



איור 1: תאור שלבי העבודה במחקר.

2.1 סקר מבני צמיחה

התבצעו מדידות גיאומטריות במספר סוגים של בתי צמיחה. בכל המבנים ההדלייה הינה ספרדית.

(1) חממה – בכל שורה 2 ערוגות. מרווח שתילה 35 ס"מ. גובה שיח מקסימאלי כ- 2 מטרים. המרחק בין השורות 110 ס"מ. בין השורות נותר מעבר של 45 – 60 ס"מ. (2) בית רשת - בכל שורה 2 ערוגות, מרחק בין קורדונים: 80 ס"מ,

רוחב מעבר בשורות: 50 ס"מ, מרחק מקצה שורה לקצה המבנה 100 ס"מ, שביל מרכזי (איור 2). (3) מנהרה עבירה 1 – בכל שורה ערוגה אחת, מרחק בין קורדונים: 115 ס"מ, רוחב מעבר בשורות: 80 ס"מ, מרחק מקצה שורה לקצה המבנה 170 ס"מ, לא קיים שביל מרכזי (איור 3). (4) מנהרה עבירה 2 – בכל שורה ערוגה אחת, מרחק בין קורדונים: 100 ס"מ, רוחב מעבר בשורות: 50 ס"מ, מרחק מקצה שורה לקצה המבנה 170 ס"מ, לא קיים שביל מרכזי. (5) חממת מו"פ ערבה – המבנה אינו סטנדרטי ואינו מאפיין חממות חקלאים באזור. בכל ערוגה 2 שורות, מרחק בין קורדונים: 1 מ', רוחב מעבר בשורות: 0.7 מ', מרחק מקצה שורה לקצה המבנה 1 מ', לא קיים שביל מרכזי (איור 4).



איור 2: בית רשת.



איור 3: מנהרה עבירה, ימין - ערוגה אחת בשורה. שמאל - שתי ערוגות בשורה.



איור 4: חממת מו"פ ערבה.

בכל המבנים שנמדדו, רוחב המעבר המינימלי בין השורות היה 50 ס"מ מלבד בחממה ששם הרוחב המינימלי היה 45-60 ס"מ. רוחב המעבר המינימלי מתייחס לנקודה הצרה ביותר לכל גובה הצמחים בשורות אשר נמצאת בדרך כלל בגובה של 0.5 – 1.5 מ' מעל פני הקרקע כך שבגובה פני הקרקע רוחב המעבר הינו גבוה מ- 50 ס"מ. סקר בתי הצמיחה המלא מופיע בדוח שנה א'.

2.2 חקירת שיטות הריסוס הקיימות במבני צמיחה לפלפל

שתי שיטות ריסוס הנפוצות בפלפל הן: (1) ריסוס ידני על ידי פועל הנושא מרסס או מוט ריסוס נייד ועובר בכל השורות. במקרה של שימוש במוט הריסוס הנייד העבודה צורכת שני פועלים, אחד העובר בשורות והשני מתפעל וגולל את המרסס מהשביל המרכזי. (2) ריסוס באמצעות מפוח אשר עובר בשביל במרכזי בבית הצמיחה ובאמצעות הסעת אוויר מרסס את השורה. השימוש בשיטה זו נובע מחוסר בזמן ובידיים עובדות לכיסוי כל השטח בשיטה הראשונה. חסרונות שיטה זו הינם חוסר אחידות בהרבצת חומרי ההדברה לאורך השורה בשל פילוג במהירות האוויר הנושא

לאורך השורה, בתחילת השורה קיימת נגירה ובסופה החומרים אינם מגיעים, בחלק מהמקרים מתבצע ריסוס ידני נוסף בכדי לתקן את חוסר האחידות בריסוס שהתבצע בעזרת המפוח.

חקירת השיטות הקיימות התבצעה במשק אופייני במושב עין יהב המתמחה בגידולי פלפל בחממות (ליבנה 2010). שטחי הגידול של המשק מסתכמים ב- 170 דונם כאשר 50% מהשטח מנוצל לגידול פלפל. רק 6% מתפוקת הפלפל משווק בשוק המקומי. על פי הערכות המגדל עלות ייצור (גידול) 1 ק"ג פלפל כיום הוא 4.5 ₪ ותפוקת הפלפל היא כ- 9 טון פרי לדונם.

התבצעו מדידות על עבודת הריסוס הקיימות על מנת להבין את אופן, שלבי וזמני העבודה. נלקחו זמנים של אלמנטים שונים בעבודה. עבודת הריסוס התבצעה על ידי 4 פועלים באמצעות מרססי גב מוטוריים כאשר במרכז בית הרשת ניצב המיכל המרכזי בנפח של 500 ליטר בו מכינים את חומר הריסוס וממנו ממלאים את המיכלים של מרססי הגב. הכנת חומר הריסוס כוללת ערבוב בדלי לפני ההכנסה למיכל הגדול זאת על מנת למנוע משקעים וגם הוספת חומר משטח. נפח המיכל של מרסס הגב הינו 15 ליטר. לפי דברי החקלאי הצריכה הינה כ- 35 ליטר לדונם, המדידות הינן לשורת פלפל באורך 54 מ'. זמן מחושב לריסוס המתבסס על המדידות עומד על כ- 40 דקות לדונם. התהליך חוזר על עצמו עד לכיסוי כל בית הגידול. בסוף הריסוס מנקים את המרססים ואת המיכל המרכזי. תיאור מלא של חלק זה מופיע בדוח שנה א'.

2.3 התאמת חממה

לשם ביצוע בדיקות וניסויים בעיבוד התמונה, ראייה הממוחשבת, ניווט ואלגוריתמים השונים, הוכשרה חממה רב תכליתית במכון להנדסה חקלאית. החממה הינה בשטח של כ- 0.4 דונם (אורך – 24 מ' ורוחב – 16 מ'). נישתלו 6 ערוגות פלפל כאשר בכל ערוגה 2 שורות גידול. העומד הינו 2.5 שתילים. כיוון השורות הוא 285 מעלות מהצפון. בכדי להתאים את המרווחים בין הערוגות לאב הטיפוס הראשון מיקום 3 הערוגות הצפוניות נקבע כך שהמרחק בין הערוגות הינו 2 מ' וצידן המערבי קוצר בכ- 4 מ' (אורך שורות של כ- 18 מ') בכדי לאפשר סיבוב של המרסס המסחרי ממעבר אחד לאחר. אורך 3 הערוגות הדרומיות הינו השורות 22 מ' והמרחק בין הערוגות נקבע ל- 1.0 מ' ו- 0.8 מ' לסירוגין (איור 5). הזנים שנישתלו הינם סיליקה (זן אדום), 117 (זן צהוב) Evergreen 71800 (זן ירוק).

3 פיתוח מודל ניתוח יעילות פיזור חומר הריסוס

פותח מודל לבחינת ביצועי המרסס כתלות במשתני התכן (Livne et al., 2010). המודל מומש בסימולציה של פיזור חומר הריסוס ב-Matlab. הסימולציה מאפשרת לחשב את התפלגות חומר הריסוס על השיח בכל נקודה על ציר הגובה (ציר Y, איור 5). המודל מאפשר להתאים את מאפייני המרסס כדוגמת מספר פומיות, והמרווח בין הפומיות אל מאפייני סביבת העבודה כדוגמת מרווח בין השורות, גובה השיח ומאפייני הטיפול כדוגמת סוג הפומית (ספיקה וזווית הפיזור) והגבלות על כמות חומר הריסוס. המודל מחשב גם את השפעת הסטיות על יעילות הריסוס (ליבנה, 2010). המדד ליעילות פיזור החומר הוגדר כיחס בין הצלחה (כמות חומר הריסוס בתחום הרצוי) לבין אי-הצלחה (כמות חומר הריסוס מעל או מתחת לתחום הרצוי). ככל שערך המדד גבוה יותר הריסוס יעיל יותר. המדד נקרא "Odds Ratio". חישוב מרכיבי מדד היעילות:

$$\text{Efficiency} = \begin{cases} TF = F(y) - UB, & F(y) > UB \\ TT = F(y), & UB \geq F(y) \geq LB \\ FT = LB - F(y), & F(y) < LB \end{cases}$$

$F(y)$ – פונקציית הצפיפות של כמות החומר שרוססה לאורך ציר הגובה (ציר Y).

$$TT_{\%} = \frac{TT}{Total} * 100\%$$

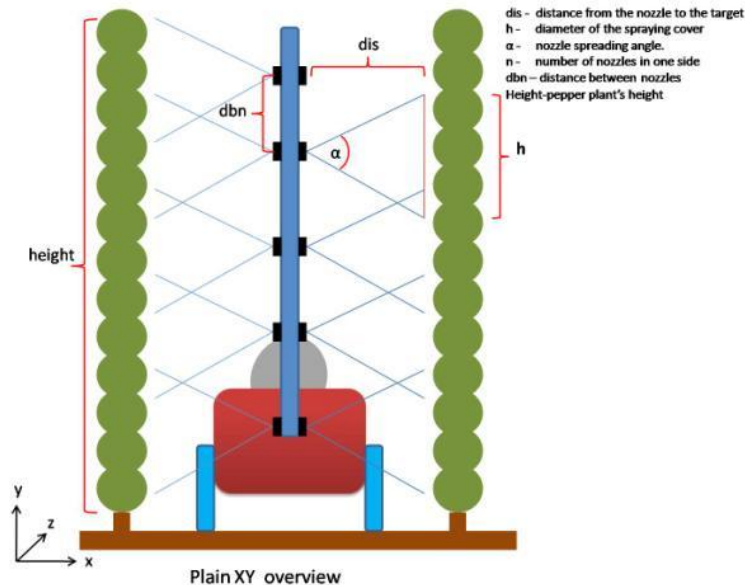
$$TF_{\%} = \frac{TF}{Total} * 100\%$$

$$FT_{\%} = \frac{FT}{Total} * 100\%$$

TT – כמות חומר שרוססה בתחום הרצוי.
 TF – כמות עודפת של חומר.
 FT – כמות החומר שחסרה לתחום הרצוי.

מדדי יעילות פיזור החומר הינם :

$$Odds Ratio = \frac{TT}{TF+FT} \quad Total = TF + FT + TT$$



איור 5 : הפרמטרים של המרסס האוטונומי

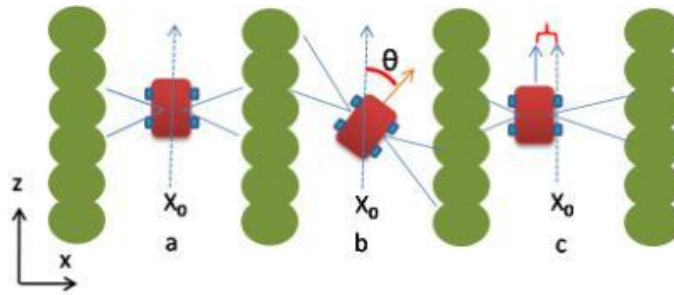
בוצע ניתוח של השפעת הטיית המרסס ממרכז השביל על כיסוי השורות בחומר ריסוס בהשוואה לתנועה ישירה במרכז השביל. הוגדרו 4 סוגי הטיית בנתיב תנועת המרסס וחושבו מדדי יעילות פיזור החומר עבורם (ליבנה, 2010). כאשר המרסס סוטה מנתיב ההתקדמות לאורך השורה, זווית הריסוס והמרחק מפומיות הריסוס אל הצמחים בשורה משתנה ומשפיע על כמויות החומר והאזורים אליהם מגיע חומר הריסוס.

ההטיות שהוגדרו הן : (א) הטייה במקביל למרכז הנתיב (איור 6) – כאשר הטווח למטרה יקטן, שטח שמכוסה על ידי פומית בודדת יקטן וצפיפות החומר ליחידת שטח תגדל ואזורים אחרים לא יכוסו. כאשר הטווח גדל השטח שמכוסה על ידי הפומית גדל, ולכן צפיפות החומר על אותו שטח תקטן (איור 6א). (ב) הטייה בכיוון (YAW) – שינוי זווית ההתקדמות בגודל 'θ' מגדילה את המרחק בין הפומית אל הצמח. (ג) הטיית מוט הריסוס או המרסס לצדדים (ROLL) – (איור 7). (ד) הטיית המוט או המרסס קדימה או אחורה (Pitch).

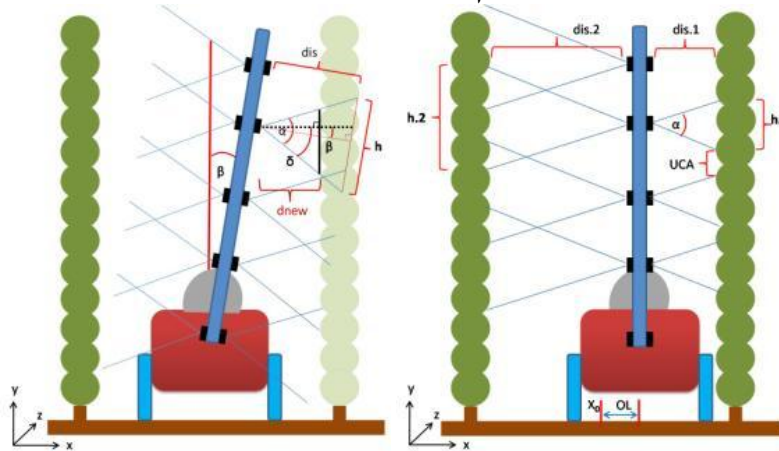
התוצאות מתייחסות לפרמטרים הבאים : גובה שיח הפלפל - 2 מטר, ספיקת פומית 0.2 ליטר לדקה, זווית פיזור הפומית 40 מעלות. כאשר הסטייה במקביל למרכז הנתיב גדלה, מדד היעילות, Odds Ratio קטן. כאשר גודל הסטייה 56mm (איור 8) נוצר מקסימום מקומי מכיוון שהגדלת הסטייה משפרת את הפיזור בצד אחד יותר מאשר גורעת מהצד השני, אולם מכיוון שהמגמה הכללית היא עדין ירידה במדד היעילות אין משמעות רבה לתופעה.

כאשר זווית ההטייה בכיוון (YAW) גדלה עד 10°, מדד היעילות Odds Ratio גדל עד לרמה של 10.35 (איור 8) **שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.** מאחר וההטייה מגדילה את אלומות הצד שנוצרות באיזורי החפיפה עד לכמות המקסימלית בתחום הרצוי ולכן מדד ה- TT גדל ומדד ה- FT קטן. ניתן לשקול להתקין את הפומיות בהטייה של 10°

קדימה באופן קבוע, אולם במחקר עתידי יש לבדוק כיצד המערך החדש יושפע על ידי כל הסטיות וההטיות שנבחנו עד כה. כאשר זווית ההטייה גדולה מ- 10° , מדד היעילות קטן.

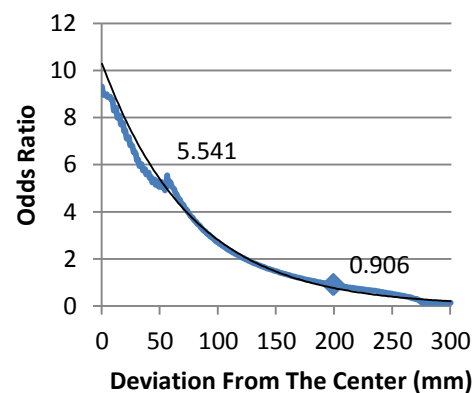
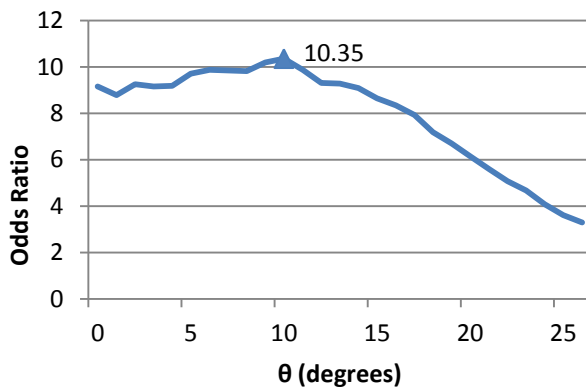


איור 6: סטיות מנתיב הריסוס. a – ריסוס תקין ללא סטייה. b – סטייה זוויתית מכיוון הנסיעה. c – סטייה במקביל למרכז הנתיב.



איור 7: (א) סטייה במקביל למרכז נתיב הריסוס, (ב) הטיית המוט בניצב לכיוון הנסיעה.

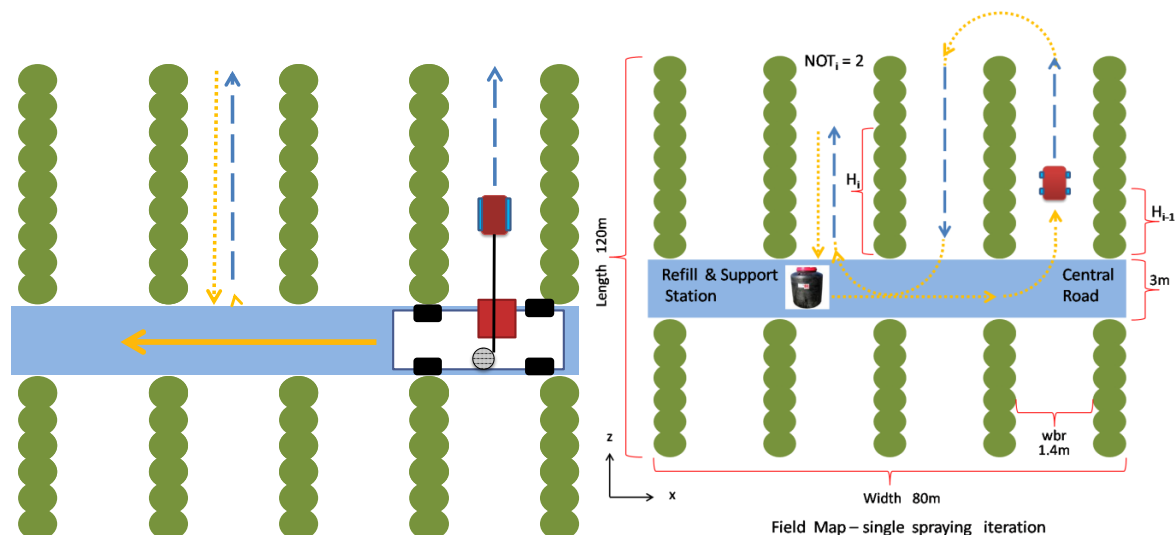
כאשר זווית ה-ROLL של מוט הריסוס גדלה, מדד היעילות Odds Ratio של פיזור חומר הריסוס קטן. עד הטייה של 5° מדד היעילות יורד באופן תלול. הטיית המוט משנה את זווית הפומית ואת המרחק בין הפומית למטרה ולכן משפיעה על פיזור החומר, ככל שמיקומה של הפומית גבוה יותר טיב הפיזור של הפומית נפגע יותר. ככל שזווית ההטייה PITCH גדלה, מדד היעילות Odds Ratio קטן. בתחום הקטן מ- 10° כמעט ואין שינוי בערך המדד. הטיית המוט בכיוון הנסיעה מקטינה את המרחק האנכי בין הפומיות, מגדילה את איזורי החפיפה בין הפומיות וחושפת את מרכזו וחלקו התחתון של השיח לריסוס עודף, בעוד שהחלק העליון אינו מכוסה בחומר ריסוס. הניתוח ניתן בהרחבה בדוח שנה א'.



איור 8 - גרף יעילות פיזור חומר הריסוס כתלות בגודל הסטייה. ימין – סטייה במקביל. שמאל – סטייה ב-YAW.

4 איפיון המערכת

נבחנו 3 חלופות לפיתוח ואיפיון מרסס אוטונומי לבתי צמיחה (לפלפל: 1) פלטפורמה אוטונומית גדולה – מיכל בנפח של מעל 50 ל', תנועה לאורך שורה וסיבוב בסופה לשורה חדשה או חזרה ריקה וכניסה לשורה חדשה (איור 9; 2) פלטפורמה אוטונומית קטנה – מיכל בנפח של עד 50 ל', תנועה לאורך שורה וסיבוב בסופה לשורה חדשה או חזרה ריקה וכניסה לשורה חדשה. תידלוק ומילוי על ידי אדם. יכולות עבודת צוות רובוטים; ו- 3) פלטפורמה משולבת מורכבת משתי מערכות. א) מערכת ראשית שנעה לאורך השביל המרכזי בחממה ונושאת עליה את מיכל הריסוס המספיק לפחות לחממה; ב) מערכת משנית הנעה לאורך השורות ונושאת עליה את קצה מערכת הריסוס. כל מערכת מבצעת תנועה לינארית בלבד. בגמר ריסוס שורה, המערכת המשנית עולה על רמפה במערכת הראשית ומועברת לתחילת השורה הבאה. בכל הקונספציות רוחב הפלטפורמה יהיה 0.45 מ' בכדי שתוכל לנוע בתוך שורות הפלפל.

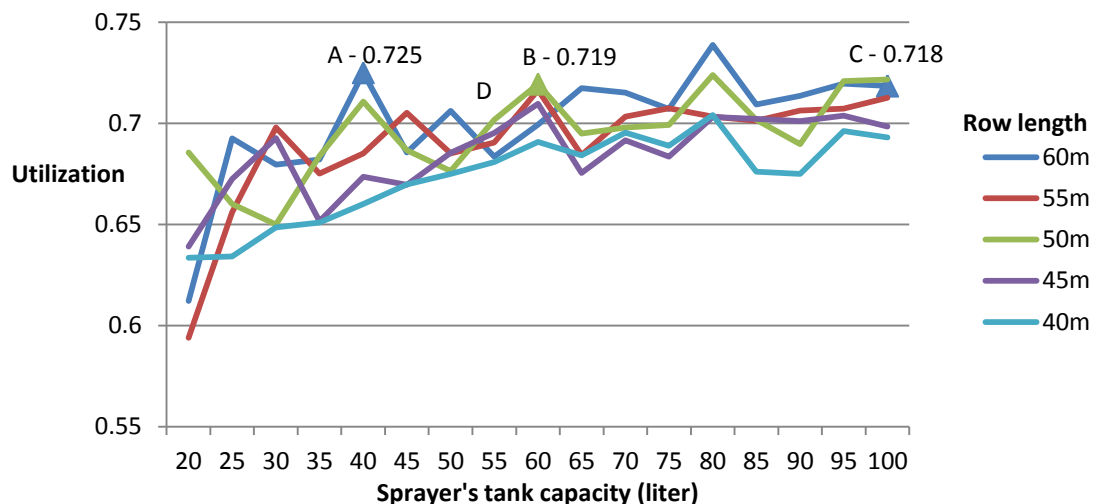


איור 9: חלופות איפיון מרסס.

בכדי לאפיין את הפלטפורמה פותח מודל המחשב את זמן הריסוס הכולל של החממה המורכב משני סוגים של פעולות: הפעולות הקשורות לריסוס באופן ישיר (הזמנים בהם הרובוט נוסע בין השורות ומרסס) ופעולות העזר והשורות אשר הכרחיות לביצוע הריסוס כגון תידלוק ומילוי מיכלים ונסיעות ללא ריסוס (לדוגמא במעבר בין שורות). צמצום זמן הריסוס הכולל יגדיל את ההספק של הרובוט ויאפשר לו לרסס שטחים גדולים יותר במהלך יום העבודה. פותח מודל סימולציה בתוכנת Matlab אשר אפשרה בחינה של כל הפרמטרים: גודל חממת הפלפל (מספר ואורך שורות), זמן הריסוס הכולל של החממה ונצילות הרובוט לצורך מציאת המשתנים המאפשרים פתרון מיטבי למודל ובחינת חלופות ריסוס שונות לשיפור המדדים. המשתנים ה"ת" בסימולציה הינם שטח בית הצמיחה, מספר שורות, אורך השורות, רוחב השורות, רוחב השביל המרכזי, מהירות הרובוט, גודל מיכל הריסוס, ספיקת פומית ריסוס, מספר הפומיות וזמן מילוי מיכל ריסוס. מדדי הביצוע הינם זמן הריסוס הכולל, מספר תידלוקים, זמן מעבר בין שורות ונצילות. הנצילות הוגדרה כיחס זמן ביצוע ריסוס בפועל מתוך סך זמן עבודת הרובוט. בנוסף, במודל נבחנה חלופה: במידה ואין מספיק חומר במיכל הריסוס עבור ריסוס של שתי שורות מלאות הרובוט יפסיק את פעולת הריסוס בסוף שורה וייסע לתחנת המילוי לפני כניסה לשורה חדשה.

התוצאות מתייחסות לחממה בגודל של 10 דונם עם מרווח של 1.4 מטר בין השורות עם ספיקת פומית של 0.2 ליטר לדקה, רוחב שביל מרכזי 3 מטר, 5 פומיות בכל צד, מהירות נסיעת הרובוט 30 מטר לדקה, אורך שורות 40 – 60 מטר, גודל מיכל של 20 – 100 ליטרים. נמצא כי הנצילות משתפרת עם הגדלת הקיבולת של מיכל הריסוס והגדלת

אורך השורה (איור 10). חממה בעלת שורות ארוכות מכילה פחות שורות מאשר חממה בשטח זהה בעלת שורות קצרות יותר. מספר קטן של שורות מקטין את מספר המעברים אשר הרובוט נדרש לבצע ומגדיל את נצילות הרובוט. בניגוד למגמת השיפור הכללית כאשר מגדילים את תכולת המיכל ואורך השורה, ניתן לראות נקודות מקסימום מקומיות (איור 10 איור, נקודות [A], [B]) המעידות כי התאמה בין גודל המיכל לאורך השורה יכולה להוביל לנצילות גבוהה למרות השימוש במיכל קטן. רובוט בעל מיכל קטן נושא פחות משקל ועל כן יזדקק למערכת הנעה פשוטה יותר מרובוט הנושא מיכל גדול יותר.

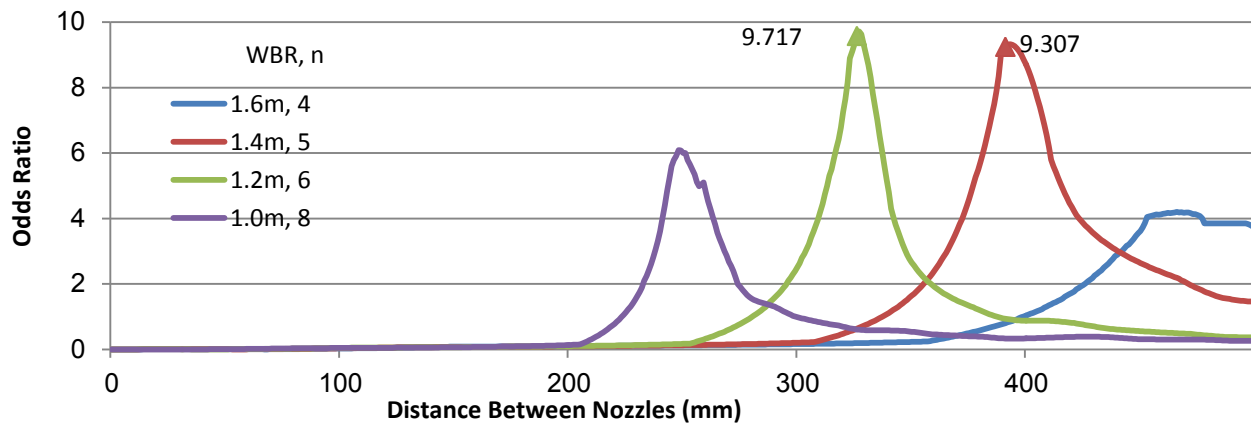


איור 10: נצילות רובוט הריסוס כתלות באורך השורה ובגודל המיכל. (נפח מיכל נבחנה ברזולוציה של 5 ליטר)

לאחר סקירה של מרכיבי פעולת הריסוס של הרובוט נמצא שהאלמנטים הניתנים לצמצום ואשר יכולים לגרום לשיפור היעילות הינם: זמן הנסיעה המנהלתית וזמן הכולל למעבר בין שורות. נצילות גבוהה אובחנה במצבים בהם היתה התאמה בין גודל המיכל ואורך השורה.

בחלופה שנבדקה חושב מספר השורות הזוגי השלם שהרובוט יכול לרסס. הניתוח הראה כי הגדלת אורך השורות משפרת את נצילות המרסס בכל גודל של מיכל ריסוס. הגדלת מיכל הריסוס בכל אורך שורה משפרת את נצילות המרסס, אולם ישנם מצבים בהם הגדלת מיכל הריסוס אינה משפרת את נצילות הריסוס, מכיוון שהתוספת השולית של הגדלת המיכל אינה מאפשרת ריסוס של שתי שורות נוספות, ולכן הרובוט הריסוס ישתמש באותה כמות חומר על אף הגדלת המיכל. באמצעות רגרסייה לוגיסטית נמצא הקשר בין גודל מיכל הריסוס ואורך השורה לנצילות המרסס: $Utilization = 2.07 * \ln(\text{tank.size}) + 0.159 * \text{row.length} + 55.826$ של $R^2=0.975$.

לאחר בחינת השפעת אורך השורה וגודל המיכל על נצילות הרובוט, נמצא כי שימוש בחלופה הדוגלת בצמצום פעולות העזר שאינן כוללות ריסוס שיפרה את נצילות הרובוט. הנצילות הטובה ביותר (0.745) התקבלה עבור שורה באורך 60 מטר, ומיכל בנפח 100 ליטר, אולם התועלת השולית של הגדלת המיכל קטנה ככל שמגדילים את המיכל. נבדקה השפעתם של ארבעת השילובים של 'המרווח בין השורות' (משפיע על המרחק מהפומית לשיח) מרחק בין פומיות' על מדד יעילות הריסוס (Odds Ratio). התוצאות מתייחסות לגובה שיח של 2 מטר, ספיקת פומית של 0.2 ליטר לדקה, וזווית פיזור פומית של 40 מעלות. לכל 'מרווח בין השורות' נמצא מרווח הפומיות אשר מיקסם את מדד יעילות הריסוס (איור 11 **שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.**). באמצעות שינוי המרחקים בין הפומיות ניתן לקבל הבדלים במדד היעילות. התוצאה המיטבית עבור מרווח בין שורות של 1.4 מ' הינו 9.307, התקבלה כאשר המרחק בין הפומיות נקבע ל-394mm.



איור 11: יעילות הריסוס כתלות במרווח בין השורות (WBR), מספר הפומיות (n) והמרווח בין הפומיות.

5 פיתוח אלגוריתמים לתנועה בחממה

5.1 פיתוח אלגוריתם אדפטיבי לתנועה בתוך שורות בתנאים דינמיים

פותחה מערכת ראייה ממוחשבת, אדפטיבית לתנאי תאורה וסוגי קרקע שונים ומאפשרת זיהוי איכותי של שבילים בחממת פלפל מסחרית. ביצוע התאמה אוטומטית של המערכת למצבי תאורה משתנים הכרחי לצורך ניווט הרכב הרובוטי עבור מידע המתקבל ממצלמת וידאו בזמן אמת.

השיטה המשלבת אלגוריתם למידה מודרך (Supervised learning) מבוסס עץ החלטה CART לצורך סיווג הפיקסלים בתמונת צבע (RGB). בהסתמך על המידע הנרכש בשלב אימון המערכת, מבצע האלגוריתם, בחירה עבור מאפיינים מיטביים וערכי סף מותאמים לתנאי הסביבה החיצונית העכשווית. משלב זה מסוגלת המערכת להמיר כל תמונת צבע לתמונה בינארית בה קיים אובייקט בודד, הוא שביל הגישה לרכב הרובוטי. בידוד השביל וחישוב ערך הסטייה של הרכב ממרכזו נשלח בזמן אמת למערכת בקרת ההגוי.

פיתוח מערכת הראייה נעשה בשלבים. ראשית, נדגם מידע רב בקצב דגימה של 25 fps באמצעות מצלמה דיגיטאלית, Microsoft "LifeCam NX6000" DPI 288x352, CCD, 50 ס"מ; זווית צילום של 45° מעלות ביחס לאופק, כלפי הקרקע). מאגר האימון הורכב מ-22 טרנספורמציות נומריות של ערכי ה-RGB (מאפיינים) לצורך בחירה ראשונית של מאפייני צבע מתאימים, פילוג סטטיסטי המחלקות סייע בבחירה ראשונית של מאפיינים כך שמתוך 22 מאפיינים נבחרו 12 מאפיינים לא מתואמים להם יכולת הבחנה גבוהה. ניבחנו שלושה אלגוריתמים המותאמים לתנאי סביבה אקראיים באמצעות SPSS Clementine12.0 לאמינות הסיווג וכן פשטות האלגוריתם: רשת עצבית, K-Means ועץ החלטה CART. אלגוריתם עץ החלטה CART ניבחר כמתאים ביותר למשימה זו בשל יכולת הדיוק הגבוהה שהציג (97% סיווג נכון עבור סט האימון בהשוואה ל-76% עבור K-Means ו-98% של הרשת העצבית), וכן בשל פשטות המודל המאפשר סיווג בינארי באמצעות ערך סף בלבד.

ניבנה "מאגר בחינה" המכיל 50 תמונות שנדגמו אקראית מכל סרטון ושימש לבחינת האלגוריתם עבור "מידע לא ידוע". בתמונות המאגר סומן באופן ידני קו המתאר של השביל, בכדי לאפשר השוואה (GROUND TRUTH) לכלל יחידות התמונה (288X352) מול זיהוי מומחה (איור 12). יחס הפיקסלים אשר סווגו נכון מכלל הפיקסלים בתמונה היווה את מדד ההערכה העיקרי לביצועי מערכת הסיווג. המחקר בחן את ביצועי האלגוריתם תחת שינויי פרמטרים שונים כגון רגישות המערכת לגודל סט המידע, סטיית ערך הסף, סוג מודל הסיווג, שילוב רעש לבן בתמונה הנבחנת ושילוב פרודורות לעיבוד תמונה. במהלך המחקר נמצא כי מירב האינפורמציה מצוייה כבר ברמה הראשונה של העץ, אשר מאפשר עיבוד תמונה מהיר אף יותר ולכן עדיף. עם זאת בתנאי סביבה, תאורה מסויימים ואף זווית צילום קשה

נמצא כי המערכת אינה אמינה בהסתמך על מאפיין בודד ועל כן עץ החלטה ברמה שניה (שלושה מאפיינים) הכרחי. כפועל יוצא ישיר של מסקנה זו נבחנה וריאציה חדשנית של אלגוריתם CART בה נעשה שימוש אך ורק במאפיין הקודקוד אך פעולה זו חוזרת על עצמה מספר פעמים כאשר בכל שלב נבחר מאפיין אחר. שיטת השיוך למחלקה מתבצעת על ידי בחירה מרובה כך שרוב קולות במערך השופטים יקבע סופית את השיוך למחלקה. השיטה הוגדרה בשם: Judges Vote.



איור 12: סימון באופן ידני קו המתאר של השביל והשוואה לביצועי האלגוריתם.

בסיווג הפיקסלים לקבוצות "שביל" ו"לא שביל", שיטת "Judges Vote" (JV) הציגה יכולת סיווג גבוהה מזו של CART, עם שיפור ממוצע של 3% (92%-89%, טבלה 1), ושיפור מירבי של 10% עבור סרט בודד. שילוב פרוצדורות לעיבוד תמונה הפחיתו משמעותית את השפעת הרעש הלבן על יכולת הסיווג. השפעות סטיית ערך הסף על יכולת הסיווג מעידות כי קיימים הבדלים ברגישות המאפיינים השונים לתנאי עבודה. מספר התמונות המיטבי לאימון המערכת באופן אוטומטי נקבע על שש תמונות עבורם התקבלה מידת דיוק בסיווג של 93% הצלחה בממוצע.

טבלה 1. השוואה בין שיטות עדיפות לסיווג

	JV 2/2	JV 2/3	JV 3/4	2 Level CART
Average	90.3%	91.4%	92%	89%
std	4.13%	2.07%	1.57%	4.42%

5.2 פיתוח אלגוריתם לזיהוי קצה שורה ויכולת סיבוב

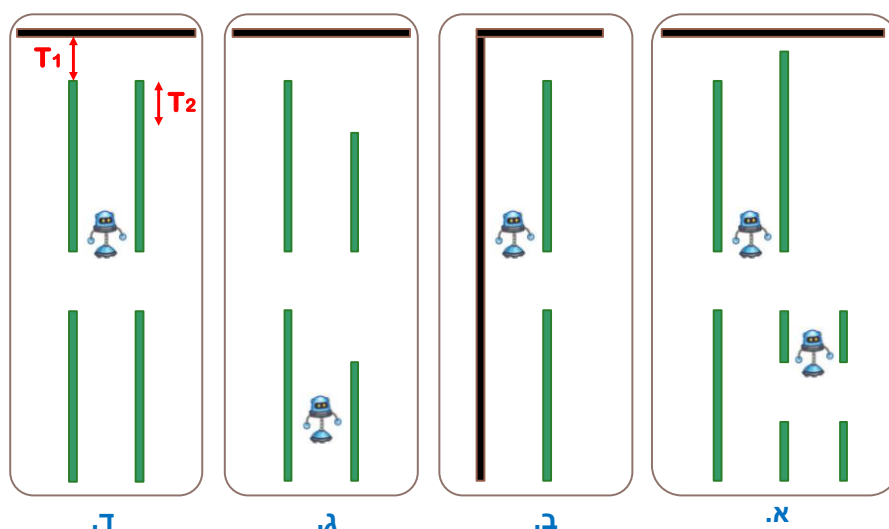
נעשה שימוש בחיישן לייזר LADAR מסוג 3 (איור 13) SICK LMS. הסריקה נעשית באמצעות קרני לייזר באורך גל של 905 nm ברדיוס של 270 מעלות וברזולוציה של 0.5 מעלה, למרחק של 20 מטר, בדיוק של סנטימטר. איסוף הנתונים מחיישן הלייזר נעשה ע"י שימוש בתוכנת C#. בנוסף, שלוש מצלמות רשת מסוג Logitech HD Webcam C615 המאפשרות שדה ראייה של כ- 200 מעלות אספו מידע חזותי. לצורך זיהוי קצה השורה, לא בוצע שימוש במערכת מצלמות הרשת, אלא רק על מנת לאמת את הנתונים המגיעים מחיישן הלייזר. איור 13 מציג את כלי הסימולציה בחממת הניסוי.

פותח אלגוריתם לזיהוי קצה שורה באמצעות שימוש ב- (PCA). סיווג של סגמנטים בוצע בשיטת Markov chain. קבלת ההחלטות נעשה בשיטת עץ החלטות. פיתוח האלגוריתם וניתוח הנתונים בוצעו באמצעות Matlab 2013a.



איור 13. ימין - חיישן הלייזר, שמאל - כלי הסימולציה בניסוי.

תרחישים אפשריים בגידולי חממה ומבנה מוגן: איור 14 מתאר מצב בו הרובוט חוצה את מרכז החממה ומגיע אל קצה החממה, שם יכול לפנות רק לצד אחד, או יוצא מהשורות אל שטח פתוח. 14ב מתאר מצב בו הרובוט נע לאורך קיר החממה, הממוקם משמאל לרובוט. 14ג מתאר מצב בו הרובוט נע לאורך שורות השונות באורכן זו מזו. איור 14ד מתאר מצב אידיאלי בו שורות החממה רציפות וזהות באורכן והרובוט יכול לבצע פניה ימינה או שמאלה. אחרי כל סריקת של חיישן הלייזר וניתוח הנתונים, מתקבלת אחת משלושת ההחלטות הבאות: 0 – אין אפשרות לביצוע פניה. 1- התקדם. 2 – אפשרות לפניה. כל אחת מההחלטות הנ"ל, מתקבלת הן עבור צד ימין והן עבור צד שמאל בנפרד.



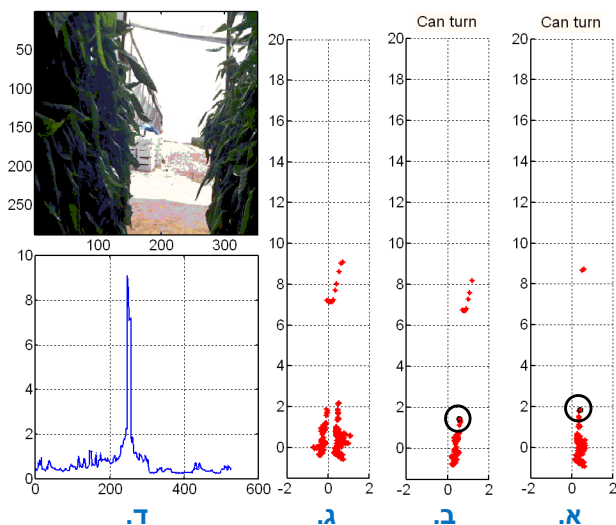
איור 14. תרחישים שונים בהן יכול להימצא הרובוט בחממה.

ההחלטה לאחר כל סריקה של חיישן הלייזר מתקבלת על ידי מציאת התרחיש בו נמצא הרובוט. התרחישים השונים ממפים באמצעות עץ החלטות, כאשר התרחישים השונים מהווים צמתי החלטה בעץ, ואילו הענפים מייצגים את ההחלטה. בכל צומת החלטה נשאלת שאלה לגבי מצב בו נמצא הרובוט ובהתאם לתשובה המתקבלת ממשיכים לנוע לעומק העץ ההחלטות עד שמגיעים לתחתיתו, להחלטה.

נערכו ניסויים בגידולי פלפל ועגבניות בחממה ובמבנה מוגן. האתרים של גידול הפלפל היו בחצבה ובבית דגן. גידול הפלפל בוצע בשיטה הספרדית. גובה הצמחים היה 170-200 cm. מבנה הגידול היה צפוף ואחיד לאורך השורה עד קצה החממה כאשר בין שתי שורות מרווח של 60-70 cm. האתר של גידול העגבניה היה בקדש ברנע. הגידול היה צעיר 50-60 cm המאופיין בחוסר אחידות לאורך השורה. שורות הגידול הסתיימו כ- 200 cm מקצה החממה. מתוך 30 מקרים זוהו בהצלחה 29 ו-5 קריאות שגויות באמצע שורה (טבלה 2). לאחר מספר ניסויים בחממות הפלפל

והעגבנייה במצב Off line שופר האלגוריתם. ניסוי Real time שנערך על גידול פלפל במכון וולקני הראה 100% הצלחה. דוגמה לתצוגת האלגוריתם מובאת באיור 15.

טבלה 2 : ביצועי האלגוריתם לזיהוי סוף שורה.

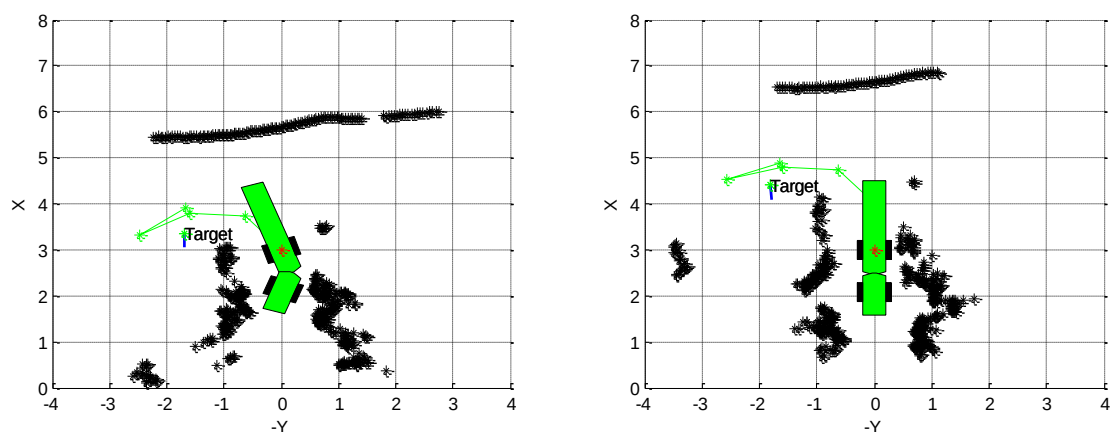


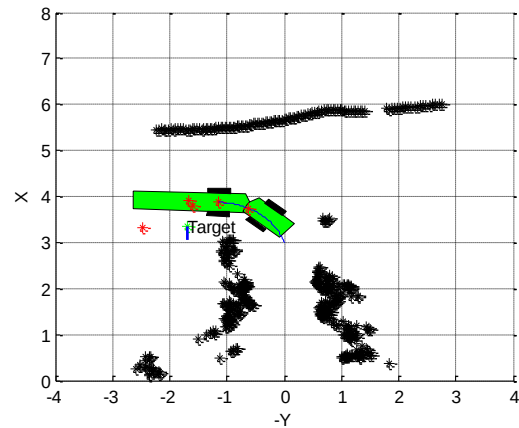
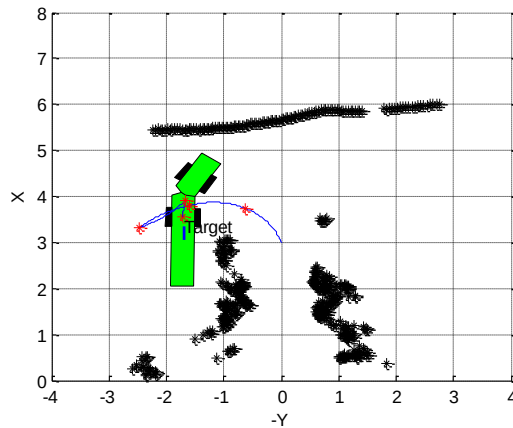
מקרה	הצלחה	הצלחה	חיווי	החלטה
עם 'BLOCK' ללא 'BLOCK'	ימין	שמאל	שגוי	
1	✓	✓		0
2	✓	✓		2
3	✓	✓		2
4	✓	✓		2
5	✓	✓	✓	2
6	✓	✓		0
7	✓	✓		2
8	✓	✓	✓	0
9	✓	✓	-	0
10	✓	✓		2
11	✓	✓	✓	2
12	✓	✓	✓	0
13	✓	✓		2
14	✓	✓		2
15	✓	✓		2

איור 15. זיהוי שני קצוות השורות מימין משמאל ויציאה לשטח פתוח במרכז החממה.

5.3 פיתוח אלגוריתם לפניה בסוף שורה וכניסה לשורה חדשה

פותחו שני אלגוריתמים לתכן מסלול פניה ובקרת עקיבה מומשו: רובסטי וקבוע מראש. האלגוריתמים בנויים מסלול תנועת הרכב המחובר בין מיקומו לפני יציאה מהשורה ומיקומו בנקודת כניסה לשורה הסמוכה. כאשר הרכב נמצא במיקום מסוים לקראת סוף שורה, נעשית החלטה על סיבוב של הרכב ומיקום יציאה מהשורה מוגדרת על ידי נקודת קצה השורה שמתקבל בעזרת אלגוריתם לזיהוי קצה שורה. מרוחב שורות נתון ומיקום קצה שורה שנמצא מחושבת נקודת הגעה של הרכב. נקודת ההגעה נמצאת בשורה סמוכה שאליה הרכב צריך לעבור, ומיקומה מבטיח כניסת הרכב אל תוך השורה והמשך נסיעה לאורך השורה.





איור 16 : סימולציה לפנייה משורה לשורה.

באלגוריתם הרובסטי תכן מסלול מתבצע בעזרת אלגוריתם לניווט WAVEFRONT. על מנת להבטיח עבודה נכונה של אלגוריתם הניווט, נבנית מפת מכשולים שכוללת גם את המכשולים שנסרקו בשלבים מוקדמים של נסיעת הרכב ועדכון נקודת הגעה על המפות החדשות. בניית מפה כללית ועדכון נקודת הגעה מבוססים על ידיעת התקדמות של הרכב. בניסויים שבוצעו, עקב מדידת התקדמות לא מדויקת על המפה הכללית מופיעים מכשולים מהסריקות הקודמות במקומות לא נכונים וגורמים לעבודה לא תקינה של האלגוריתם לבניית מסלול. איור 16 מציג דוגמה לתמרון על פי האלגוריתם הרובסטי. הניסויים בחממת הניסוי נמצאים בעיצומם ובשלב זה ההצלחה מוגבלת בשל בעיות התחפרות והחלקה של המרסס. דוח ניסוי מפורט יוגש בסיום הניסויים.

6 פלטפורמה לבחינת האלגוריתמים

6.1 פיתוח הפלטפורמה

פיתוח פלטפורמה אוטונומית לבחינת אלגוריתמים של עיבוד תמונה, ראייה ממוחשבת, ניהוג, ניווט ואיחוד מידע מחיישנים. הפלטפורמה מבוססת על מרכב של TXT-1. נתונים המרכב הכלליים: אורך – 510 מ"מ, רוחב – 385 מ"מ, גובה – 297 מ"מ, רוחב צמיג – 106 מ"מ, קוטר צמיג – 165 מ"מ, שני מנועים חשמליים, היגוי זוויתי קדמי ואחורי. על הפלטפורמה הורכבו מצלמת lifecam NX-6000, מצפן מגנטי דיגיטלי CMP-03 בקר לקריאת המצפן (ARDUINO) הממיר מידע מפרוטוקול תקשורת 12C לפרוטוקול תקשורת RS232 באמצעות כבל USB, מנוע סרוו להיגוי קידמי ואחורי (SC1256T), בקר לשליטה בהיגוי והנעה, אינקודרים, נורות LED וגשר תאורה לניסויי לילה. בנוסף, נבנתה עגלה הנרתמת לאחורי הפלטפורמה. על העגלה הורכבו מחשב נישא (Lenovo R400) לשליטה במערכת וממשק למפעיל ומצברים 12V/7AH להארכת משך הפעולה ועמידה בעומסי עבודה גבוהים יותר מאלו להם תוכנן המרכב המקורי. הרכב מונע על ידי שני מנועים מסוג DL-3Q בעל מומנט שך 800N המחוברים במקביל לגיר אחד בכדי לקבל מומנט גדול יותר. הפעלת המנועים נשלטת על ידי בקר מנוע מסוג ax3500 של חברת Robteq המסוגל לספק עד 60A למנוע. הבקר מפעיל את מנוע הסרוו של ההיגוי. אינקודר המותקן על ציר אחד המנועים קורא את מהירות ההתקדמות ביחידות סל"ד המנוע. שליטה על מהירות הנסיעה וההגאים מתבצעת באמצעות מחשב נייד (Lenovo R400). תיאור הפלטפורמה מובא באיור 17.

לשם בחינת המערכת פותח אלגוריתם עיבוד תמונה לזיהוי קו אדום המסומן על דרך ואלגוריתם בקרת היגוי. המערכת נוסתה במכון להנדסה חקלאית בתנועה אוטונומית אחר קו אדום על שבילים באוויר הפתוח ובמסדרונות

סגורים בהם רמת התאורה היתה קבועה. כמו כן, בוצע בהצלחה ניסוי לתנועה אוטונומית במעברים בין שורות פלפל בחממה בעין יחב באמצעות האלגוריתם אשר פותח בסעיף 5.1.



איור 17: תיאור הפלטפורמה.

6.2 פיתוח ממשק שליטה ידני על המערכת הרובוטית

פותח ממשק שליטה ידני לצורך ניווט הפלטפורמה הרובוטית על ידי מפעיל המערכת. ממשק מסוג זה הינו הכרחי למערכת כיוון שחלק מדרישות החקלאי הן היכולת לנייד את המערכת בין בתי הצמיחה השונים וכן לאזור התפעול/אכסון של המערכת. ניווט המערכת שלא במעברי הגידול נעשה באופן ידני עקב המורכבות הגדולה של אזור (מכשולים, מעברי שבילים מסובכים, קליטת GPS מוגבלת). בנוסף למורכבות הסעה אוטומטית, קיימת בעיה הבטיחות לניוד מערכת רובוטית בסביבת בני אדם ללא השגחת המפעיל.

שני ממשקי שליטה פותחו באופן ייעודי למערכת הריסוס. הממשקים מורכבים מיחידת שליטה שנמצאת ברשות המפעיל ובאמצעותה הוא שולט על המערכת ויחידת הקליטה שמוטמעת במערכת הרובוטית. יחידות השליטה הינן שלטים אלחוטיים של xbox ו-wii. יחידות השליטה והקליטה מתקשרות באופן אל-חוטי ובכך מאפשרות למפעיל גמישות בנוגע למיקומו ביחס למערכת במהלך ההסעה.

שני הממשקים חוברו ראשית לפלטפורמת המבחן (TXT1) והשליטה במערכת נבחנה וכוילה לצרכי הניווט. לאחר כויל הממשקים לפלטפורמת המבחן חוברו הממשקים למרסס הרובוטי והשליטה על מרסס נבחנה על ידי מפתחי המערכת. בעזרת הבקרים ניתנת למשתמש האפשרות לשליטה ידנית על המערכת, עצירה מוחלטת של המערכת וכן הכנסת והוצאת המערכת ממצב של נהיגה אוטומטית. בעתיד יבוצע פיתוח של ממשק זה באמצעות smartphone מאחר ונמצא בשימוש תמידי על ידי החקלאים וניתן לשלב בו את יתרונות ה-xbox וה-wii. תיאור מפורט של ממשקי השליטה מופיע בדוח שנה ב'.

7 אב טיפוס I

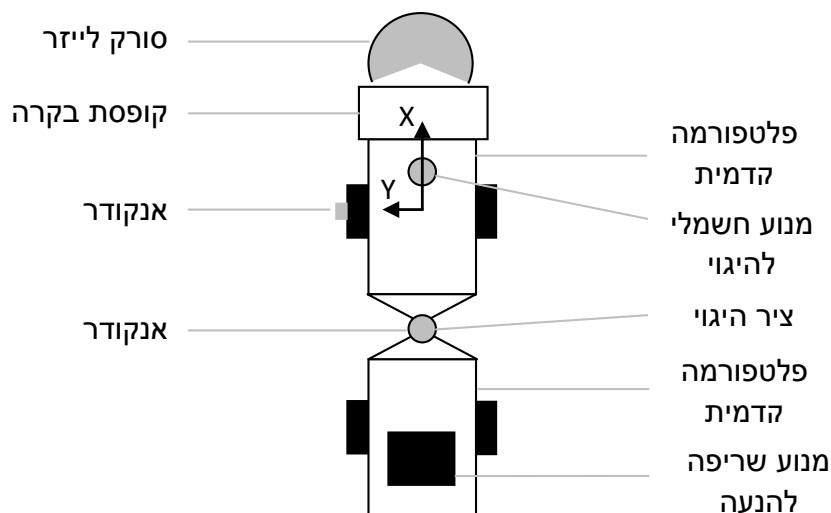
הותאם מרסס מסחרי מסוג ריקשה לביצוע המשימה באופן אוטונומי. פותחו מערכת בקרת היגוי ומערכת ממוחשבת לניווט ושליטה במרסס. כמו כן המרסס הותאם לשליטה ופעולה ללא יד אדם.

7.1 התאמת מרסס מסחרי ופיתוח מערכת הבקרה וההיגוי

המרסס הינו מרסס מסחרי מסוג ריקשה. רכב לא הולונומי עם ארבע גלגלים. הוא מורכב משתי פלטפורמות מחוברות עם ציר היגוי. גלגלים של הפלטפורמה האחורית ממונעים ע"י מנוע שריפה לא מבוקר. זווית היגוי בין הפלטפורמות נקבע ע"י הגה ממוקם על הפלטפורמה הקידמית. מנוע חשמלי מבוקר מחובר להגה. (איור 18).

הותקן מנוע חשמלי על ציר ההגה של המרסס בכדי שניתן יהיה לשלוט בהיגוי הכלי באופן ממוחשב הנישלט על ידי כרטיס בקרה של ROBOTEQ. המנוע מחובר להגה וקובע את זווית הפניה של הרכב דרך תמסורת ההיגוי. המנוע

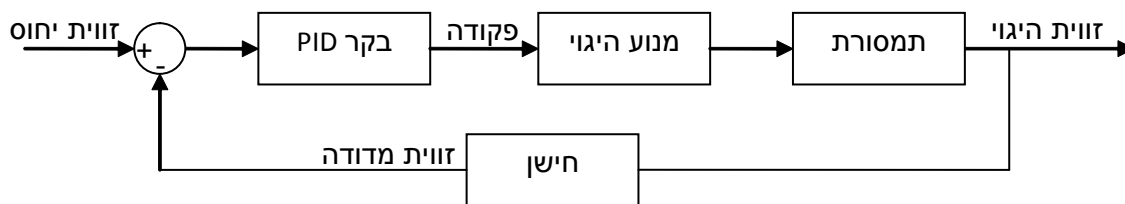
בעומס היגוי בתנאי מעבדה מספק מהירות היגוי $\dot{\phi}_{\max} = 0.25 \text{ rad/s} = 14^\circ/\text{s}$ ותאוצה $\ddot{\phi}_{\max} = 0.5 \text{ rad/s}^2 = 28^\circ/\text{s}^2$. חישן היגוי הותקן על ציר היגוי של הרכב בכדי למדוד את זווית הרכב. החישן הינו אנקודר מגנטי מחברת USDIGITAL דגם 5E. האנקודר בעל רזולוציה 4096 קוים לסיבוב. האנדוקר נקרא על ידי כרטיס בקרה המבצע ממוצע של 10 קריאות. חישן אנקודר נוסף הותקן על גלגל קידמי בכדי למדוד את התקדמות הרכב. סורק לייזר מסוג SICK הותקן בקדמת הרכב. הסורק ממפה סביבת המכשולים בטווח עד 20 מטרים בגזרה של 270° ורזולוציה של חצי מעלה. הסורק נכנס למערכת לתכן מסלול נסיעה ללא התנגשות.



איור 18: תרשים המרסס.

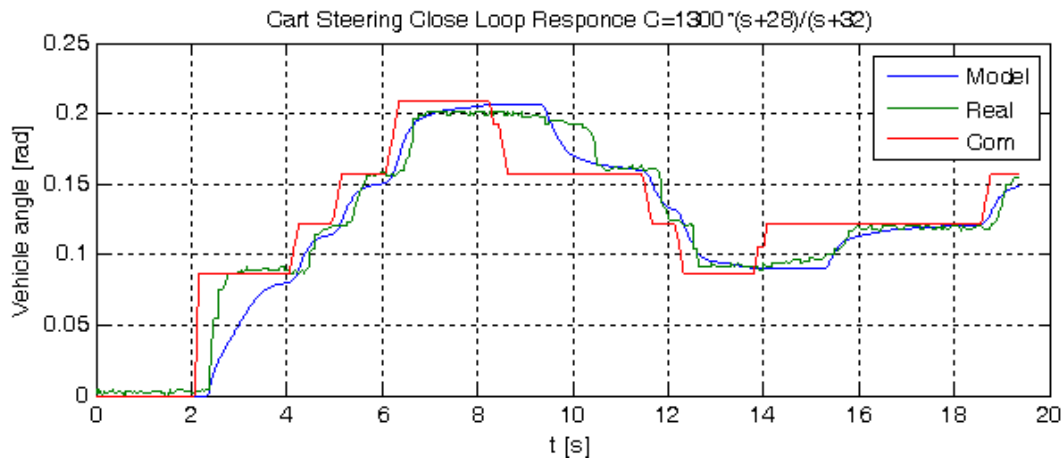
בקר מערכת ההיגוי מסוג PID מקבל כקלט את זווית היגוי של הרכב כפי שנקראת על ידי חישן ההיגוי וכן את הכיוון הרצוי מהאלגוריתם האדפטיבי לזיהוי השורה ומחשב את פקודת ההיגוי אחרי פקודת ההיגוי למנוע החשמלי. הדרישות מהבקר הן: זמן עליה 1 שניה, שגיאה במצב מתמיד 3 מעלות, תגובת יתר 5%. פונקציית הבקר שנבחר הינה

$$C_{steering} = 1300 \frac{s+28}{s+32} = 1300 \frac{z-0.7547}{z-0.7214} \quad \text{תרשים פונקציית תמסורת הבקרה מוצגת באיור 19.}$$



איור 19: פונקציית התמסורת.

הבקר עונה על דרישות המערכת מלבד מגבלת זמן העליה במקרה של פקודת שינוי כיוון בשל תופעת BACKLASH בתמסורת ההיגוי. עם המנוע החשמלי שהותקן ניתן לעבור תחום של backlash בערך ב-1 שניה, לכן זמן עליה כאשר כיוון הפקודה משתנה הוא 2 שניות. אלגוריתם ההיגוי שנבחר הוא pure pursuit. מרחק נקודת העקיבה (carrot point) נמצא בניסויים והערך האופטימלי הינו כ-2 מטרים. דוגמא לדינמיקת מערכת ההיגוי מוצגת באיור 20.



איור 20 : דוגמה לדינמיקת מערכת ההיגוי.

7.2 פיתוח היחידה האוטונומית

פיתוח מערכת ממוחשבת הכוללת מחשב קטן ממדים מסוג EBS-3000 בעל מעבד אינטל i7 האחראי על ניהול המשימה, הבקרה העילית והפעלת תוכנות בקרת ההיגוי, עיבוד התמונה והניווט. המחשב מתממשק לבקר מנוע מסוג ax3500 של חברת Robteq השולט במנוע ההיגוי, לבקר מסוג Arduino שקורא את זווית הרכב בעזרת אינקודר אבסולוטי (MAE3-P12), מצלמת USB (LifCam NX-6000 של Microsoft), מסך מגע 7" (AFL-07M IEI) בנוסף ניתן לחבר מסך רגיל גדול. המערכת הממוחשבת מורכבת בארון חשמל המותקן בקידמת המרסס ומוזנת ממצבר מתח של 12VDC/110Ah.

8 אב טיפוס II

לפיתוח אב טיפוס II בוצע תכן של מרסס צר המבוסס על מרסס מדגם צייקו של מרססי רז. הותאמה מערכת ריסוס לרובוט ריסוס ולמעברים הצרים בחממות פלפל. הוטמע אלגוריתם זיהוי קצה השורה והסיבוב בסוף השורה והורכב חיישן SICK על המערכת.

8.1 מיזעור מרסס

הצרת המרסס הופכת אותו לכלי שאינו יציב בציר האורכי אשר עשוי להתהפך בנסיעה בתוואי השטח של החממה. הוחלט לחבר את בסיס הרכב עם שאר החלקים באמצעות ציר ובכך לאפשר חופש תנועה שתאפשר הזזה של מיקום מרכז המסה, לצורך הייצוב תוכננה מערכת בקרה אשר שומרת את מרכז המסה של הכלי בין שני הגלגלים. הוכחת ההיתכנות נעשתה באמצעות משוואות לגראנז' בעבור מודל מופשט של הרכב (איור 21). משוואות לאגרנז' מתארות את הקשרים הדינאמיים בין חלקי המערכת ונותנת את פרופיל המומנטים שמערכת הבקרה תצטרך להפעיל על מנת לייצב את הכלי.

מתוך הנחת עבודה כי הכלי נע במהירות מקסימלית של 5 קמ"ש חישבנו את התאוצה הקווית המקסימלית בה לגלגל יאיץ בעליית מדרגה (התרחיש המסוכן ביותר ליציבות הכלי). התקבל כי התאוצה הקווית המקסימלית הינה 1.5g. הבעיה מודלה כסימולציה במטלאב לחישוב המשוואה הדיפרנציאלית וקובעת את F כך שהרכב יישאר יציב. תנאי התחלה הינם: כלי הרכב נופל ב-2g ממדרגה של 20 ס"מ, מרכז המסה מוטה בזווית 15° לכיוון ההתהפכות. התקבלה הדמיה של הדינאמיקה של הכלי ואת פרופיל המומנטים והמהירויות אותם יצטרך לספק המנוע של מערכת הבקרה. מתוך הסימולציה נמצא כי יש להפריד את הטיפול ביציבות לשני חלקים- החלק הקידמי והאחורי של

המרסס וזאת משום שייצוב כל הכלי כחוליה אחת יצריך מומנטים גדולים ומכאן מנוע ייצוב גדול שלא ייכנס בממדי הכלי הצר. הפרדת הכלי לשני חלקים נעשה באמצעות הוספת דרגת חופש בכיוון ציר הסיבוב של ייצוב הכלי בין החלק הקידמי והאחורי. נתונים טכניים נידרשים מהמנוע ומערכת בקרת הייצוב כוללים מומנט מירבי של 7.2 Nm, מומנט רציף 1.7 Nm, סל"ד 1100, מתח עבודה V230, מתח כניסה של 20-80 VDC, זרם רציף A5, זרם מירבי A20 ויחס תמסורת של 1:100. לאחר בדיקת היתכנות למערכת הבקרה והייצוב בוצע תכן ראשוני ומידול המרסס הממוזער (איור 22).



איור 21: ימין – מודל מופשא של הכלי, שמאל – תיאור הפרמטרים.

$$\vec{r}_1 = [l \cos(q_1), l \sin(q_1)]$$

$$\vec{r}_2 = [l \cos(q_1) - h \sin(q_2), l \sin(q_1) + h \cos(q_2)]$$

$$\vec{q} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix};$$

$$T = \frac{1}{2} m_1 \left| \dot{\vec{r}}_1 \right|^2 + \frac{1}{2} m_2 \left| \dot{\vec{r}}_2 \right|^2 + \frac{1}{2} I_{c1} \left| \dot{q}_1 \right|^2 + \frac{1}{2} I_{c2} \left| \dot{q}_2 \right|^2$$

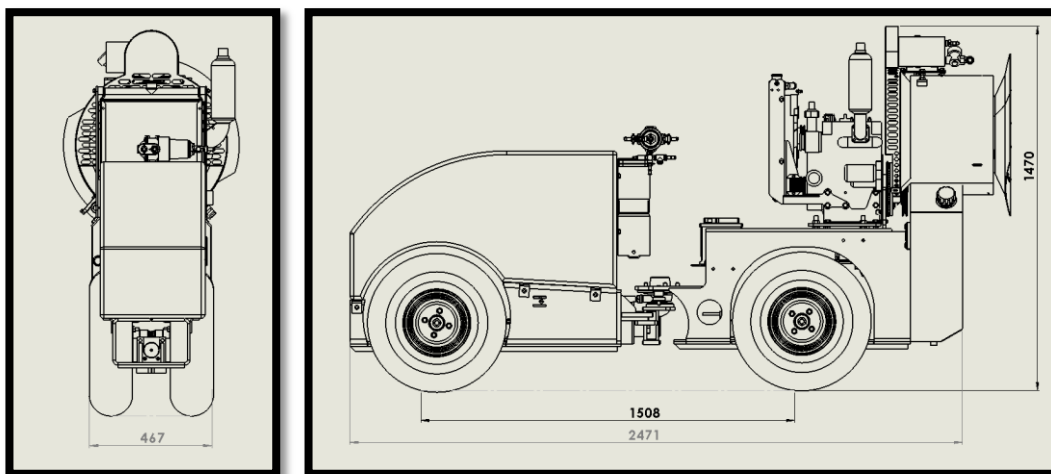
$$U = \frac{1}{2} m_1 g r_{1y} + \frac{1}{2} m_2 g r_{2y} + \frac{1}{2} k (q_1 - 2l)^2, \quad C = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{pr} = \frac{\partial^2 U}{\partial q_p \partial q_r} \Big|_{q_i=0}, \quad M_{pr} = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}_p \partial \dot{q}_r} \Big|_{q_i=0}$$

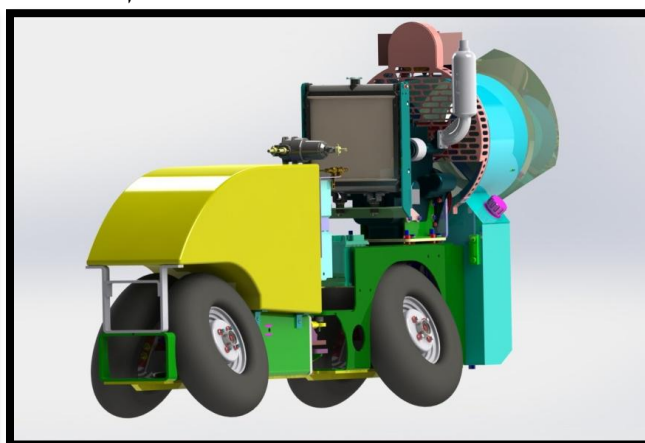
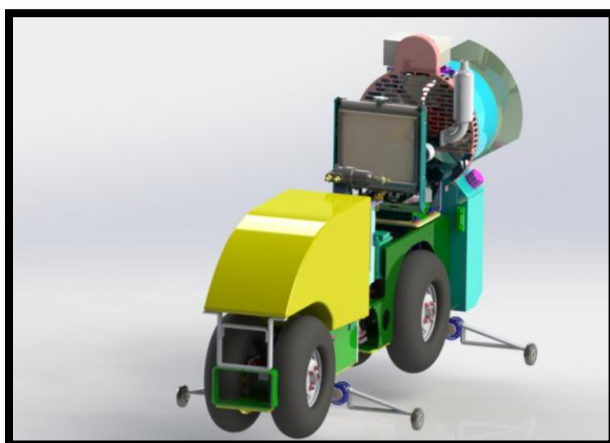
$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q - F = 0$$

*הערה: המרסן והקפיץ נכנסים לפעולה בסימולציה רק בעבור $q_1 = \text{const}$.
 T_{motor} הוא המומנט שמפעיל המנוע המבוקר על-מנת לייצב את הכלי.

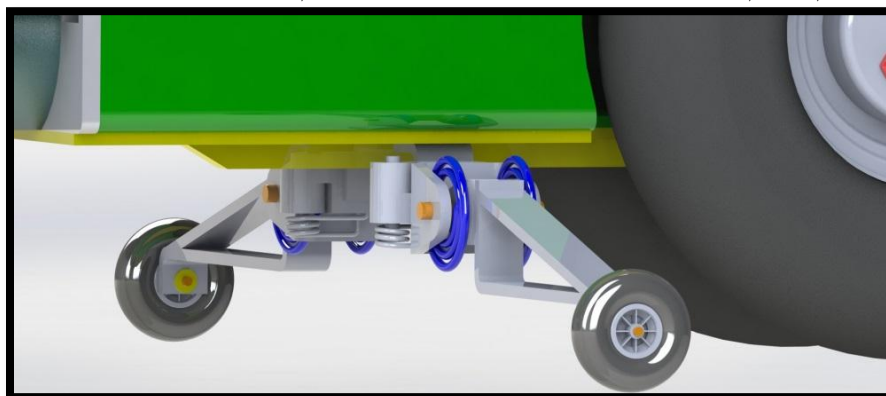
מאחר ורוחב המעבר כפי שנמצא בסעיף 2.1 הינו ברוב המקרים מעל 50 ס"מ ובגובה פני הקרקע אף מעל לכך, מתאפשר לתכנן כלי יציב ללא מערכת בקרה תוכנן מרסס ממוזער הכולל גלגלים מוטים (איור 23) אשר מאפשרים בסיס רחב. בדיקת יציבות שערכנו בסימולציה הראתה כי יציבות הכלי במבנה הזה הינה גבולית ואינה מאפשרת הטיה של מעבר ל- 10° בנסיעה בקו ישר וכן מתפתחות בעיות יציבות בעת סיבובים, בנוסף צפויים להתפתח על צירי המנוע עומסים אורכיים שייתכן וייפגעו במנועים ההידראולים. בוצע תכן נוסף של המרסס הממוזער הכולל "גלגלי עזר" אשר יכולים להכנס תחת העלווה ולספק יציבות לכלי. גלגלי העזר מתוכננים כך שיוכלו להתקפל אם נתקלים במכשול, לשנות את גובהם בהתאם לתנאי השטח (איור 24) או לקפלם לצורך איחסון.



איור 22 : תכן ראשוני של המרסס הממוזער.



איור 23 : ימין - תכן מרסס עם גלגלים מוטים. שמאל - תכן מרסס עם גלגלי העזר לייצוב.



איור 24 : מנגנון גלגל העזר.

8.2 התאמת מערכת הריסוס

תוכנן ונבנה מרסס יעודי (תמונה 25) אשר מאפשר מיגוון אפשרויות. היחוד של המרסס הוא מיקום המוצא אשר נמצא במרכז השביל. על המרסס הותקן מוצא ריסוס בצורת טרפז הפוך, מותקן ישירות על בית המפוח (מוצא אחד מכל צד). מרכז המוצא בגובה 40 ס"מ מהקרקע. מוצא זה באורך 100 ס"מ. רוחב המוצא בחלקו העליון הוא 90 מ"מ ו-40 מ"מ בקצה התחתון. המוצא נבנה על בסיס פונקצית דעיכת המהירות של סילון אוויר אשר תלויה בקוטר המוצא. על כן, מוצא בעל רוחב משתנה מאפשר לשמור על מהירות קבועה של סילון האוויר במרחקים משתנים מהמוצא. חלקו העליון של המוצא (הרחב) שומר על מהירות גבוהה למרחקים הגדולים בעוד שחלקו התחתון של המוצא אשר מכווון

למרחק הקצר שומר על מהירות האויר למרחק קטן יותר. בבדיקות מהירות האויר במרחקים שונים מהמוצא, מצאנו מהירות אויר דומה. על המוצא הותקן מוט ריסוס ועליו פומיות קוניות. המפוח מספק סילון אויר במהירות 40 מ/ש. (הספק המפוח 5 מ"ק/ש). על המרסס הותקנו 6 פומיות קוניות לבנות תוצרת אלבוז (צרפת). הפומיות מספקות תרסיס בנפח 0.35 ליטר/ד', בלחץ 5 באר (קוטר חציון נפחי של הטיפות 70 מיקרון). המרסס הופעל בעת הריסוס במהירות נסיעה 2.5 קמ"ש. הבדיקות בוצעו בבית צמיחה מסחרי לגידול פלפל, שבו צמחי פלפל מפותחים בגובה 200 ס"מ. הצמחים מסודרים בשתי שורות צמודות אשר יוצרות "קיר" צמחי צפוף ברוחב 60 ס"מ.



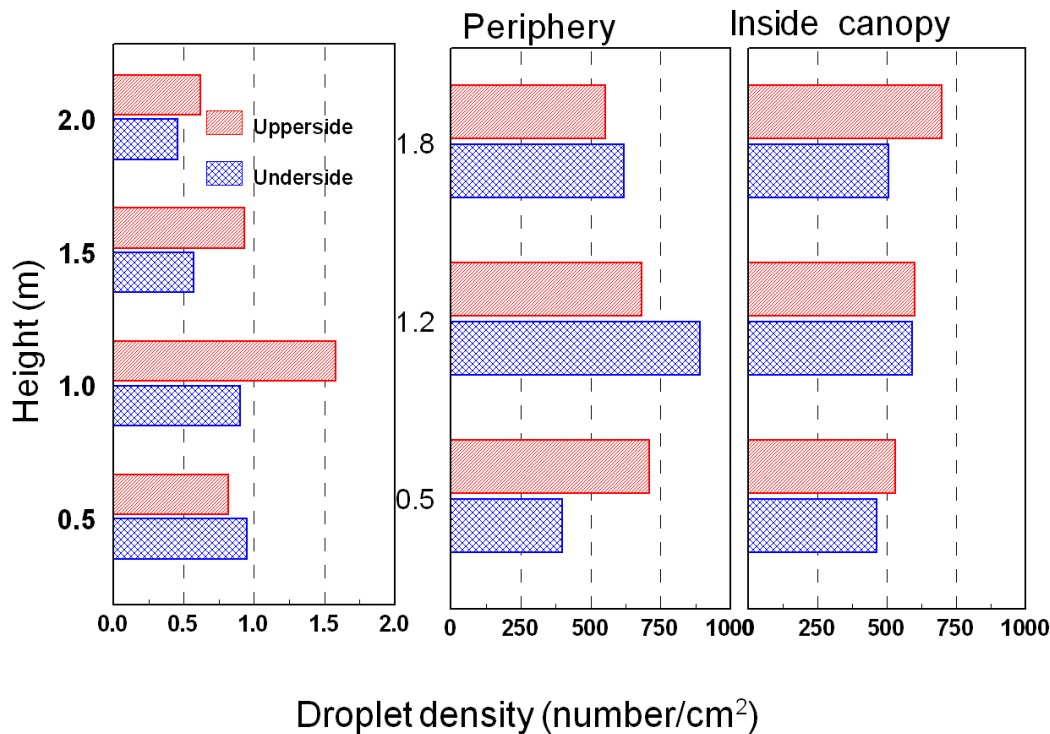
איור 25. מרסס יעודי לריסוס בתוך גידול מודלה צפוף.

מרבצי התרסיס והפיזור הנפחי באזורים שונים של הערוגה והנוף הצמחי, נקבעו באמצעות הצבת משטחי דגימה שוצבו בהתאם למרסס הנבדק כפי שמפורט להלן. לקביעת מרבצי התרסיס השתמשנו בריסוס תמיסת צבע מעקב Pigment red 696 (פלורמה, ישראל). קלפי נייר סופג כפולים הוצמדו לסולמות מרושתים אשר הוצבו במרכז הערוגה (בין שתי שורות הגידול) כדי לקלוט את התרסיס בגבהי הצמחי השונים. הוצבו מספר סולמות במרווחים של 100 ס"מ בין שורות הדוגמים והם שמשו חזרות. לאחר הריסוס הופרדו הקלפים הכפולים כדי להפריד בין מרבצי התרסיס בצד שפונה למרסס לעומת הצד העורפי. מרבצי הצבע שעל הניירות נשטפו במים מזוקקים בנפחים ידועים. ריכוז הצבע בתשטוף נקבע באמצעות בליעה אופטית בספקרופוטומטר באורך גל 505 ננומטר. יעילות הכיסוי על נוף צמחי נבחנה רק במרססים המתנייעים. לריסוסים אלה שמשה תמיסה מימית בתוספת חומר מעקב זוהר בתחום הנראה מסוג Lunar Yellow תוצרת Swada, UK בריכוז 1%, בתוספת משטח בריכוז 0.01%. בתום הריסוס ולאחר התייבשות הנוף דגמנו עלים בגבהים שונים בהיקף הצמחים ובמרכז הערוגה. כל דגימה נלקחה משלוש חזרות נפרדות. כל תת דגימה כזו כללה 10 עלים. נקבע שיעור הכיסוי של המטרה בתרסיס (אחוז כיסוי) וכן צפיפות הכיסוי (מס' טיפות לסמ"ר) באזורים המכוסים בתרסיס.

מרבצי התרסיס כפי שנמדדו על דוגמים מלאכותיים שהוצבו בתוך הנוף, היו אחידים בכל גובה הנוף (איור 26). המרבצים על דוגמים שהוצבו בתוך הנוף בגובה מעל 150 ס"מ מהקרקע היה רב ביותר. באופן דומה התקבל כיסוי העלווה בתמיסת תרסיס גבוה על גבי העלים בצד החיצוני של הנוף, ובעיקר מסביב וגובה מוצא האויר. גם שיעור החדירה של התרסיס וכיסוי העלווה בתוך ערוגות הצמחים היה גבוה בהשוואה לכיסוי בהיקף.

המרסס שפותח מייצג גישה חדשה אשר מביאה בחשבון את מבנה הצמח וכן את התכונות הפיזיקליות אשר קובעות את מידת ההסעה והפיזור של תרסיסים בנוף צפוף. ברור כי מבנה המרסס אשר פיתחנו מתאים ליישום במבנים לגידול פלפל כמו גם במבנים אחרים. הגישה שפיתחנו מאפשרת להגיע לנוף גבוה באמצעות ריסוס עם מוצא

בגובה ממוצע. נתון זה חשוב במבנים בהם קיימים מכשולים בגובה, וכן תנאי קרקע שמפריעים. מרסס זה נועד לבחון את העיקרון והוא אינו מתאים לריסוס במבנים הקיימים לפלפל שבהם המרווח בין השורות הוא צר ביותר. לצורך כך, ישנו הכרח בפלטפורמה אחרת, צרה יותר, שתסיע את אמצעי הריסוס. עם זאת, העקרונות ליחידת הריסוס בוססו במחקר והם יכולים לשמש בכל מרסס שייבנה.



איור 26: יעילות כיסוי צמחי פלפל בתרסיס באמצעות מרסס מתנייע עם מפוח בעל מוצא משתנה. שמאל – מרבצי תרסיס בגבהים שונים כפי שנקלט על קלפי נייר סינון שהוצבו במרכז ערוגות בתוך נוף צמחי פלפל. הדוגמים הוצבו בארבע גבהים. מרכז וימין - צפיפות כיסוי של טיפות תרסיס על עלים של פלפל בצידם העליון והתחתון בקומות הצמח השונות.

9 ניווט

לאחר הרכבת כל תתי המערכות, ההתאמות הנדרשות בכדי להפוך המרסס המסחרי לאוטונומי והבאת אב הטיפוס הראשון לפעיל, בוצעו ניסויי מעבדה וניסויים בחממה אשר הותאמה למחקר במכון להנדסה חקלאית. בניסויי המעבדה (איור 10) הוזנו לרובוט סירטונים אשר צולמו בחממות עין יהב ונבדקה האינטגרציה והתיפקוד של כל תתי המערכות במצב off line. הסירטונים דימו את התמונות הניקלטות על ידי מצלמת הרובוט במצב שבו המרסס נוסע בחממת פלפל. בניסויים התבצע עיבוד תמונה על הסירטונים והועברה פקודת היגוי להגאים (מנוע ההיגוי) וכן בוצעה בקרה על זווית הרובוט ב- real time. תגובת הרובוט לסירטונים היתה טובה וניראה היה כי הרובוט עוקב אחרי השביל בסירטון ומתקן את כיוונו בהתאם לסטיות שניצפו בסירטון. לאחר ניסויי המעבדה בוצעו ניסויי שדה בחממת הפלפל שהותאמה במכון להנדסה חקלאית לבחינת אב טיפוס המרסס הרובוטי בנסיעה במעברים בין שורות הפלפל במצב real time ו- on line. אב הטיפוס נסע בהצלחה באופן אוטונומי במעברים בין השורות באורך כ- 18 מ' ללא פגיעה בשורות או בצמחים (איור 11). בזמן הניסוי רובוט היה

מאויש בכדי למנוע מצב שבו המערכת תיגרום נזק במקרה של כשל בניסוי אך בכל מהלך הניסוי האדם לא התערב בפעולות ותיפקוד הרובוט.



איור 10 : תמונה מתוך ניסוי המעבדה לבחינת אב הטיפוס.



איור 11 : ניסוי שדה לבחינת אב הטיפוס בחממת פלפל.

10 סיכום ומסקנות

בוצעו סקר של מבני הצמיחה הקיימים לפלפל, מדידות גיאומטריות של מבני הצמיחה, החלוקה הפנימית לחלקות וחקירה של שיטות הריסוס הקיימות בחממות ובתי רשת לפלפל. בוצע איפיון המערכת, נבחנו 3 חלופות לפיתוח. פותח מודל לבחינת ביצועי המרסס כתלות במשתני התכנן. פותחה סימולציה לחישוב התפלגות חומר הריסוס על שיח הפלפל לאורך ציר הגובה כתלות במספר הפומיות, סוג הפומיות, המרחק ביניהן ומשתנים נוספים. פותח מדד ליעילות פיזור החומר ומודל תיפעול מרסס אוטונומי במבנה צמיחה. נמצאו המשתנים הדומיננטים במערכת ובוצעו

ניתוחי רגישות עליהם לבדיקת השפעתם. הוכשרה והותאמה חממה רב תכליתית במכון להנדסה חקלאית לבחינה בתנאי שדה ובצורה מיידית ומדויקת של המערכות השונות, החיישנים, מערכת הריסוס והאלגוריתמים לאוטונומיות. נבנתה מערכת ניסוי המבוססת על פלטפורמת TXT לבחינת חיישנים ואלגוריתמים בתנאי שדה אמיתיים במבני צמיחה לפלפל. לשם בחינת המערכת פותחו אלגוריתמים אשר הביאו את המערכת לאוטונומיות חלקית. פותחה מערכת ראייה ממוחשבת, אדפטיבית ייחודית לזיהוי שבילים במבני צמיחה בסביבות בילתי מובנות ודינמיות. השיטה המשלבת אלגוריתם למידה מודרך (Supervised learning) מבוסס עץ החלטה CART לצורך סיווג הפיקסלים בתמונת צבע. פותחו אלגוריתמים לזיהוי קצה השורה והיכולת לביצוע סיבוב למעבר הבא בזמן אמת ולתנועת המרסס ממעבר אחד לשני. פותחו שני ממשק שליטה ידניים מבוססי xbox ו-Wii לצורך ניווט הפלטפורמה הרובוטית על ידי מפעיל המערכת בכדי לנייד את המערכת בין בתי הצמיחה השונים ולאזור התפעול/אכסון של המערכת. הותאם מרסס מסחרי מסוג ריקשה לביצוע המשימה באופן אוטונומי. פותחו מערכת בקרת היגוי ומערכת ממוחשבת לניווט ושליטה במרסס. כמו כן המרסס הותאם לשליטה ופעולה ללא יד אדם. לאחר הרכבת כל תתי המערכות, ההתאמות הנדרשות בכדי להפוך המרסס המסחרי לאוטונומי והבאת אב הטיפוס הראשון לפעיל, בוצעו ניסוי מעבדה במצב off line ו- real time וניסויים בחממה במצב on line ו- real time. בוצע תכן של אב טיפוס שני המאפשר כניסה למעברים של חלקות פלפל בחממות מסחריות. הותאמה מערכת הריסוס למשימת ריסוס רובוטי בחממות פלפל מסחריות.

באיפיון המערכת נמצא כי החלופה המועדפת הינה פלטפורמה אוטונומית גדולה בעלת מיכל בנפח מעל 50 ל'. הטיית מוט הריסוס בניצב לכיוון הנסיעה פוגעת ביעילות הריסוס ועל כן בעת בניית מרסס אוטונומי יש להוסיף אלמנט מייצב למוט הריסוס. סטייה ממרכז נתיב הנסיעה של הרובוט גורמת אף היא לירידה חדה בביצועים. במודל התיפעול נמצא כי הנצילות המירבית התקבלה עבור מיכל של 100 ל' וחלקות בעלות שורות באורך 60 מ'. מערכת הראייה הממוחשבת הגיע להצלחה של 93% בממוצע בתמונות בדידות ולהצלחה מלאה בניסויים. אב טיפוס הראשון נסע בהצלחה באופן אוטונומי במעברים בין השורות באורך כ- 18 מ' ללא פגיעה בשורות או בצמחים. אלגוריתם זיהוי סוף שורה ויכולת סיבוב זיהה בצורה מלאה בזמן אמת את נקודות סוף השורה וביצע בהצלחה את ההחלטה על יכולת הסיבוב. האלגוריתם לתמרון המעבר בין השורות עבד בצורה חלקית. ניסויים ושיפור האלגוריתמים עדיין מתבצעים.

11 תודות

ברצוננו להודות ליוסי פורטל על הכנת חממת הניסוי, לסאשה כצמן על חלקו בפיתוח האלגוריתם לזיהוי סוף שורה, ברכה שטיינר, יהודית ריבן ומרינה בניחס על חלקם בהתאמת מערכת הריסוס. לליעד ליבנה על חלקו בפיתוח סימולציות הריסוס ואיפיון המערכת. כמו כן ברצוננו להודות לחברת מרססי דגניה על התמיכה ושיתוף הפעולה בנושא תכן המרסס האוטונומי הממוזער.

סיכום עם שאלות מנחות

נא לענות על כל השאלות, בקצרה ולעניין, ב 3 עד 4 שורות מכסימום לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).

שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

הערה: נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
איפיון של מערכת ריסוס אוטונומית הכוללת את מערכות המשנה הבאות: פלטפורמה נושאת, מערכת הנעה ובקרת היגוי, מערכת ניווט, מערכת זיהוי, מערכת ריסוס, מערכת בקרה ראשית. חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי של חלופות שונות. פיתוח אלגוריתמים לזיהוי נתיב ההתקדמות, המטרות לריסוס, היגוי ובקרה המערכת האוטונומית ובקרת הריסוס למשימת ריסוס פלפל בבתי צמיחה. תכנון מפורט ובנית אב טיפוס של מערכת ריסוס אוטונומית עבור פלפל בבתי צמיחה, ובדיקת ביצועיה. הוכחת היתכנות ריסוס סלקטיבי בניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים.
עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
באיפיון המערכת נמצא כי החלופה המועדפת הינה פלטפורמה אוטונומית גדולה בעלת מיכל בנפח מעל 50 לי. הטיית מוט הריסוס בניצב לכיוון הנסיעה פוגעת ביעילות הריסוס ועל כן בעת בניית מרסס אוטונומי יש להוסיף אלמנט מייצב למוט הריסוס. סטייה ממרכז נתיב הנסיעה של הרובוט גורמת אף היא לירידה חדה בביצועים. במודל התיפעול נמצא כי הנצילות המירבית התקבלה עבור מיכל של 100 לי וחלקות בעלות שורות באורך 60 מ'. מערכת הראייה הממוחשבת הגיע להצלחה של 93% בממוצע בתמונות בדידות ולהצלחה מלאה בניסויים. אב טיפוס הראשון נסע בהצלחה באופן אוטונומי במעברים בין השורות באורך כ- 18 מ' ללא פגיעה בשורות או בצמחים. אלגוריתם זיהוי סוף שורה ויכולת סיבוב זיהה בצורה מלאה בזמן אמת את נקודות סוף השורה וביצע בהצלחה את ההחלטה על יכולת הסיבוב. האלגוריתם לתמרון המעבר בין השורות עבד בצורה חלקית. ניסויים ושיפור האלגוריתמים עדיין מתבצעים.
המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר בתקופת הדו"ח.
במסגרת המחקר פותח אב טיפוס אוטונומי ראשון ובוצע תכן לאב טיפוס שני. הושגו בצלחות ייחודיות בתחום התאמת מערכת הריסוס לריסוס רובוטי בחממת פלפל. פיתוח אלגוריתם לניווט בשורות פלפל, זיהוי סוף שורה וקבלת החלטה על אפשרות לביצוע פניה לשורה חדשה. אינטגרציה של כלל המערכות והתאמת מרסס מסחרי לכדי מערכת עובדת. רוב מטרות המחקר הושגו.
הבעיות שנותרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנותרה לביצוע תוכנית המחקר.
יש להשלים את סדרת ניסויי החממה וגמר פיתוח האלגוריתמים למעבר בין שורות.
האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח - יש לפרט: פרסומים – כמקובל בביבליוגרפיה, פטנטים - יש לציין מס' פטנט, הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום ותאריך.
העבודות פורסמו בכנסים הבינלאומיים הבאים: PRECISION, 2011 ASABE, 2011 AGRISENSING, 2010 CIGR, 2012 AGRICULTURE
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
☒ רק בספריות
☒ ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
☒ חסוי – לא לפרסם, בשל מידע הקיים בדוח ושייך למרססי דגניה וכן אפשרות לפטנט ביחידת הריסוס