

פיתוח מערכת אוטונומית לניטור ללא הרס של מחלות ויסודות הזנה בבתי צמיחה לפלפל
Development of an autonomous system for nondestructive monitoring of diseases
and nutrients in pepper greenhouses

אביטל בכר¹, ויקטור אלחנתי¹, יפית כהן¹, יגאל אלעד², אביב דומברובסקי², פנחס פיין³, רון ברנשטיין¹, גיא לידור¹, יוסף גרינשפון¹, שבתאי כהן⁴, שמעון פיבניה⁴

¹המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי
²המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי
³המכון למדעי הקרקע מים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי
⁴מו"פ ערבה

תוכן עניינים

1	תוכן עניינים
1	1. שטח פעולה של כל משתתף וחלקו במחקר
1	2. תקציר
3	3. מבוא ותאור הבעיה
6	4. מטרות המחקר
7	5. תוכנית המחקר
14	6. רשימת פרסומים רלוונטיים של החוקרים
18	7. מקורות מימון
18	8. שבתון/גמלאות
19	9. התייחסות להערות ועדת ההיגוי
19	10. רשימת מקורות

1. שטח פעולה של כל משתתף וחלקו במחקר

אביטל בכר – ריכוז הפרויקט כולל אפיון התהליכים, הגדרת הניסויים וביצועם, Conceptual design של המערכת, ריכוז התוצאות, אינטגרציה והנדסת מערכת. עובד תקן (ע"ת). avital@volcani.agri.gov.il.
ויקטור אלחנתי - תכן ופיתוח מערכת החיישנים, פתוח אלגוריתמים לראייה ממוחשבת. ע"ת.
יפית כהן - חקלאות מדויקת פיתוח אלגוריתמי הדגימה. ע"ת.
יגאל אלעד - מחלות בפלפל. ע"ת.
אביב דומברובסקי - נגיפים בפלפל. ע"ת.
פנחס פיין - הזנה בפלפל, אנליזות צמח, מים וקרקע. ע"ת.
רון ברנשטיין - תיכון הנדסי של המערכת האוטונומית, אינטגרציה של המערכות ועריכת הניסויים. ע"ת.
גיא לידור - פיתוח מערכת החשמל. ע"ת.
יוסף גרינשפון - פיתוח מערכת האלקטרוניקה. ע"ת.
שבתאי כהן - אגרוטכניקה, הזנה והשקייה. ע"ת.
שמעון פיבניה - הגנת הצומח. ע"ת.

2. תקציר

במדינת ישראל כ- 29,000 דונם פלפל מתוכם כ- 16,800 דונם בערבה (בשנים 2008 – 2009), רובם בבתי צמיחה (בערבה הגידול מתבצע רק בבתי צמיחה). ניטור מחלות בתקופת הגידול והקטיף באמצעות פיקוח תקופתי הינה הכרחית למניעת התפשטות המחלה ופגיעה משמעותית ביבול. בשל מגבלות כח אדם, זמן ועלות פיקוח גבוהה, תדירות דגימת החלקה וצפיפות הדגימות במרחב בית הצמיחה אינן מיטביות. מצב זה עלול לגרום לגילוי מאוחר של מוקדי מחלות ומזיקים, להתפרצות פגעים אשר לא יאובחנו בזמן, לגרימת נזק ולמשטרי הזנה לא מדויקים

ולשימוש מוגבר ומיותר בחומרי הדברה גם בשטחים בהם הם לא דרושים. ניטור מצב יסודות ההזנה בקרקע חיוני לשליטה בהתפתחות הצמח וקבלת יבול אופטימלי. כיום מרבית החקלאים אינם מנטרים כלל את מצב יסודות ההזנה בקרקע, ומרביתם מסתפקים במעקב חזותי להערכת מצב הגידול, בהסתמך על ניסיונם רב-השנים. חוסר ניטור גורם למקרים רבים של הפרזה בהזנה בכלל ובהזנה החנקנית בפרט. העליה של מחירי הדשנים והירידה בתמורות המתקבלות עתה עבור התוצרת מביאים כיום למוטיבציה גבוהה בקרב החקלאים לנטר את יסודות ההזנה, לחסוך בהוצאות הדישון ולמצות את פוטנציאל היבול הקיים. בשל הצורך לבצע חלק מאיסוף המידע במגע וחוסר אפשרות למדוד באמצעי חישה מרחוק הקיימים בתחום החקלאות המדייקת עקב הסתרה של שטחי הגידול במבנים הללו, קיים צורך בפיתוח מערכת קרקעית לאיסוף הנתונים הללו באמצעות חישה מקרוב ומגע. המערכת האוטונומית תאפשר ניטור בתדירות ובצפיפות גבוהה ובכך תיעל את הליך קבלת ההחלטות לריסוס ולדישון.

מטרת המחקר הינה פיתוח של מערכת אוטונומית לניטור מחלות וחומרי הזנה בבתי צמיחה בפלפל. זאת באמצעות פיתוח פלטפורמה נושאת אוטונומית וזרוע רובוטית לביצוע הדגימה, אלגוריתמים לזיהוי אנומליות במצב הצמח ורמת ההזנה ומודלים לדיגום אופטימלי. מערכת זו תאפשר דגימה מרחבית ועיתית ברזולוציה גבוהה ותביא לשיפור בדיוק זיהוי מחלות ותכולת חומרי ההזנה בצמח, לחיסכון בידיים עובדות במשימות הניטור וכתוצאה מכך להקטנת עלות יישום הריסוס וכן להפחתה בכמויות חומרי ההדברה.

המחקר המוצע הינו בין-תחומי וייושמו בו שיטות מתחומי הנדסת מכונות/הנדסה חקלאית, אוטומציה נבונה, חקלאות מדייקת, מדעי הצמח והגנת הצומח. המערכת האוטונומית לניטור תנוע באופן עצמאי לאורך שורות הגידול ובמעבר בין השורות ותבצע מדידות לא הרסניות לאיתור אנומליות המעידות על הימצאות מחלה ולניטור רמת יסודות ההזנה בצמח. המערכת תתבסס על פלטפורמה בעלת יכולת ניווט גבוהה כאשר המידות הגיאומטריות של הפלטפורמה יאפשרו תנועה בתוך השורות ומעבר משורה לשורה. במערכת זו תשולבנה מערכות המבוססות על ראייה ממוחשבת לניווט ולאיתור האנומליות ומערכות ספקטראלית ותרמית לניטור יסודות ההזנה ולזיהוי מחלות. בגמר תהליך הניטור, תספק המערכת מפה של הגידול ובה פרטים אודות תנאי הגידול, מחלות, מצב השקיה ונתונים נוספים.

התועלת הצפויה מהמחקר הינה בקרה אינטנסיבית בזמן ומיפוי ברזולוציה מרחבית גבוהה של מצב חלקת הגידול מהיבטי הזנה וניטור פגעים. מידע זה יאפשר זיהוי מוקדי אילוח ואיפיון דינאמיקת התפשטותו, יישום ממוקד בזמן ובמרחב של תכשירי הדברה או פעולות הדברה, דישון במינון מדויק יותר, הקטנת חוסר האחידות בין הצמחים, דיוק הזיהוי במצב הצמח, הקטנת הנזק הנגרם מחוסר או עודף של חומרי הזנה, חיסכון בעלויות חומרי ההזנה וההדברה, בידיים עובדות הנדרשות הן לביצוע הדגימות ולביצוע טיפולי ההדברה העודפים.

3. מבוא ותאור הבעיה

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 הפלפל עשוי להתקף על ידי מחלות הנגרמות על ידי פטריות, חיידקים ונגיפים. מבין המחלות הנגרמות על ידי פטריות ניתן למנות את הקימחונית הנגרמת על ידי *Leveillula taurica* התוקפת עלים בכל אזורי הגידול החשובים החל מ 50 יום לאחר השתילה. המחלה מתקיימת בתנאי לחות בינונית וגבוהה המצויה בחלקות פלפל אך נביטת הנבגים וההדבקה מתרחשים בתנאי לחות גבוהה. במקרים של מגפה קשה נושרים עלי הפלפל והפירות נחשפים למכות שמש (Elad et al., 2007). מחלת עובש אפור הנגרמת על ידי *Botrytis cinerea* תוקף את כל חלקי הצמח בתנאי לחות גבוהה ורטיבות נוף. הדבקה גבעולים עשויה להביא לתמותת הצמח. נבגי הפטרייה מוסעים באוויר ונובטים בנישוח צמחיות בהן יש מים חופשיים (אלעד, 1998). מחלות קרקע הנגרמות על ידי מיני פתיום (*Pythium spp.*) תוקפת בשלבי צמח צעיר ובשלב מבוגר. תמותת צמחים בתחילת העונה מתרחשת בשבועות הראשונים שלאחר השתילה. מין פתיום שונה מזה, המתבסס בתחילת העונה, גורם להתמוטטות חורפית וקשור לטמפרטורות נמוכות. מחלות חשובות אחרות בגידול הפלפל הן אלה הנגרמות על ידי נגיפים אשר גורמים לנזקים כבדים לגידול הפלפל כדוגמת נגיף כתמי הנבילה של העגבנייה (TSWV) *Tomato spotted wilt virus* המועבר ע"י טריפסים ונגיף הנימור המתון בפלפל *Pepper mild mottle virus* (PMMoV) המועבר בצורה מכאנית דרך נוף הצמח והקרקע, ל- PMMoV יכולת שרידות גבוהה וממושכת בקרקע.

בתקופת הגידול והקטיף יש לבצע פיקוח תקופתי לזיהוי הופעת פגעים. בהעדר ניטור יעיל החלטות המגדלים לטיפול עשויות להיות מוטעות ולגרום לעיתים קרובות לריסוס עודף. מגבלות כח אדם, הזמן ועלות הפיקוח, מפחיתות את תדירות דגימת החלקה וצפיפות הדגימות במרחב בית הצמיחה. עקב כך, דגימת החלקה אינה מיטבית ועלולה לגרום מחד לגילוי מאוחר של מוקדי מחלות ומזיקים, להתפרצות פגעים אשר לא יאובחנו בזמן, ולגרימת נזק ומאידך לשימוש מוגבר ומיותר בחומרי הדברה ובידיים עובדות גם בשטחים בהם הם לא דרושים. בדומה, ניטור מצב ההזנה של הגידול חיוני לשליטה בהתפתחות הצמח ולקבלת יבול אופטימלי. כיום מרבית החקלאים המגדלים פלפל אינם מנטרים כלל את מצב יסודות ההזנה בקרקע ובצמח ומסתפקים במעקב חזותי להערכת מצב הגידול מאחר והשיטה העיקרית היא בבדיקות קרקע ושואבי תמיסה שהינם מדדים עקיפים אשר לא מעידים בהכרח על מצב הצמח עצמו בשל עיכוב חמור במשוב מהמעבדה אלא יותר על מצב הסביבה בקרקע. חוסר ניטור גורם בד"כ לדישון מוגזם, בעיקר של חנקן ולפגיעה בריווחיות ובסביבה. העלייה במחירי הדשנים והירידה בתמורות המתקבלות עתה עבור התוצרת מביאים כיום למוטיבציה גבוהה בקרב החקלאים לנטר את יסודות ההזנה, לחסוך בהוצאות הדישון ולמצות את פוטנציאל היבול הקיים. בדיקות עלים הן אמצעי מוכח לקבלת החלטות להזנה, וניסוי הקדמי שבוצע במו"פ ערבה הראה כי ניתן לנטר בצורה מהירה, קלה ומדויקת את זמינות החנקן לפלפל בכל פרק זמן באמצעות בדיקת חנקות בפטטרות או בטרפים. אולם חסר פרוטוקול שיגדיר רמות הזנה על פי ערכים נדרשים בחלקי צמח, בהתאם לשלב הפנולוגי, מצב הגידול ומאפייני הזן. בשנים האחרונות מתבצעים מספר מחקרים אשר הראו את הפוטנציאל הקיים במדידות כלורופיל באמצעות חיישן אופטי מסוג SPAD לייעול מימשק הדישון החנקני בפלפל. ממצאים אלה מצביעים על הפוטנציאל לשילוב חיישנים אופטיים במערכות חישה למיפוי מצב ההזנה בצמח.

לפיכך, פיתוח של מערכת אוטונומית לניטור מחלות, מזיקים וגורמי הזנה בבתי צמיחה לפלפל יאפשר לחקלאי לקבל החלטות בצורה מדויקת יותר וברזולוציה גבוהה יותר, יפחית את הבזבוז בדישון וריסוס הנובע מחוסר מידע הקיים היום ואת עלויותיהם, יקטין את הסכנות הטמונות בחשיפה של עובדים לחומרי הדברה, את כמות החומר על המוצר החקלאי וכן את ימי העבודה הרבים המושקעים במשימות אלו הנובעים מהבזבוז וקבלת ההחלטות המוטעית. החיסכון בידיים עובדות הן בפעולות הניטור, הריסוס וההזנה יאפשרו להפנותן לביצוע משימות יצרניות אשר יגדילו את תפוקת המשק, רווחיות החקלאי ושרידות הענף. למיטב ידיעת החוקרים בהצעה זו, לא ידוע על פיתוח של מערכת אוטונומית לניטור בבתי צמיחה.

העבודה תכלול איסוף נתונים על שיטות הניטור הקיימות והדרישות, פיתוח אלגוריתמים ומערכות זיהוי מבוססי ראייה ממוחשבת ושיטות אחרות, פיתוח אלגוריתמים ומערכות ניווט ובקרה לניהוג המערכת האוטונומית, ניסויים בשטח, חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי של חלופות אפשרויות. המחקר המוצע הוא מולטידיסציפלינארי ויחייב שלוב של שיטות מחקר מהנדסה חקלאית, הנדסת מכונות, חקלאות מדייקת, מדעי הצמח, קרקע ומים והגנת הצומח.

בשל הצורך לבצע חלק מאיסוף המידע במגע וחוסר אפשרות למדוד באמצעי חישה מרחוק הקיימים בתחום החקלאות המדייקת עקב הסתרה של שטחי הגידול במבנים הללו, קיים צורך בפיתוח מערכת קרקעית לאיסוף הנתונים הללו באמצעות חישה מקרוב ואולי מגע.

רובוטים ומערכות אוטונומיות בחקלאות

רובוטים ומערכות אוטונומיות הינן מערכות המבצעות משימות, מטפלות בקבלת החלטות ופועלות בזמן-אמת ללא התערבותו של גורם האנושי (Bekey, 2005). חישה וקבלת החלטות הינן יכולות בסיסיות להשגת אוטונומיות במערכות אלה (Oriolo et al., 1998). פעולת החישה ניתנת להשגה באמצעות חיישנים, אשר אוספים את המידע המתקבל הן מהרובוט עצמו והן מהסביבה בה הוא פועל.

רובוטים בחקלאות מהווים נושא לפיתוח ומחקר זמן רב. הפיתוח מתפרס על מגוון רחב של תחומים חקלאיים ופעולות חקלאיות. בחלק מהתחומים המערכות הרובוטיות יושמו כגון חליבה (Halachmi et al., 2002), וחלק בשלבי פיתוח שונים, כגון עיבוד השדה, שתילה (Chen et al., 2003), ריסוס (Stentz et al., 2001), גיזום, קציר (Pilarski et al., 2002) וקטיף סלקטיבי (Sivaraman and Burks, 2006).

מחקרים רבים הוצגו בזיהוי בחקלאות (Chen et al., 2003; Van Henten et al., 2002; Alchanatis et al., 2001), בתכן תפסנית ייעודית לפירות וירקות (Van Henten et al., 2002; Iida et al., 1996) וניווט בחקלאות (Tsubota et al., 2000; Bell, 2000; Keicher et al., 2000; Canning et al., 2004; Khot et al., 2006). רובוטים חקלאיים עובדים לרוב בסביבות דינאמיות ולא מוגדרות מראש, הדורשות רמה גבוהה של תחכום ומקשות על הליכי הפיתוח. ההוזלה במחירי מחשב ואלקטרוניקה בכלל ורובוטיקה בפרט, אפשרה לרובוטיקה לחדור לתחום החקלאות והמשק החי. למרות שקיימים רובוטים מסחריים (Hannan and Burks, 2004), העלויות של רובוטים חקלאיים צריכות להיות סבירות בכדי שתהיה להן הצדקה כלכלית (Bechar, 2010). ההתפתחות הטכנולוגית מאפשרת לרתום את האוטומציה והרובוטיקה במגוון רחב של תהליכים בחקלאות כגון, שתילה, ריסוס, ניטור וקטיף סלקטיבי. רובוטים

אוטונומיים חקלאיים, צריכים להיות בעלי יכולת פעולה בסביבה חקלאית בלתי מובנית, ללא פגיעה ביכולת ובאיכות העבודה. רובוטים אלה נדרשים לנווט באופן אוטונומי בשטח החקלאי בעל תוואי משתנה ולבצע את המשימות החקלאיות הנדרשות ללא התערבותו של הגורם האנושי (Bechar, 2010). יתרונות הרובוט האוטונומי באות לידי ביטוי בהפחתת כח האדם הנדרש לשטח נתון ולמשימות מוגדרות, אחידות ודיוק רב יותר של הרובוט בהשוואה לאדם.

רובוטים חקלאיים הוחדרו בהצלחה בצורה מסחרית למשימות פשוטות המתבצעות בזמן ניהוג עיוור לאורך השדה (למשל – קומביינים וטרקטורים אוטונומיים (Schueller, 2006)). זיהוי צמח יכול להיעשות בראייה ממוחשבת (Van Henten et al., 2002) או במערכות מולטיספקטרליות (Alchanatis et al., 2001). בתחום הניווט האוטונומי ניסו ב- 50 השנים האחרונות לפתח מערכות, אך רק בשנים אחרונות הגיעו לרמת אוטונומיות גבוהה. אולם, רוב המחקרים מתרכזים במטעים ובשדות פתוחים. למיטב ידיעת הכותבים, לא קיימת מערכת המסוגלת לנוע באופן אוטונומי ללא תשתית מיוחדת בבתי צמיחה ובחממות.

רובוטים אוטונומיים לניטור מחויבים במערכות חישה היכולות לתפקד ביעילות בתנאי סביבה משתנים ובמערכות מיכניות ותפסניות ייחודיות (Bechar, 2010). לא קיים מידע רב בספרות על מערכות ניטור והמחקרים בנושא עוסקים בעיקר באיסוף מידע ומיפוי. Zhang ו-Guo (2005) פיתחו מערכת איחוד מידע אלחוטית לאיסוף אוטומטי עיבוד של נתונים תפעוליים ממכון חקלאי בכדי לספק תמיכה בזמן אמת של משימות מחקלאת מדייקת. Demmel וחבריו (2002) פיתחו מערכת איסוף מידע לשדה המבוססת על חיישן GPS. המערכת אוספת מידע תפעולי בתדירות של 1 הרץ. Griepentrog וחבריו (2005) פיתחו מערכת זריעה מדויקת להפקת מפות זרעים של סלק. הם השתמשו בחיישן RTK-GPS לחישוב המיקום בשילוב עם חיישן אופטי לזיהוי הזרעים. דיוק המערכת היה 16-43 מ"מ. Downey וחבריו (2004) פיתחו מערכת אוטומטית למיפוי עשבים בשדה כותנה באמצעות חיישן GPS ומצלמת וידאו דיגיטלית המותקנת על כלי מאויש שנע לאורך שורות הגידול. המערכת זיהתה 74% מהעשבים ו-92% מהכותנה. מערכת ראייה ממוחשבת למיפוי עשבים תוך כדי נסיעה שולבה במערכת אוטונומית לריסוס סלקטיבי (Hong Young et al., 2009). מערכת קרקעית לדיגום צמחי כותנה תוך כדי נסיעה לקביעת חוסרים בחנקן והערכת גובה הצמח פותחה באמצעות מצלמה מולטי-ספקטראלית וחיישן אולטרסוני (Sui and Thomasson, 2006). המחקר בפיתוח רובוטים לדיגום בחקלאות התמקד בדיגום פרמטרים של קרקע (Liu et al., 2009). לעומת זאת, מערכות לדיגום פרמטרים של צומח הן ספורות.

ניטור מחלות

איתור מחלות צמחים במבנים נעשה היום באמצעות מומחים לנושא המזהים את הופעת סימני המחלות ואת חומרתם במהלך ביקור במבנה ותנועה לאורך שורות הגידול. הנגיף PMMoV משתייך לסוג Tobamovirus זוהה לראשונה באיטליה (Wetter et al., 1984) וכיום נפוץ בעולם כולו. בדומה לנגיפים אחרים מקבוצת הטובמווירוסים ל-PMMoV יכולת שרידות גבוהה בקרקע, יכולת לעבור בזרעים ובמצע הגידול. קיימים גזעים שונים של נגיף זה שעברו קו-אבולוציה עם הגידול בעקבות החדרת עמידות גנטית לזני הפלפל. PMMoV על מגוון גזעיו פוגע קשות בפרי הפלפל גורם לו עיוותים, יוצר גבשושיות והופעת מוזאיקה על פני הפרי, תופעות הפוסלות אותו לשיווק. יכולתו של

הנגיף לעבור בזרעים, בקרקע ובמגע מכני עם הנוף מאפשרים התפשטותו המהירה וגרימת נזקים בהיקף מאוד משמעותי. בשל העובדה כי סימני המחלה ב- PMMoV מופיעים בשלב מאוחר של הגידול על הפירות עולה הצורך בשימוש בשיטות רגישות יותר (סרולוגיות) לזיהוי הנגיף עוד בשלבים המוקדמים של הגידול. זיהוי מוקדם של הנגיף יאפשר את הרחקתם של הצמחים הנגועים מהחלקה ובכך למנוע ולהפחית את ההפצה המשנית של הנגיף.

חקלאות מדייקת

מחקרים בעולם מראים כי בבתי צמיחה וחממות המשתרעים על שטחים קטנים יחסית ואמורים לספק תנאי סביבה אחידים יש מקורות רבים הגורמים לשונות. התאמת המשאבים לשונות המרחבית, לפי עיקרון החקלאות המדייקת, מחייבת מסד של נתוני מצב הצמח בצפיפות ובתדירות גבוהות. חישה מרחוק הינה אמצעי שכיח למיפוי שונות ברזולוציה מרחבית גבוהה במצב הצמח בשטחים פתוחים אך אינו מתאים לבתי צמיחה. אלטרנטיבה לחישה מרחוק הינה דיגום אינטנסיבי בתוך בית הצמיחה. דיגום תדיר וצפוף בבתי צמיחה יכול להיעשות בשני אופנים: פיזור מספר רב של חיישנים במקומות קבועים במרחב בית הצמיחה וחיבורם לרשת אלחוטית המסדרת למרכז מידע או באמצעות מערכת דיגום אוטונומית בעלת חיישן יחיד אשר נעה במרחב בית הצמיחה. למערכת אוטונומית יתרון בכך שהיא יכולה לשמש מספר בתי צמיחה ללא צורך בחיישנים נוספים, בעלת יכולת שינוי בתדירות הדגימה המרחבית והעיתית בהתאם לשיקולים שונים. בנוסף, יכולה לשמש כפלטפורמה למספר חיישנים על מנת לדגום פרמטרים שונים. גיאוסטטיסטיקה עוסקת בניתוח ההשתנות המרחבית של משתנה ובהערכה של המשתנה במיקומים שלא נדגמו. על מנת לנסח אלגוריתם דגימה מיטבי במרחב יש להתחשב בדגם המרחבי שלו ובאופי השתנותו במרחב. מחקרים שונים הראו כי גם פגעים וגם רמת יסודות ההזנה אינם מפוזרים בצורה אקראית בחלקה אלא מגלים אוטו-קורלציה ודגמים מרחביים מקובצים וכי אין צורך בדיגום של כל הצמחים אלא צמחים המרוחקים במרחק מסוים בהתאם לעוצמת הקשר המרחבי של התופעה. באופן דומה ניתן לבחון קשר בזמן בהתאם לקצב התפשטות המחלה במרחב. שימוש באלגוריתם דגימה אופטימאלי יגדיל את יכולת הכיסוי של מערכת דגימה אוטונומית ואת יעילותה.

4. מטרות המחקר

המטרה הכללית של המחקר הינה פיתוח של מערכת אוטונומית לניטור מחלות וחומרי הזנה בבתי צמיחה בפלפל באמצעות פיתוח מערכת אוטונומית וזרוע רובוטית לביצוע הדגימה, אלגוריתמים לזיהוי אנומליות במצב הצמח ורמת ההזנה ומודלים לדיגום אופטימלי לשם דגימה מרחבית ועיתית ברזולוציה גבוהה ולשיפור בדיוק זיהוי מחלות ותכולת חומרי ההזנה בצמח, לחיסכון בידיים עובדות במשימות הניטור וכתוצאה מהקטנת יישום הריסוס, להפחתה בכמויות חומרי ההדברה והידיים העובדות במשימה זו. המטרות הספציפיות הינן:

1. איפיון מלא של מערכת ניטור אוטונומית הכוללת את המערכות הבאות: פלטפורמה נושאת, מערכת הנעה ובקרת היגוי, מערכת ניווט, מערכת חיישנים לזיהוי הפרמטרים הנדרשים בצמח ובקרקע, מערכת בקרה ראשית.
2. איפיון זרוע רובוטית לדיגום ו-end-effector אשר יותאם לאיסוף דגימות, מדידה ושימוש בחיישנים קיימים.
3. פיתוח אלגוריתמים לדגימה אופטימלית בהתאם לתנאי הסביבה, מצב הקרקע והצמח, הנתונים ההיסטוריים ואינטראקציה לאזורים אחרים בחלקה.
4. פיתוח אלגוריתמים לזיהוי נתיב ההתקדמות, היגוי, ניווט ובקרת המערכת האוטונומית.

5. פיתוח אלגוריתמים לאיסוף דגימות ומדידה באמצעות הזרוע הרובוטית.
6. תכן הנדסי ובנית אב טיפוס של מערכת הניטור והזרוע עבור פלפל בבתי צמיחה, ובדיקת ביצועיה.
7. הוכחת היתכנות ניטור חומרי הזנה, מחלות ומזיקים בניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים.
8. הדגמת פעולת אב טיפוס בביצוע ניטור בתנאי חממה.

חשיבותו וייחודו של המחקר

המחקר הנוכחי הוא מולטידיסציפלינרי ויושמו בו שיטות של הנדסה חקלאית, הנדסת מכונות, חקלאות מדייקת, מדעי הצמח, קרקע ומים והגנת הצומח לפיתוח מערכת אוטונומית לניטור חומרי הזנה, מחלות וחרקים בבתי צמיחה לפלפל. יפותחו המודלים ותתי המערכות הייחודיים לדגימה אופטימלית, ניווט, היגוי, בקרה, איסוף דגימות ומדידה. תבוצע אינטגרציה של כל תתי המערכות באמצעות אב טיפוס על מנת לאפשר פעולה מיטבית ועצמאית של המערכת בהתערבות מינימלית של אדם תוך העלאת איכות ודיוק קבלת ההחלטות על ידי החקלאי לשימוש אופטימלי בחומרי הזנה והדברה ולהקטין את כמויות השימוש וכח האדם הדרוש לביצוען. מחקר זה יביא לחיסכון בידיים עובדות במשימות הניטור, הריסוס והדישון והפנייתו לעבודות יצרניות ובכך לגרום להקטנת עלויות הייצור, הגדלת הפיריון, העלאת רווחיות הענף, שרידות המשק והפחתת התלות בזמינות כח האדם. בקרה מתמדת של מצב החלקה יאפשר לשפר את מצבה ולהקטין את כמויות חומרי ההדברה וההזנה המיושמות וצמצום פגיעה בעובדים כתוצאה ממגע עם חומרי ההדברה.

הערכה כלכלית

במדינת ישראל כ- 29,000 דונם פלפל מתוכם כ- 16,800 דונם בערבה (בעונת 2008 – 2009), רובם בבתי צמיחה. ניטור מחלות וחומרי ההזנה האוטונומי יגדיל את איכות ואחידות המוצר אשר יגדילו את ערכו בשווקים בינלאומיים. המערכת האוטונומית תחסוך בכח האדם הדרוש לביצוע משימות הניטור ויאפשרו דיגום אופטימלי בהתאם לתנאי החלקה. כמו כן יקטינו את כמות החומר הדרוש להדברה ולהזנה ואת עלויות רכישתו, אחזקתו ושימושו. בנוסף יקטינו את כמות הידיים העובדות הדרושות לביצוע משימות הריסוס בשל הקטנת הצורך בריסוס אינטנסיבי גורף מאחר ויישום חומרי הדברה הינו אחד מתהליכי הגידול השכיחים וההכרחיים בשלבי הגידול והקטיף בפלפל ומצריך עבודת ידיים רבה. כח האדם המושקע במשימות הריסוס בכל הערבה עומד על כ- 150 עובדים זרים. כח האדם שייחסף יוכל להיות מנוטב לפעולות היצרניות ולהגדיל את תפוקת ופיריון המשק. במידה והמערכת המוצעת תחסוך כ- 20% מפעולות הריסוס יחסכו כ- 30 עובדים שעלותם כ- 2,500,000 ₪ לשנה וכ- 20% מעלות חומרי ההדברה וההזנה. הטכנולוגיות שיפותחו יוכלו לשמש בסיס לפיתוחים עתידיים או שיותאמו עבור גידולים נוספים.

5. תוכנית המחקר

המחקר המוצע מתוכנן ל- 5 שנים ויבוצע במספר משקים לגידול פלפל בערבה, בחממה ייעודית במרכז וולקני ובתחנת ניסויים "יאיר". האפיון והניסויים ייערכו עבור בתי צמיחה מסוגים שונים וחלקות שונות. גובה הצמחים יהיה מכ- 1 מ' ועד 3 מ'. המערכת האוטונומית לניטור תנוע באופן עצמאי לאורך שורות הגידול ובמעבר בין השורות ותבצע מדידות לא הרסניות לאיתור אנומליות המעידות על הימצאות פגעים ולניטור רמת החנקן בצמח. במחקר זה נתמקד בשתי מחלות עיקריות: קמחונית ווירוס ה- PMMoV.

המערכת תתבסס על פלטפורמה בעלת יכולת ניווד גבוהה, שטח כיסוי נרחב ויכולת נשיאה של מערכת החישה, הזרוע הרובוטית, תתי מערכות נוספות ודגימות, כאשר המידות הגיאומטריות של הפלטפורמה יאפשרו תנועה בתוך השורות ומעבר משורה לשורה. במערכת זו תשולבנה מערכות המבוססות על ראייה ממוחשבת וסורקי לייזר (LADAR) לניווט ולאיתור האנומליות, חיישנים ייעודיים לזיהוי מחלות ומערכת ספקטראלית לניטור יסודות ההזנה. תפוח זרוע דיגום לכיוון החיישנים אל נקודות הדיגום, ובמיוחד עבור חיישנים שיחייבו מגע עם הצמחים לשם ביצוע הדגימה.

שלב חיוני במערכת לדיגום צמחים הינו בחירת החיישנים המתאימים ופיתוח אלגוריתמים לזיהוי הפרמטר הצמחי. **הרעיון המרכזי** העומד בבסיס הפיתוח של המערכת לדיגום צמחי לפל הוא שיפור הרזולוציה המרחבית והעתית של הדיגום. במילים אחרות, אנו מנסים לחקות את הליך הדיגום הרגיל אך לבצע אותו באופן אינטנסיבי יותר. בצורה כזו, הסיכוי לזהות חוסרים בחנקן או צמחים נגועים בכל נקודת זמן יעלה ובכך נשפר את מימשק ההזנה והריסוס. בחירת החיישנים ופיתוח האלגוריתמים נגזרים מהרעיון לעיל ולכן בשלב זה נבחן מערכות חישה וניתוח שנבחנו בעבר למשימות זיהוי דומות ולא נפתח או נבחן מערכות חדשות.

זיהוי חוסרים בחנקן: לזיהוי חוסרים בחנקן בחרנו להתמקד במכשיר ה-SPAD (Minolata, Ltd.), ובספקטרומטר (HR2000 mini-spectrometer (OceanOptics Inc.) בתחום 400-1000 ננומטר. ה-SPAD שנקרא גם מד-כלורופיל, מודד את הקרינה המועברת בשני אורכי-גל בתחום האדום והאינפרא-אדום הקרוב (אא"ק). Madeira and De Varennes (2005) עקבו בהצלחה אחר ההשפעה של חנקן על התפתחות צמחי פלפל באמצעות SPAD. בגלל המורכבות בדיגום אוטומטי באמצעות SPAD (פירוט בהמשך) אנו נבחן גם שימוש בהחזר קרינה בספקטרומטר בתחום הנראה והאא"ק ונבחן מספר מדדים ספקטראליים שפותחו להערכת חנקן (Jain et al., 2007 and Vincini and Frazzy, 2009). לצורך פיתוח אלגוריתמים לזיהוי חוסרים בחנקן יועמדו שני טיפולי דישון חנקתי בחממה של מצב תקין ושל חוסר בחנקן ברמה המצריכה דישון. הטיפולים שיועמדו בארבע זורות, ינוטרו באמצעות החיישנים 4-5 פעמים במהלך העונה הן באמצעות SPAD והן באמצעות ספקטרומטר. מדידות באמצעות הספקטרומטר יבוצעו ממרחקים שונים מהצמחים על מנת למצוא את המרחק המיטבי למדידה (מבחינות הדיוק ופשטות היישום). לכויל ולתיקוף יילקחו עלים להערכת חנקה בפטוטורות ואחוז חנקן בעלים. בהתבסס על נתוני המעבדה נמצא ערכי סף ונפתח אלגוריתמים לזיהוי חוסרים. ההשערה היא שהשימוש במערכת הניטור תתבסס על השוואה יחסית עם צמחים במצב תקין כפי שמקובל היום בדיגומים ידניים ב-SPAD (Hartz et al., 1993).

בחירה בין SPAD וספקטרומטר תתבסס הן על יעילות הזיהוי של חוסרים בחנקן והן על יעילות הדיגום של כל חיישן. מצד אחד ה-SPAD הוא כלי ייעודי וקל לתפעול ידני אך מכיוון שהוא מחייב מגע עם העלה, קצב הדגימה יהיה גבוה באופן משמעותי מדגימה מרחוק באמצעות הספקטרומטר. מעבר לכך, התאמתו לדיגום אוטונומי היא מורכבת. במידה וה-SPAD ימצא מתאים יותר מבחינת יעילות זיהוי חוסרים בחנקן, נפתח אלגוריתמים: לעיבוד תמונה לזיהוי העלה, לניווט הזרוע הרובוטית לעלה המתאים, ולסגירה של החיישן משני צידי העלה. מצד שני הספקטרומטר איננו ייעודי אך ניתן תיאורטית לאסוף דגימות ללא מגע תוך כדי נסיעה איטית ממרחק מסויים מן העלה. במידה והספקטרומטר ימצא עדיף אזי נשלב בזרוע הרובוטית את הסיב האופטי, תאורה מלאכותית ונקבץ

רפרנס לבן ושחור אשר באמצעות הזזה של הזרוע לכיוונם ימדדו באמצעות הספקטרומטר מדי מספר מדידות לצורך כיוול. מעבר לכך, יקבע הגובה בו הזרוע המחזיקה את הסיב צריכה להיות בכל מועד דיגום על מנת "שידגמו" את העלים האינדיקטיביים בכל צמח (העלה הצעיר ביותר שהגיע למלוא גודלו).

בכדי שניתן יהיה להשוות את המדידות שיבוצעו באמצעות הספקטרומטר וה-SPAD למצב האמיתי בצמח, בכל מהלך העונה יבול הפרי (כמות והרכב כימי) ייבדק, יבוצעו בדיקות קרקע לחנקן מינרלי (לעומק 60 ס"מ במרווחים של 20 ס"מ) פעם בחודש, ובהתחלת העונה ובסופה. ייבדקו חנקן מינרלי, זרחן "זמין" (אולסן) ואשלגן חליף. בדיקות עלים (העלה הראשון מלמעלה הפרוס לכל אורכו) ייעשו במקביל לבדיקות הקרקע: בטרפים יבדקו חנקן, זרחן, אשלגן, סידן, מגנזיום, יסודות קורט וכלוריד (מדד לצבירה תקופתית). בפטורות יבדקו חנקן חנקתי, זרחן ואשלגן. שלוש פעמים בעונה ייבדק גם טרף של עלה תחתון (מדד לצבירה עונתית).

זיהוי צמחים נגועים במחלות: גורמי מחלות יכולים להשפיע באופן משמעותי על טמפרטורת העלה. בנוסף לפגיעה כללית בפעילות המטבולית של הרקמה הנגועה, הגורמת בעצמה לשינויים בטמפרטורת הרקמה, פתוגנים רבים משפיעים ישירות על מוליכות המים בעלה על ידי פגיעה בפעילות הפיוניות ו/או בקוטיקולה. בד"כ שינויים אלו מתרחשים בשלבים המוקדמים (ימים ולעיתים שעות ראשונות) של ההדבקה, הרבה לפני שתסמיני המחלה נראים לעין ויחידות ההפצה נוצרות (Chaerle and Van Der Straeten, 2000; Chaerle et al., 2006; Chaerle et al., 2007). במסגרת המחקר נבחן מצלמה תרמית לא-רדיומטרית על מנת לזהות אנומליות בטמפרטורה בצמח הפלפל המופיעות בעקבות נגיעות במחלת הקמחונית ובוירוס ה-PMMoV. Chaerle וחבריו (2006) בחנו את השינויים התרמאליים בצמח בוחן שהודבק בוירוס PMMoV וזיהוי עליה בטמפרטורות של עלים ללא סימפטומים. לא נמצאו מחקרים שעסקו בזיהוי מוקדם של קמחונית בפלפל. במסגרת המחקר נבצע ניסוי מבוקר בזיהוי של מחלות אשר יועמד בחממה בוולקני. צמח נגוע בקמחונית מראה סימפטומים ויזואליים כשבועיים לאחר האילוח. לפי זה, נאלח צמחי פלפל בקמחונית בריכוזים שונים ונבצע צילומים תרמיים של צמחים נגועים ובריאים כל יומיים עד לקבלת סימפטומים ויזואליים של הפגיעה של המחלה. צמחים נגועים בוירוס PMMoV מראים סימפטומים רק על הפרי. במקרה זה נאלח צמחים ונעקוב אחריהם פעם בשבוע עד ליצירת פרי. בנוסף, נבצע צילום וידיאו תרמי במשך כמה ימים של צמחים מאולחים בשתי המחלות ונבחן מהו הזמן המיטבי ביום שהאנומליות בטמפרטורה הן המשמעותיות ביותר. במקביל, נלווה פקחים בחממות בערבה ונבצע צילומים אנכיים ואלכסוניים של צמחים שיזוהו כנגועים במחלות על מנת ליצור בסיס נתונים תחת תנאים רגילים. לזיהוי אנומליות בטמפרטורה נשתמש בהליך ניתוח סטטיסטי (Meron et al., 2010). בסוף הניסויים נקבע את הזמן המיטבי לצילום, אופן הצילום (אנכי או אלכסוני) ונפתח התקן לחיבור המצלמה לזרוע הרובוטית.

אופן הדיגום: דיגום באמצעות רובוט טומן בחובו את היכולת למפות את כל הצמחים ולקבל את התפרושת המרחבית המלאה של הפרמטר הנמדד. עם זאת, קיומה של אוטוקורלציה מרחבית מאפשרת להגדיל את המרחק בין הדגימות ובכך לצמצם את זמן הדיגום או להגדיל את כיסוי השטח ביחידת זמן. בגלל דינאמיקה בזמן התפרושת המרחבית עשויה להשתנות במיוחד זו של מחלות בגלל אופן ההתפשטות שלהן. המטרה בחלק הזה היא לפתח אלגוריתמים לדיגום יעיל הן מבחינת תפרושת הדגימות והן מבחינת המסלול של הרובוט במרחב החממה. במחקרים רבים הניתוח הגיאוסטטיסטי מאפשר למצוא את המרחק המרבי בין דגימות כאשר בגלל מגבלות של זמן

וכח-אדם מנסים למזער את הדגימות על-ידי בחירת מרחק בו יש מינימום אוטוקורלציה מרחבית (למשל: Cabera et al., 2005; Beers and Jones, 2004). במקרה של רובוט אשר יכול לדגום במהירות יחסית גבוהה ניתן יהיה לבצע דגימות שעדיין יש ביניהן אוטוקורלציה מרחבית משמעותית. בצורה כזו גם נוכל להבטיח התאמה דינאמית של אלגוריתם הדגום מבלי שיחמוק מאיתנו מוקד של מחלה או של חוסר בחנקן. לצורך לימוד ואיפיון התפרושת והשונויות המרחביות של חוסרים בחנקן ושל מחלות נבצע במשך השנים הראשונות של המחקר דיגום ידני/ויזואלי אינטנסיבי במרחב ובזמן (בחנקן נעשה שימוש ב-SPAD). באמצעות ניתוח הדגם המרחבי (semivariogram או ניתוח מוקדים חמים של Getis-Ord) וכן ניתוח ההשתנות של התפרושת המרחבית בזמן (אוטוקורלציה בזמן) נפתח מודל מיטבי לדיגום במרחב החממה או החלקה. לצורך קביעת המסלול המיטבי נשתמש באלגוריתמים ממשפחת "נתיב העלות הנמוכה" (Liu et al., 2009) עליהם מתבססים מערכות הניווט ברכבים. בנוסף, במידת האפשר נפתח אלגוריתמים דינאמיים אשר ימצאו את הנתיב תוך כדי שינוי של פיזור הדגימות למשל בעקבות מציאת מוקד חס של מחלה.

קביעת התצורה של הדיגום לכל אחת מן המטרות וניסוי: לקראת השנה הרביעית של המחקר נקבע את התצורה של הדיגום על כל היבטיה ביניהם: סוג החיישן, אופן הדיגום, קרי, מרחק מן הצמח, צילום אנכי או אלכסוני, מהירות נסיעה, אלגוריתמים לדיגום ומירווחי זמן בין דיגום לדיגום. לאחר הגדרת התצורה נבצע בשנה ד' ניסוי בשטח, קרי, דיגום חנקן וצמחים נגועים במחלות תוך כדי נסיעה ובחינת המערכות ממספר היבטים: (א) הערכת דיוק ואמינות הזיהוי של חוסרים בחנקן על-ידי בדיקת מספר עלים שזוהו כ"סובלים" מחוסר בחנקן במעבדה (חנקה בפטוטורות ואחוז חנקן בעלה או בצמח); (ב) הערכת דיוק ואמינות הזיהוי של צמחים נגועים במחלות על-ידי הערכה ויזואלית של פקח האם הצמח נגוע במחלה או לא ואם יהיה צורך אזי תוספת של בדיקת מעבדה כמו PCR; (ג) מהירות הדיגום, העיבוד והזיהוי בפועל לעומת החישובים התיאורטיים ומה ההשלכות הפרשי המהירויות; (ד) איפיון תקלות והעלאת הצעות לפתרון כגון חוסר יכולת להגיע לנקודת הדגימה, חומר יכולת לנוע בנתיב שנבחר, "עיוורון" זמני של חיישנים וכדומה; ו-ה) איפיון התוצר (הפלט) עימו יעבוד החקלאי-מפה, דו"ח.

פיתוח מערכת הניווט: מערכת הניווט תהא אחראית על זיהוי מיקום הפלטפורמה, על זיהוי מכשולים בדרך, זיהוי מיקום הדגימה, זיהוי שורות הפלפל ומסלול התקדמות הפלטפורמה מנקודת דגימה אחת לאחרת. המערכת תהיה מצוידת בחיישנים נוספים כגון GPS לקביעת מיקום, מצפן דיגיטלי או לייזר-גיירו לקביעה מהירה של כיוון הפלטפורמה, ובחיישני אולטרא סאונד ולייזר לזיהוי מכשולים וגבולות שורות הפלפל בתחום הקרוב לפלטפורמה. במידת הצורך יערך שימוש בחיישנים נוספים כגון רדאר וחיישני תאוצה. יישקל גם ניווט לפי מערכות מקובעות.

פיתוח מערכת בקרת ההיגוי: מערכת בקרת ההיגוי אחראית על הנעת הפלטפורמה והיגוייה, המערכת הינה מערכת בקרה בחוג סגור המקבלת את נתוני הניווט ממערכת הניווט ומתרגמת אותם באמצעות מודל קינמטי התואם את הפלטפורמה לפקודות היגוי והנעה. תפקידה גם לוודא שהפלטפורמה מתקדמת כמתוכנן באמצעות חיישני מערכת הניווט ואנקודרים המצויים על גלגלי או מרכב הפלטפורמה.

במחקר יעשה שימוש בכלי תיב"מ, סימולציה קינמטית ותהליכית לאיפיון ותכן המערכת, קינמטיקה, שיטות בקרה, ראייה ממוחשבת, איחוד מידע מחיישנים, אופטימיזציה וכן כלי קבלת החלטות. במידת האפשר יתבצע שימוש במידע שנוצר ובטכנולוגיה שפותחה במחקרים דומים בהם שותפים החוקרים, כגון מערכת ריסוס

אוטונומית לפלפל בבתי צמיחה, ובמערכות או תתי מערכות קיימות תוך התאמות או כמוצר מדף בכדי לזרז את זמני הפיתוח ולרכז מאמצים במכלולים אשר אינם קיימים.

הפיתוח יתוכנן כך שעלות מערכת מסחרית תהיה כזו שתחזיר את ההשקעה ברכישתה במספר מצומצם של עונות גידול בכדי לאפשר רכישתה על ידי מספר רב של חקלאים. פיתוח המערכת יאפשר לבצע את משימות ניטור מחלות, מזיקים וחומרי הזנה תוך התערבות מינימלית של עובדים.

בשנה הראשונה של המחקר יערך איפיון של שיטות ניטור מחלות, מזיקים וחומרי הזנה הנהוגות בבתי צמיחה לפלפל, איפיון וחקירת הפרמטרים החשובים בניטור כל גורם. יבוצעו מדידות בבתי צמיחה, בדיקות ייבול ובדיקות בקרקע, איפיון המערכת הכוללת, איפיון תתי מערכות: ניטור וזיהוי (חיישנים), ניווט, היגוי, פלטפורמה, זיהוי והזרוע הרובוטית בהתאם לדרישות המשימה והסביבה. יפותחו מערכות הניטור של הגורמים השונים, פיתוח ראשוני של האלגוריתמי הניטור אשר מעבדים המידע מהחיישנים לשם זיהוי אנומליות והמצאות של מחלות, מזיקים ומצב חומרי ההזנה. העיבוד יבוצע בשלב ראשון על תמונות שיצולמו מנקודות שונות באופן סטטי, ובשלב שני מתוך סרטי וידאו שיצולמו תוך כדי תנועה בבתי צמיחה שונים. יבוצע פיתוח ראשוני של אלגוריתם הדיגום הכולל את מפת נקודות דגימה אשר ייצגו באופן אופטימלי את מצב החלקה. ייקבעו החוקים אשר יאפיינו את מערכת הבקרה הראשית ואת הקשרים בין מערכות המשנה השונות.

בשנה השנייה יושלם פיתוח אלגוריתם הדיגום/מפת הדגימות ויפותחו אלגוריתם המעבר האופטימלי מנקודת דגימה אחת לאחרת. כמו כן יפותחו אלגוריתמים ראשוניים בתתי המערכות השונות: במערכת הניווט תבוצע סגמנטציה של הישויות השונות (שביל, שורת פלפל, רקע, מכשולים וכו') ומציאת הפרמטרים החשובים בכל ישות כגון כיוון השביל, מרחק לקצה השביל, גובה שורות הפלפל ומיקום וגודל המכשול אם קיים. התמונות יצולמו במצבי גידול שונים וידמו תנועה של מערכת הניטור. יפותחו אלגוריתם תיכנון מסלול אופטימלי מנקודת מדידה אחת לאחרת. האלגוריתם שיפותח יוכל להתמודד עם "עיוורון" זמני של חיישנים או נתונים שונים, של רעש במערכת והפרעות מסוג פונקציית הלם, מדרגה או סחיפה. יבוצע Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של הזרוע הרובוטית וה- end-effector אשר יותאמו לחיישנים שונים ולאיסוף דגימות. תאופיין מערכת הבקרה הראשית (ריכוזית, מבוזרת היררכית וכדומה). יירכשו הרכיבים הנדרשים לבניית מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector. ייערכו ניסויי מעבדה וניסויי שדה בחמה הייעודית אשר במכון להנדסה חקלאית לבחינת מערכת החיישנים הראשונית והאלגוריתמים השונים לניטור ולדיגום ויצירת מפת מידע של החלקה.

בשנה השלישית תבנה מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector. יבוצע Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של המערכת האוטונומית על פי האיפיון שבוצע בשנה הראשונה ופיתוח ראשוני של מערכות היגוי ובקרת המערכת האוטונומית, הדגימה וניטור חומרי הזנה. במערכת בקרת ההיגוי יבוצע תיכנון ראשוני של המודל הקינמטי בהתאם לפלטפורמה שתקבע. סיום פיתוח האלגוריתמים השונים ופיתוח מערכת הבקרה הכוללת. יירכשו הרכיבים הנדרשים לבניית תתי המערכות השונות כגון LADAR, מצלמות, GPS, חיישני אולטרא סאונד, מצפן דיגיטלי, לייזר-גיירו, אנקודרים ועוד. ייערכו ניסויי מעבדה וניסויי שדה בחמה הייעודית אשר במכון להנדסה חקלאית ובבתי צמיחה בערבה לבחינת הזרוע הרובוטית וה- end-effector ומערכת החיישנים לניטור.

בשנה הרביעית יבנה אב טיפוס ראשון של המערכת האוטונומית המלאה. יבוצעו ניסויי מעבדה לבדיקת האינטגרציה בין תתי המערכות ומערכת הבקרה הראשית. יבוצעו שיפורים באב טיפוס על סמך ניסויי המעבדה, ייערכו ניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים ובתנאים שונים של הגידול. יבוצע חקר ביצועים של המערכת, תיבחן מידת מעורבות האדם הנדרשת בשלבי העבודה השונים ומציאת אופן פעולה אופטימלי של המערכת האוטונומית. בנוסף, יבוצע אפיון מערכת מסחרית, ניתוח כלכלי למערכת מסחרית והיתכנות יישום המערכת לגידולים נוספים. תחילת בניית אב טיפוס שני משופר על סמך תוצאות הניסויים והניתוחים שבוצעו על אב הטיפוס הראשון.

בשנה החמישית עידון המודלים והאלגוריתמים של מערכות המשנה השונות ותושלם בניית אב הטיפוס השני. יבוצעו ניסויי שדה וניסויים חצי מסחריים באב הטיפוס השני, גמר פיתוח המערכת האוטונומית, חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי.

מטרות השנה הראשונה: אפיון של שיטות ניטור מחלות, מזיקים וחומרי הזנה. אפיון מלא של מערכת ניטור אוטונומית הכוללת את המערכות הבאות: פלטפורמה נושאת, מערכת הנעה ובקרת היגוי, מערכת ניווט, מערכת חיישנים לזיהוי הפרמטרים הנדרשים בצמח ובקרקע, מערכת בקרה ראשית. פיתוח ראשוני של האלגוריתמי הניטור והדיגום הכולל את מפת נקודות דגימה. קביעת החוקים לאפיון מערכת הבקרה הראשית ואת הקשרים בין מערכות המשנה השונות.

מטרות השנה השנייה: פיתוח אלגוריתם הדיגום/מפת הדגימות ואלגוריתם המעבר האופטימלי מנקודת דגימה אחת לאחרת. פיתוח אלגוריתמים בתתי המערכות השונות. Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של הזרוע הרובוטית וה- end-effector. פיתוח אלגוריתמים לזיהוי נתיב ההתקדמות, היגוי, ניווט ובקרת המערכת האוטונומית.

מטרות השנה השלישית: פיתוח אלגוריתמים לאיסוף דגימות ומדידה באמצעות הזרוע הרובוטית. בניית מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector. ביצוע Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של המערכת האוטונומית. פיתוח מערכות היגוי ובקרת המערכת האוטונומית.

מטרות השנה הרביעית: בניית אב טיפוס ראשון של המערכת האוטונומית המלאה. ביצוע חקר ביצועים של המערכת. אפיון מערכת מסחרית, ניתוח כלכלי למערכת המסחרית ובדיקת היתכנות.

מטרות השנה החמישית: בניית אב טיפוס שני. גמר פיתוח המערכת האוטונומית, חקר ביצועי המערכת, ניתוח כלכלי והוכחת היתכנות ניטור חומרי הזנה, מחלות ומזיקים בניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים.

בשנה הראשונה תבוצענה המשימות הבאות:

1. אפיון של שיטות ההזנה וניטור מחלות ומזיקים בבתי צמיחה לפלפל.
2. ביצוע מדידות בתי צמיחה לאפיון המערכת האוטונומית כגון גבהים נדרשים, אורך שורה, רזולוציה נדרשת לזיהוי ואפיון הפרמטרים החשובים בתהליך מהיבטיי ראייה ממוחשבת, הנדסת מכונות, חקלאות מדייקת ומדעי הצמח עבור המערכת האוטונומית.
3. אפיון תתי מערכות: ניטור (חיישנים), ניווט, היגוי, פלטפורמה, זיהוי והזרוע בהתאם לדרישות המשימה והסביבה.
4. פיתוח ראשוני של האלגוריתמי הניטור אשר מעבדים המידע מהחיישנים לשם זיהוי אנומליות והמצאות של מחלות, מזיקים ומצב חומרי ההזנה.

5. פיתוח ראשוני של אלגוריתם הדיגום הכולל את מפת נקודות דגימה אשר ייצגו באופן אופטימלי את מצב החלקה ולקביעת רזולוציית הדגימה המיטבית בזמן ובמרחב.
6. קביעת החוקים אשר יאפיינו את מערכת הבקרה הראשית ואת הקשרים בין מערכות המשנה השונות.
7. מדידת יבול הפרי, בדיקות קרקע לחנקן מינרלי, בדיקת זרחן "זמין" (אולסן) ואשלגן חליף. בדיקות עלים

בשנה השנייה תבוצענה המשימות הבאות:

1. פיתוח נירחב של אלגוריתם הדיגום/מפת הדגימות.
2. פיתוח אלגוריתם המעבר האופטימלי מנקודת דגימה אחת לאחרת.
3. פיתוח אלגוריתם תיכנון מסלול אופטימלי מנקודת מדידה אחת לאחרת אשר יוכל להתמודד עם "עיוורון" זמני של חיישנים או נתונים שונים, של רעש במערכת והפרעות מסוג פונקציית הלם, מדרגה או סחיפה.
4. פיתוח אלגוריתמים ראשוניים בתתי המערכות השונות: במערכת הניווט תבוצע סגמנטציה של הישויות השונות (שביל, שורת פלפל, רקע, מכשולים וכו') ומציאת הפרמטרים החשובים בכל ישות כגון כיוון השביל, מרחק לקצה השביל, גובה שורות הפלפל ומיקום וגודל המכשול אם קיים. התמונות יצולמו במצבי גידול שונים וידמו תנועה של מערכת הניטור.
5. ביצוע Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של הזרוע הרובוטית וה- end-effector אשר יותאמו לחיישנים שונים ולאסוף דגימות כאשר תחילה נתמקד ברמת החנקן.
6. איפיון מערכת הבקרה הראשית (ריכוזית, מבוזרת היררכית וכדומה).
7. רכישת הרכיבים הנדרשים לבניית מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector.
8. עריכת ניסויי מעבדה וניסויי שדה בחמה הייעודית אשר במכון להנדסה חקלאית לבחינת מערכת החיישנים הראשונית והאלגוריתמים השונים לניטור, לדיגום ויצירת מפת מידע של החלקה.

בשנה השלישית תבוצענה המשימות הבאות:

1. בניית מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector.
2. ביצוע Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של המערכת האוטונומית על פי האיפיון שבוצע בשנה הראשונה.
3. פיתוח ראשוני של מערכות ההיגוי ובקרת המערכת האוטונומית, הדגימה וניטור חומרי הזנה.
4. תיכנון ראשוני של המודל הקינמטי במערכת בקרת ההיגוי בהתאם לפלטפורמה שתקבע.
5. סיום פיתוח האלגוריתמים השונים ופיתוח מערכת הבקרה הכוללת.
6. רכישת הרכיבים הנדרשים לבניית תתי המערכות השונות כגון LADAR, מצלמות, GPS, חיישני אולטרא סאונד, מצפן דיגיטלי, לייזר-גיירו, אנקודרים ועוד.
7. עריכת ניסויי מעבדה וניסויי שדה בחמה הייעודית אשר במכון להנדסה חקלאית ובבתי צמיחה בערבה לבחינת הזרוע הרובוטית וה- end-effector ומערכת החיישנים לניטור.

בשנה הרביעית תבוצענה המשימות הבאות:

1. בניית אב טיפוס ראשון של המערכת האוטונומית המלאה.
2. אינטגרציה של מערכות הבקרה האחראיות על התנועה, ההיגוי, הניטור, הניווט, הדיגום והמידע במערכת.
3. עריכת ניסויי מעבדה לבדיקת האינטגרציה בין תתי המערכות ומערכת הבקרה הראשית.
4. ביצוע שיפורים באב טיפוס על סמך ניסויי המעבדה.
5. עריכת ניסויי שדה בבתי צמיחה מסוגים שונים ובתנאים שונים של הגידול.

6. חקר ביצועים של המערכת תוך בחינת מידת מעורבות האדם הנדרשת בשלבי העבודה השונים ומציאת אופן פעולה אופטימלי של המערכת האוטונומית.
7. אפיון מערכת מסחרית.
8. ניתוח כלכלי למערכת מסחרית ובדיקת היתכנות יישום המערכת לגידולים נוספים.

בשנה החמישית תבוצענה המשימות הבאות :

1. עידון המודלים והאלגוריתמים של מערכות המשנה השונות.
2. בניית אב טיפוס שני על סמך תוצאות הניסויים והניתוחים שבוצעו על אב הטיפוס הראשון.
3. עריכת ניסויי שדה וניסויים חצי מסחריים באב הטיפוס השני,
4. ביצוע שיפורים באב טיפוס, גמר פיתוח המערכת האוטונומית.
5. חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי.

התוצאות הצפויות

בשנה הראשונה : אפיון של שיטות ההזנה וניטור מחלות ומזיקים בבתי צמיחה לפלפל. אפיון נתונים על בתי צמיחה והפרמטרים החשובים בתהליך. אפיון תתי מערכות. קביעת החוקים אשר יאפיינו את מערכת הבקרה הראשית ואת הקשרים בין מערכות המשנה השונות.

בשנה השנייה : אלגוריתם ניטור המעבד המידע מהחיישנים לשם זיהוי אנומליות והמצאות של מחלות, מזיקים ומצב חומרי ההזנה. אלגוריתם הדיגום הכולל את מפת נקודות דגימה אשר ייצגו באופן אופטימלי את מצב החלקה ולקביעת רזולוציית הדגימה המיטבית בזמן ובמרחב. אלגוריתם המעבר האופטימלי מנקודת דגימה אחת לאחרת. אלגוריתם תיכנון מסלול אופטימלי. Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של הזרוע הרובוטית וה- end-effector. אפיון מערכת הבקרה הראשית.

בשנה השלישית : בניית מערכת החיישנים, הזרוע הרובוטית וה- end-effector Conceptual design ותכן הנדסי מקיף של המערכת האוטונומית. אלגוריתמים בתתי המערכות השונות. פיתוח מערכת הבקרה הכוללת.

בשנה הרביעית : פיתוח מערכות ההיגוי ובקרת המערכת האוטונומית, הדגימה וניטור חומרי הזנה והמחלות. בניית אב טיפוס ראשון של המערכת האוטונומית המלאה. אינטגרציה של תתי המערכות. חקר ביצועים של המערכת האוטונומית. אפיון מערכת מסחרית. ניתוח כלכלי למערכת מסחרית

בשנה החמישית : בניית אב טיפוס שני משופר של המערכת האוטונומית המלאה וגמר פיתוח המערכת האוטונומית. חקר ביצועי המערכת וניתוח כלכלי

6. רשימת פרסומים רלוונטיים של החוקרים

1. אלעד י. 1998. בוטריטיס. בספר מחלות צמחים בישראל, רותם י, פלטי י ובן יפת י (עורכים), הוצאת מינהל המחקר החקלאי. ע' 257-267
2. בכר, א., אידן, י. יוסף ש. נתניהו ס. 2003. פרויקט מס' 458-0212-01. דוח מסכם. המדען הראשי, משרד החקלאות.
3. כהן, י., חצרוני, י., כהן, א., טימר, ד., גזית, י., אלחנתי, ו., 2007. פיתוח מערכת תומכת החלטה מרחבית להדברת זבוב הים התיכון בהדרים בישראל. מיכון והנדסה, פברואר, 2007, 51(1) : 34-41.
4. כהן, י., טימר, ד., כהן, א., 2009. הערכת תקיפות מערכת תומכת החלטה מרחבית לריסוס הדרים - "המצילה". ניר ותלם, ספטמבר, 2009, 18 : 56-58.

5. גולדשטיין, א., כהן, י., חצרוני, א., צרור, ל., זיג, א. ולנסקי, א., 2010. פיתוח מערכת תומכת החלטה מרחבית לתכנון חלקות תפוחי אדמה למזעור התפתחות מחלת הדוררת. ניר ותלם, בהדפסה.
6. פיין, פ'. 2008. נייר עמדה לגבי השימוש החקלאי בבוצות שפכים בארץ. חקלאי ישראל, ינואר 2008: 9-12.
7. הדס אפרת, א' אייזנקום, פ' פיין וא' צוקרמן. 2008. השימוש המיטבי בפרש בקר. ניר ותלם 8: 7-12.
8. פוסמניק רועי, עופר גיא, נאג'ידאת עלי, פיין פנחס וגרוס עמי. 2009. פיתוח ריאקטור ביולוגי לייצור דשן נוזלי עתיר חנקן ויישומו בחקלאות האורגנית. יבול שיא (נוב' 2009) 46: 66-70.
9. תמיר גיא, אשר בר טל, משה שנקר, פנחס פיין, אביבה הדס, הדר הלר, ופאול בלום. 2009. שימוש באיזוטופים יציבים של פחמן הנפלט כפחמן דו-חמצני מהקרקע ככלי להערכת המסת גיר ופירוק חומר אורגני. כנס באגודה הישראלית למדע הקרקע. רחובות, 13 בדצמבר 2009.
10. Alchanatis V., Cohen Y., Cohen S., Möller M., Sprinstin M., Meron M., Tsipris J., Saranga Y., and Sela E. 2010. Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water status in cotton with thermal imaging .
11. Bar-Tal A., U. Yermiyahu, J. Beraud, M. Keinan, R. Rosenberg, D. Zohar, V. Rosen, and P. Fine. 2004. Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Uptake by Wheat and Their Distribution in Soil following Successive, Annual Compost Applications. *J. Environ. Qual.* 33: 1855-1865.
12. Bar-Tal, A., Baas, R., Ganmore-Neumann, R., Dik, A., Marissen, N., Silber, A., Davidov, S., Hazan, A., Kirshner, B. and Elad, Y. (2001) Rose flower production and quality as affected by Ca concentration in the petal. *Agronomie* 21:393-402.
13. Bechar, A. (2008). Human-robot cooperation for target recognition in agricultural tasks. Nir and Telem (in Hebrew). 6: 36-38.
14. Bechar, A. (2010). Automation and robotic in horticultural field production. *Stewart Postharvest Review* 6(3): 1-11. (invited review).
15. Bechar, A. and Y. Edan. (2003). Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots. *Industrial Robot* 30 (5): 432-436.
16. Bechar, A., D. Dayan, S. Schmilowitch, Y. Moskovitch and Y. Edan (2005) A pocket-pc-based platform for agricultural work study measurements. 35th International Conference on Computers & Industrial Engineering.
17. Bechar, A., J. Meyer and Y. Edan (2009). An Objective Function to Evaluate Performance of Human-Robot Collaboration in Target Recognition Tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C* 39(6): 611-620.
18. Bechar, A., S. Yosef, S. Netanyahu and Y. Edan. 2007. Improvement of work methods in tomato greenhouses using simulation. *Transactions of the ASABE* 50(2): 331-338.
19. Ben-Gal A., Agam N., Alchanatis V., Cohen Y., Yermiyahu U., Zipori I., Presnov E., Sprintsin M., and Dag A. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27:367-376
20. Ben-Gal, A., Koolb, D., Agam, N., vanHalsema, G. E. Yermiyahu, U., Yafe, A.,
21. Beraud, J., P. Fine, U. Yermiyahu, M. Keinan, R. Rosenberg, A. Hadas, and A. Bar-Tal. 2005. Modeling Carbon and Nitrogen Transformations for Adjustment of Compost Application with Nitrogen Uptake by Wheat. *J. Environ. Qual.* 34: 664-675.
22. Berenstein, R., Shahr, O. B., Shapiro, A., Edan, Y. (2010) Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer, *Intelligent Service Robotics*. 3(4). 233-243.
23. Bulanon, D. M., T. F. Burks and Alchanatis, V. (2009). Fruit Visibility Analysis for Robotic Citrus Harvesting. *Transactions of the ASABE*. 52(1): 277-283.
24. Bulanon, D.M., Burks, T. and Alchanatis V. (2008). Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosystems Engineering* 101(2):161-171. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.08.002
25. Bulanon, D.M., Burks, T. F. and Alchanatis, V. (2009). Image Fusion of Visible and Thermal Images for Fruit Detection. *Biosystems Engineering*.: 103(1):12-22, doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.009
26. Cai, X., Thenkabail, P.S., Biradar, C., Platonov, A., Gumma, M., Dheeravath, V., Cohen, Y., Goldshlager, N., Ben-Dor, E., Alchanatis, V., Vithanage, J., and Markandu, A. 2009. Water

- productivity mapping using remote sensing data of various resolutions to support "more crop per drop". *Journal of Applied Remote Sensing*, 3, 033557 (12 October 2009)
27. Cohen, A. **, Cohen, Y., Broday, D., and Timar D. 2008. Performance and acceptance evaluation of a knowledge-based SDSS for Medfly area-wide control. *Journal of Applied Entomology*, 132, 734–745.
 28. Cohen, Y., 2004. Satellite images and GIS for updating agricultural information: The knowledge-based system approach. *Contemporary Israeli Geography*. Eds. Inbar, M. and Maoz, Y. 61-62: 215-226 .
 29. Cohen, Y., Alchanatis V., Zusman, Y., Dar, Z., Bonfil, D.J., Karnieli, A., Zilberman, A., Moulin, A., Ostrovsky, V., Levi, A., Brikman, R., and Shenker, M. (2010). Leaf nitrogen estimation in potato based on spectral data and on simulated bands of the VENμS satellite. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-009-9147-8
 30. Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M. and Saranga, Y. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *International Journal of Experimental Botany*, 56, (417), 1843-1852.
 31. Cohen, Y., Cohen, A., and Broday, D. 2010. A knowledge-based SDSS for Medfly area-wide control. in *Decision Support Systems in Agriculture, Food and the Environment: Trends, Applications and Advances*. Eds. Manos, B., Matsatsinis, N., Paparrizos, K., and Papathanasiou, J. Pages: 21-46. IGI-Global, PN, USA.
 32. Cohen, Y., Cohen, A., Hetzroni, A., Alchanatis, A., Broday, D., Gazit, Y., and Timar D. 2008. Spatial decision support system for Medfly control in citrus. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2), 107-117 .
 33. Dombrovsky A, Huet H, Chejanovsky N, Raccach B.(2005). Aphid transmission of a potyvirus depends on suitability of the helper component and the N terminus of the coat protein. *Arch Virol*.150: 287-298.
 34. Dombrovsky, A., Glanz, E., Pearlsman, M., Lachman, O., Antignus, Y. (2010). Characterization of Pepper yellow leaf curl virus a tentative new Polerovirus species causing a yellowing disease of pepper. *Phytoparasitica*. In press.
 35. Dombrovsky, A., Gollop, N., Songbi, C., Chejanovsky, N., Raccach B. (2007b). In vitro association between the helper protein of the zucchini yellow mosaic virus and cuticle proteins of *Myzus persicae*. *J. Gen. Virol.* 88: 1602-1610.
 36. Dombrovsky, A., Ledger, T.N., Engler, G., Robichon, A. (2009). Using the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* as a tool for screening biological responses to chemicals and drugs. *BMC Research Notes*. 2:185, pp 1-6.
 37. Dombrovsky, A., Pearlsman, M., Lachman, O., and Antignus, Y. (2009). Characterization of a new strain of Eggplant Mottled Crinkle Virus (EMCV) infecting eggplants in Israel. *Phytoparasitica*. 37: 477-483.
 38. Eben-Chaime, M., A. Bechar and A. Baron. (2008). Electronic Spreadsheet Tools for Layout Design of Greenhouses. *ACTA HORTICULTURAE* 801: 433-440.
 39. Edan, Y and A. Bechar.1998. Multi-purpose agricultural robot. *ProceedingS of the Sixth IASTED International Conference, Robotics And Manufacturing*, Banff, Canada. pp. 205-212.
 40. Elad, Y. and Yunis, H. (1993) Effect of microclimate and nutrients on development of cucumber gray mold (*Botrytis cinerea*). *Phytoparasitica* 21:257-268.
 41. Elad, Y., Brand, M., Messika, Y., Rav David, D. and Szejnberg, A. (2009) Spray treatments combined with climate modification for the management of *Leveillula taurica* in sweet pepper. *European Journal of Plant Pathology* 124:309-329.
 42. Elad, Y., Gullino, L. M., Shtienberg, D. and Aloï, C. (1994) Coping with tomato grey mould under mediteranean conditions. *Crop Protection* 14:105-109.
 43. Elad, Y., Messika, Y., Brand, M., Rav David, D. and Szejnberg, A. (2007) Effect of colored shade nets on pepper powdery mildew (*Leveillula taurica*). *Phytoparasitica* 35:285-299.
 44. Elad, Y., Messika, Y., Brand, M., Rav David, D. and Szejnberg, A. (2007) Microclimate effect on *Leveillula taurica* powdery mildew of sweet pepper. *Phytopathology* 97:813-824.

45. Eshel, G., P. Fine and M.J. Singer. 2007. Total Soil Carbon and Water Quality: an Implication for Carbon Sequestration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 397-405.
46. Fine, P., A. Scagnossi, Y. Chen, and U. Mingelgrin. 2005. Removal of Transition Metals from Aqueous Systems by Peat: The Cadmium Case. *Environmental Pollution* 138:358-367.
47. Fine, P., and A. Hass. 2007. Role of Organic Matter in Microbial Transport during Irrigation with Sewage Effluent. *J. Environ. Qual.* 36:1050-1060.
48. Graber, E. R., P. Fine, and G. J. Levy. 2006. Soil Stabilization in Semiarid and Arid Land Agriculture. In Special issue on Advances in Physico-chemical Stabilization of Geomaterials. *J. Mat. in Civ. Engrg.* 18, 190-205.
49. Gross A., R. Arusi, P. Fine, and A. Nejidat. 2008. Assessment of extraction methods with fowl manure for the production of liquid organic fertilizers. *Bioresource Technology* 99:327-334.
50. Hass, A., and P. Fine. Sequential selective extraction procedures for the study of heavy metals in soils, sediments, and waste materials: A critical review. *Critical. Reviews in Environmental Science and Technology* (accepted.)
51. Heller, H., A. Bar-Tal, G. Tamir, P. Bloom, R. T. Venterea, D. Chen, Y. Zhang, C. E. Clapp, and P. Fine. 2010. Effects of manure and cultivation on carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a corn field under Mediterranean conditions. *J. Environ. Qual.* 39: 437-448.
52. Herrmann, I., Karnieli, A., Bonfil, D. J., Cohen, Y., and Alchanatis, V. 2010. SWIR-based Spectral Indices for Assessing Nitrogen Content in Potato Fields. *International Journal of Remote Sensing*, 31(19):5127-5143.
53. Hetzroni, A., Y. Edan, V. Alchanatis. 1997. Imaging techniques for site-specific chemical application. Special issue on improved pesticide application technology for reducing dosages and environmental pollution. *Phytoparasitica* 25: 59S-69S.
54. Jacob, D., Rav David., D., Sztjenberg, A, and Elad, Y. (2008) Conditions for development of powdery mildew of tomato caused by *Oidium neolycopersici*. *Phytopathology* 98:270-281.
55. Kounatidis, I., Papadopoulos, N.T., Mavragani-Tsipidou, P., Cohen, Y., Terivanidis, K., Nomikou, M., and Nestel, D. 2008. Effect of Elevation on Olive fly (*Bactrocera oleae*) Spatio-Temporal Patterns in Northern Greece. *Journal of Applied Entomology*, 132, 722-733.
56. Lavi N., Y. Tadmor, A. Meir, A. Bechar, M. Oren-Shamir, R. Ovadia, M. Reuveni, S. Nahon, H. Shlomo, L. Chen and I. Levin. 2009. Characterization of the Intense Pigment Tomato Genotype Emphasizing Targeted Fruit Metabolites and Chloroplast Biogenesis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(11): 4818-4826.
57. Laykin, S., V. Alchanatis, E. Fallik, Y. Edan. 2002. Image processing algorithms for tomato classification. *Transactions of the ASAE* 45(3): 851-858.
58. Lee, W.S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D. and C. Li (2010) (review paper). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 74, Issue 1, October 2010, pages 2-33
59. Lurie (2011). Physical and visual properties of grape rachis as affected by water vapor pressure deficit. *Postharvest Biology and Technology* 59 (2011) pp. 25-33 doi:10.1016/j.postharvbio.2010.07.009
60. Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V. and Cohen, Y. 2010. Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*, 11:148-162
61. Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V., and Cohen, Y. (2010). Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-009-9153-x
62. Möller, M., Alchanatis, V, Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., and Cohen, S. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *International Journal of Experimental Botany*, 58(4), 827-838.

63. Oka Y., N. Tkachi, S. Shuker, R. Rosenberg, S. Suriano, and P. Fine. 2006. Laboratory studies on the enhancement of nematicidal activity of ammonia-releasing fertilisers by alkaline amendments. *Nematology* 8:335-346
64. Oka, Y., N. Shapira, and P. Fine. 2007. Control of root-knot nematodes and soil-borne fungal diseases in organic farming systems by organic amendments and biofumigation. *Crop Protection* 26:1556–1565.
65. Oka, Y., N. Tkachi, S. Shuker, R. Rosenberg, S. Suriano, L. Roded, and P. Fine 2006. Field studies on the enhancement of nematicidal activity of ammonia-releasing fertilisers by alkaline amendments. *Nematology* 8:881-893
66. Oliver, I. W., A. Hass, G. Merrington, P. Fine, and M.J. McLaughlin. 2004. Copper availability in 7 Israeli soils incubated with and without biosolids. *J. Environ. Qual.*34:508–513.
67. O'Neill, T.M., Shtienberg, D. and Elad, Y. (1997) Effect of some host and microclimate factors on infection of tomato stems by *Botrytis cinerea*. *Plant Disease* 81:36-40.
68. Precision Agriculture, 11:27-41
69. Presnov, E., Erel, R., Majdo, A., Zipori, I., Segal, E., Rüger, S., Zimmermann, U., Cohen, Y., Alchanatis, V., and Dag, A. 2010. Whole-tree water balance and indicators for short-term drought stress in non-bearing 'Barnea' olives. *Agricultural Water Management*, in press .
70. Safren O., Alchanatis V., Ostrovsky V. and Levi O. (2007). Detection of Green Apples in Hyperspectral Images of Apple-Tree Foliage Using Machine Vision. *Transactions of the ASABE* 50(6): 2303-2313
71. Sharabani, G., Shtienberg, D., Elad, Y. and Dinoor, A. (1999) Epidemiology of *Botrytis cinerea* in sweet basil and implications for disease management. *Plant Disease* 83:554-560.
72. Shenderey C., Shmulevich I., Alchanatis, V., Egozi, H., Hoffman, A., Ostrovsky, V., Lurie, S., Ben Arie, R. and Schmilovitch, Z. (2010). NIRS detection of Moldy Core in Apples. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1): 79-86, doi: 10.1007/s11947-009-0256-1
73. Shoshany M., Almog O. and Alchanatis, V. (2009). Wavelet decomposition for reducing flux density effects on hyperspectral classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(1): 38-41.
74. Shtienberg, D. and Elad, Y. (1997) Incorporation of weather forecasting in integrated, biological-chemical management of *Botrytis cinerea*. *Phytopathology* 87:332-340.
75. Shtienberg, D., Elad, Y., Niv, A., Nitzani, Y. and Kirshner, B. (1998) Significance of leaf infection by *Botrytis cinerea* in stem rotting of tomatoes grown in non-heated greenhouses. *European Journal of Plant Pathology* 104:753-763.
76. Spiegel, S., Sobolov, I., Dombrovsky, A., Gera, A., Raccach, B., Tam, Y., Beckelman, Y., Antignus, Y. (2008). Partial molecular characterization of a Peanut mottle virus isolate infecting groundnut. *Phytoparasitica* 36(2):168-174.
77. Wachs, J. P., Stern, H. I., Burks, T. and V. Alchanatis (2010). Low and high level visual feature based apple detection from multi-modal images. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-010-9198-x
78. Zion B., A. Bechar, R. Regev, N. Shamir, A. Weissblum, Y. Zipori and A. Dag (2010). Mechanical olives harvest- operations study. *Israeli Journal of Horticultural Science* (In press).
79. Zion B., Alchanatis V., and Ostrovsky, V. (2007). Real-time underwater sorting of edible fish species. *Computers and Electronics in Agriculture* 56 (1): 34-4

7. מקורות מימון

לא הוגשה בקשה ולא התקבל מימון מאף גורם עד כה לנושא זה.

8. שבתון/גמלאות

החוקרים אינם אמורים לצאת לשבתון או לגמלאות.

9. התייחסות להערות ועדת ההיגוי

על פי המלצות ועדת ההיגוי וחוות דעתה, מירב הזמן הוקדש לפיתוח מערכת הניטור ולוחות הזמנים הקשורים למערכת הניטור בתוכנית המחקר הוקדמו. כמו כן, כפי שצויין בתוכנית המחקר, במידת האפשר יתבצע שימוש במידע שנוצר ובטכנולוגיה שפותחה במחקרים דומים בהם שותפים החוקרים, כגון מערכת ריסוס אוטונומית לפלפל בבתי צמיחה, ובמערכות או תתי מערכות קיימות תוך התאמות או כמוצר מדף בכדי לזרז את זמני הפיתוח הפלפורמה האוטונומית ולרכז מאמצים במכלולים אשר אינם קיימים.

10. רשימת מקורות

1. אלעד י. 1998. בוטריטיס. בספר מחלות צמחים בישראל, רותם י, פלטי י ובן יפת י (עורכים), הוצאת

מינהל המחקר החקלאי. ע' 257-267

2. Alchanatis, V., A. Hetzroni, Y. Edan. 2001. A multispectral imaging sensor for site-specific application of chemicals. *Acta Horticulturae* 562: 119-128.
3. Bechar, A. (2010). Automation and robotic in horticultural field production. *Stewart Postharvest Review* 6(3): 1-11. (invited review).
4. Beers, E. H., and Jones, V. P. (2004). Fixed precision sampling plans for white apple leafhopper (Homoptera : Cicadellidae) on apple. *Journal of Economic Entomology* 97, 1752-1755.
5. Bekey G. 2005. *Autonomous Robots: From Biological Inspiration To Implementation And Control*. The MIT Press.
6. Bell, T. 2000. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1-2): 53-66.
7. Canning, B. J. R. D. B, Edwards, M. J. Anderson. 2004. Development of a Fuzzy Logic Controller for Autonomous Forest Path Navigation. *Transactions of the ASAE Vol. 47(1)*: 301-310
8. Cabrera C, A., Suris C, M., Guerra B, W., and Nico P, D. E. (2005). Fixed precision level sequential sampling for Thrips palmi (Thysanoptera: Thripidae) on potato. *Revista Colombiana de Entomologia* 31, 37-42.
9. Chaerle L and Van Der Straeten D. 2000. Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in Plant Science* 5:495-501.
10. Chaerle, L., Pineda, M., Romero-Aranda, R., Van Der Straeten, D., and Baron, M. (2006). Robotized thermal and chlorophyll fluorescence imaging of pepper mild mottle virus infection in *Nicotiana benthamiana*. *Plant and Cell Physiology* 47, 1323-1336.
11. Chaerle L, Leinonen I, Jones HG and Van Der Straeten D. 2007. Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *Journal of Experimental Botany* 58:773-784.
12. Chen, S. Tojo, K. Watanabe. 2003. Machine Vision Based Guidance System for Automatic Rice Transplanters. *Applied Engineering in Agriculture Vol. 19(1)*: 91-97.
13. Demmel MR, Ehrl M, Rothmund M, Spangler A and Auernhammer H, 2002. Automated Process Data Acquisition with GPS and Standardized Communication - The Basis for Agricultural Production Traceability., *ASAE 2002 Paper No. 02-3013*.
14. Downey D, Giles DK and Slaughter DC. Weeds accurately mapped using DGPS and ground-based vision identification. *California Agriculture* 2004: 58:218-221.
15. Elad, Y., Messika, Y., Brand, M., Rav David, D. and Sztejnberg, A. (2007) Microclimate effect on *Leveillula taurica* powdery mildew of sweet pepper. *Phytopathology* 97:813-824.
16. Guo LS and Zhang Q. Wireless data fusion system for agricultural vehicle positioning. *Biosystems Engineering* 2005: 91:261-269.
17. Griepentrog HW, Norremark M, Nielsen H and Blackmore BS. Seed mapping of sugar beet. *Precision Agriculture* 2005: 6:157-165.
18. Halachmi, I., J. H. M. Metz, A. van't Land, S. Halachmi, J. P. C. Kleijnen. 2002. Case Study: Optimal Facility Allocation in a Robotic Milking Barn. *Transactions of the ASAE Vol. 45(5)*: 1539-1546
19. Hannan M. W., & Burks T.F. 2004. "Current developments in robotic harvesting of citrus". *ASAE/CSAE Annual International Meeting*, Paper No. 043087

20. Hong Young, J., T. Lei, G. Tony, B. Loren, and H. Aaron. 2009. Plant Specific Direct Chemical Application Field Robot 2009 ASABE Annual International Meeting. ASABE, Nevada.
21. Iida, M., K. Furube, K. Namikawa, M. Umeda. 1996. Development of watermelon harvesting gripper. *Journal of JSAM*, 58(3):19-26.
22. Jain, N., Ray, S. S., Singh, J. P., and Panigrahy, S. 2007. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agriculture*, 8, 225–239.
23. Keicher, R and H. Seufert. 2000. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture* 25(1): 169-194.
24. Khot, L. R. , L. Tang, S. B. Blackmore, M. Nørremark. 2006. Navigational Context Recognition for an Autonomous Robot in a Simulated Tree Plantation. *Transactions of the ASABE* Vol. 49(5): 1579-1588
25. Liu, L., T. Crowe, and M. Roberge. 2009. Sensor-based scouting algorithms for automatic sampling tasks in rough and large unstructured agricultural fields. *Transactions of the ASABE* 52:285-294.
26. Madeira, A.C., and A. De Varennes. 2005. Use of chlorophyll meter to assess the effect of nitrogen on sweet pepper development and growth. *Journal of Plant Nutrition* 28:1133-1144.
27. Oriolo G., Ulivi G. and Vendittelli M. 1998. Real-Time Map Building and Navigation for Autonomous Robots in Unknown Environments. *IEEE trans. Sys. Man cyber.* 28(3): 316-333.
28. Pilarski, T., M. Happold, H. Pangels, M. Ollis, K. Fitzpatrick, and A. Stentz. 2002. The Demeter system for automated harvesting. *Autonomous Robots* 13: 19-20.
29. Schueller, J.K. 2006. Automation and control. Chapter 4, pp. 184-195, in *CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology*. Edited by CIGR – The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE.
30. Sivaraman, B. and T. F. Burks. 2006. Geometric Performance Indices for Analysis and Synthesis of Manipulators for Robotic Harvesting. *Transactions of the ASABE* Vol. 49(5): 1589-1597.
31. Stentz, A. 2001. Robotic technologies for outdoor industrial vehicles, SPIE Aerosense 2002 Conference.
32. Tsubota, R. Noguchi, N. Mizushima, A. 2004. Automatic Guidance With A Laser Scanner For A Robot Tractor In An orchard. *Automation Technology for Off-Road Equipment*, Conference Proceedings, Kyoto, Japan.
33. Van Henten, E.J., J. Hemming, B.A.J. van Tuijl, J.G. Kornet, J. Meuleman, J. Bontsema and E.A. van Os. 2001. An Autonomous Robot for Harvesting Cucumbers in Greenhouses. *Autonomous Robots*. 13(3): 241-258.
34. Vincini, M., & Frazzi, E. 2009. Sensitivity of narrow and broad-band vegetation indices to leaf chlorophyll concentration in planophile crops canopies. In: E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst (eds.), *Precision agriculture '09* (pp. 39–45). Wageningen, The Netherlands. Wageningen Academic Publishers .
35. Wetter, C., Conti, M., Altchuh, D., Tabillion, R., and van Regenmortel, M. H. V. (1984). Pepper mild mottle virus a tobamovirus infecting pepper cultivars in Sicily. *Phytopathology* 74, 405-410.