

Developing a precision agriculture and site specific weed management strategy in cotton based on time spatial model

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ע"י:

חנן איזנברג, ויקטור אלחנתי ויפית כהן

בהשתתפות: טל נעמת ורועי עפרון

מנהל המחקר החקלאי, נווה יער – מרכז מחקר צפון

אייר תש"ע, אפריל 2010

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

חן איזנברג

חתימת החוקר

תקציר

הצגת הבעיה: גומא הפקעים מהווה את אחד מהעשבים הקשים להדברה בירקות וגידולי שדה, ובכותנה בפרט. חקלאות מדייקת הינה גישה הדוגלת בהתאמת כלל התשומות לצרכים בהתאם לשונות המרחבית והעתית בשדה. עיקרון זה מציע דרך טובה יותר למגדלים וידידותית לסביבה מכיוון שיישום ממוקד של תכשירי הריסוס רק במקומות בהם מזוהים העשבים מוביל לירידה משמעותית בכמות המיושמת, בעלויות ובהשפעות השליליות שלהם על הסביבה. ריסוס בררני של קוטלי עשבים מחייב זיהוי אוטומטי והערכת צפיפות העשבים בשדה. **מטרות המחקר:** המטרה ארוכת הטווח של מחקר זה היא לפתח גישה מושכלת, במסגרת התפיסה הכוללת של חקלאות מדייקת, להתמודדות עם גומא הפקעים בכותנה החידוש המוצע בתכנית זו הוא שילוב שתי גישות הניזונות זו מזו ותומכות זו בזו. האחת מטפלת בקביעת הזמן המיטבי להדברה במינון מופחת והשנייה מטפלת בזיהוי המרחבי של תפוצת העשבים בשדה. המטרות הספציפיות של המחקר: (1) פיתוח מודל מבוסס תנאי סביבה לחיזוי הצצה והתפתחות של גומא הפקעים. (2) קביעת הזמן המיטבי להדברת גומא הפקעים בכותנה, על סמך המודל תלוי תנאי סביבה וסף הזיהוי על-פי מערכת הזיהוי והמיפוי המרחבי. (3) פיתוח מערכת לזיהוי הימצאות של גומא הפקעים ומצבם הפנולוגי ומיפוי מרחבי שלהם באמצעים אופטיים, ספקטראליים, ומידע פנולוגי תומך. (4) פיתוח מערכת תומכת החלטה שתשלב בין מטרות משנה 1-3 ותהווה בסיס למפת ביצוע ריסוס משתנה במרחב. **שיטות ומהלך העבודה:** פותח מודל תלוי גורמי סביבה להתפתחות גומא הפקעים בחלקיו התת קרקעיים והעל קרקעיים. המודל פותח בתנאים מבוקרים ובשדה. במקביל פותח מודל מבוסס ראייה ממוחשבת להפרדה בין עשב לגידול. המודל מבוסס על מאות אלפי תצלומים שנלקחו משדה כותנה מסחרי. **תוצאות עיקריות:** באמצעות השימוש באמצעי צילום זולים ופשוטים להפעלה פותח מודל המבוסס בעיקרו על ימי מעלה וקרינה (וכן גורמים נוספים). במקביל, על בסיס מודל הראייה הממוחשבת פותחה מערכת אוטומטית לסיווג עשבים וזיהויים בתוך שורות הכותנה. איחוד המודלים שיפר את דיוק במערכת. **מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות:** יש להתייחס לשני נושאים עיקריים לפני יישום התוצאות: (א) מאחר והמודל שפותח הוא תלוי גורמי סביבה ולפיכך דינאמי, יש לבצע אימות וכיול למודל על פני לפחות 3 שנים; (ב) יש לבנות מתקן ריסוס אוטומטי שיוזן ממערכת קבלת ההחלטות שפותחה.

1. מבוא ותיאור הבעיה

הטיפול המקובל נגד עשבים בכותנה הוא טיפול אחיד בשדה בריסוס קדם זריעה או קדם הצצה עם התכשירים כותגון (fluometuron), דיאורקס (diuron), טרפלן (trifluralin) ופרומטרין (prometryne) או טיפול אחר הצצה באמצעות קוטלי העשבים סטייפל (pyrithiobac) ואנווק (trifloxysulfuron). תכשירים אלו נשארים בקרקע זמן רב, ושימוש לא נכון עלול

לסכן את הגידולים העוקבים במחזור. התכשיר אנוק נמצא יעיל בהדברת טווח רחב של עשבים בכללם גומא הפקעים. פיתוח מודל אופטימיזציה לשימוש בתכשיר בכותנה יביא בהכרח להפחתת כמות החומר הנדרש לקטילה מירבית של העשב תוך כדי הגברת יעילות ההדברה. מודלים דומים פותחו בעבר בהצלחה להדברת עשבים אחרים. במרבית המקרים, המודלים מבוססים על מדידה כמותית של תנאי הסביבה. קיימות גישות שונות לפיתוח מודל לחיזוי הצצת עשבים. גישה אחת משתמשת בשלבי הנביטה השונים (כמו תרדמה, נביטה, צימוח תת קרקעי והצצה), לפיתוח מודל פרטני (6). עבודות רבות המבוססות על גישה זו הראו כי קיים קשר בין זמן או ימי מעלה לבין הצצת עשבים. הקשר בין הצצת זרעים שאינם בתרדמה לבין הנביטה אופיין ע"י עקום סיגמואידי (10,14). גישה נוספת היא הגישה האמפירית הבנויה על זיהוי מתאם בין מרכיבים שונים בתנאי הסביבה לבין נביטת העשבים (3,6).

חקלאות מדייקת הינה גישה הדוגלת בהתאמת כלל התשומות לצרכים בהתאם לשונות המרחבית והעתית בשדה. עיקרון זה מציע דרך טובה יותר למגדלים וידידותית לסביבה מכיוון שיישום ממוקד של תכשירי הריסוס רק במקומות בהם מזוהים העשבים מוביל לירידה משמעותית בכמות המיושמת, בעלויות ובהשפעות השליליות שלהם על הסביבה. ריסוס סלקטיבי של הרביצידים מחייב זיהוי אוטומטי והערכת צפיפות העשבים בשדה (11). קיימות מספר שיטות לזיהוי אוטומטי של עשבים, חלקם מבוסס על ראייה ממוחשבת וחלקם על שיטות ספקטרוסקופיות (4,5,13). שיטות ראייה ממוחשבת מתבססות על ניתוח תמונות דיגיטליות וחישוב תכונות גיאומטריות, תכונות מירקם (texture) או תכונות סטטיסטיות אחרות המשמשות לזיהוי העשבים. שיטות ספקטרוסקופיות מנצלות את ספקטרום האור החוזר או הנבלע בעלים על מנת לאפשר הפרדה בין עשבים לבין הגידול.

במחקרים אחדים הראו שבאמצעות בחירת ערוצים ספציפיים באור הנראה ובאינפרא אדום קרוב (Nir Infra Red – NIR), ושילובם עם מאפיינים סטטיסטיים של התמונה ניתן לזהות את הגידול ואת העשבים (1). כל העבודות האלה מראות שניתן לזהות עשבים בשדה באמצעות ניתוח תמונה, אך קשה להפריד בין סוגים שונים של עשבים. על מנת להתגבר על השונות בצורת העשבים אנו מציעים לשלב מידע לגבי המצב הפנולוגי של סוגי העשבים במועד האבחון והריסוס ובעקבות זאת לצמצם את מרחב החיפוש הצורני של מערכת הזיהוי במטרה להגדיל בצורה משמעותית את הדיוק. מידע פנולוגי מסוג זה יכול להתקבל באמצעות מודל תלוי גורמי סביבה לחיזוי מופע העשבים.

במסגרת המחקר הצענו גישה כוללת המשלבת בין מודלים ביולוגים לקביעת התקופה הקריטית להדברת גומא הפקעים בשדות כותנה לבין מודלים של זיהוי וחישה שיעזרו לקבוע את המועד המיטבי לביצוע החישה ולריסוס. פיתוח מודל משולב צפוי לאפשר ביצוע הדברה ממוקדת ומדויקת ובכך לשפר את איכות ההדברה ולהביא להפחתת כמויות קוטלי העשבים.

2. מטרות המחקר

מטרות המחקר: המטרה ארוכת הטווח של מחקר זה היא לפתח גישה מושכלת, במסגרת התפיסה הכוללת של חקלאות מדייקת, להתמודדות עם גומא הפקעים בכותנה. החידוש המוצע בתכנית זו הוא שילוב שתי גישות הניזונות זו מזו ותומכות זו בזו. האחת מטפלת בקביעת הזמן המיטבי להדברה במינון מופחת והשניה מטפלת בזיהוי המרחבי של תפוצת העשבים בשדה. המטרות הספציפיות של המחקר: (1) פיתוח מודל מבוסס תנאי סביבה לחיזוי הצצה והתפתחות של גומא הפקעים. (2) קביעת הזמן המיטבי להדברת גומא הפקעים בכותנה, על סמך המודל המבוסס על תנאי סביבה ומערכת הזיהוי והמיפוי המרחבי. (3) פיתוח מערכת לזיהוי הימצאות של גומא הפקעים ומצבם הפנולוגי ומיפוי מרחבי שלהם באמצעים אופטיים, ספקטראליים, ומידע פנולוגי תומך. (4) פיתוח מערכת תומכת החלטה שתשלב בין מטרות משנה 1-3 ותהווה בסיס למפת ביצוע ריסוס משתנה במרחב.

מטרות 1-2. פיתוח מודל תלוי תנאי סביבה להתפתחות גומא הפקעים

על מנת לפתח מודל לחיזוי התפתחות גומא הפקעים תלוי גורמי סביבה נבחן המתאם בין שלבי התפתחות שונים לגורמי הסביבה הבאים: (א) טמפרטורה, (ב) קרינה, (ג) ייבוש פקעים, (ד) רטיבות קרקע, (ה) מליחות ו (ו) עומק הימצאות הפקעים בקרקע. התפתחות גומא הפקעים סווגה לשלבי התפתחות תת קרקעיים ועל קרקעיים. שלבי ההתפתחות התת-קרקעית סווגו מראש לארבעה שלבים: (S_0) טרום לבלוב; (S_1) לבלוב פקעות; (S_2) הצצת הנצר; (S_3) ייצור פקעות וצבירת ביומסה. שלב ייצור הביומסה העל קרקעי סווג כשלב (S_4). פיתוח המודל התבצע באמצעות איתור גורמי הסביבה המרכזיים המשפיעים על כל שלב ושלב, כימות השפעתם ושילובם במודל החיזוי. בדוח זה נדווח על כל ההקשרים המתמטיים בין גורמי הסביבה השונים להתפתחות, בתרשים מסכם (איור 3), אך נתמקד בשני גורמים עיקריים המשפיעים על התפתחות הגומא, ובעלי חשיבות גם בהקשר של המודל שפותח לזיהוי גומא הפקעים באמצעים של ראייה ממוחשבת, שהם טמפרטורה וקרינה

מטרה 2. היתה אופטימיזציה למינון המינימאלי של אנוק שמדביר ביעילות את גומא הפקעים. בגלל הגבלת אורך הדו"ח, לא נפרט את השיטה, אך התוצאות מצביעות על כך שמינון 0.5 ג/דונם אנוק מדביר ביעילות עלוות גומא הפקעים בצפיפות של 30-50 נצרים למ"ר. בצפיפות גבוהה מכך דרוש מינון של 1 ג/דונם אנוק.

חומרים ושיטות:**חישוב ימי מעלה:**

נתוני טמפרטורת הקרקע שנמדדו היוו הבסיס לחישוב הצטברות ימי המעלה (GDD). סך ימי המעלה שהצטברו ביום n חושב בנוסחה על פי (9):

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) - T_{base} \right)$$

כאשר T_{max} היא טמפרטורת המקסימום היומית ($^{\circ}C$), T_{min} היא טמפרטורת המינימום היומית ($^{\circ}C$), T_{base} היא טמפרטורת הבסיס אשר מתחתיה נפסקים תהליכי הגדילה ו- n הוא מספר הימים. בעבודה זו, טמפרטורת הבסיס הייתה $10^{\circ}C$ וטמפרטורות הגבוהות מ- $43^{\circ}C$ לא חושבו (7).

חישוב ימי מעלה אפקטיביים (Effective Degree Days):

קריאות עוצמת הקרינה הגלובלית שהתקבלו מתחנת השירות המטאורולוגי היו על בסיס שיעור ביחידות של $watt/m^2 \cdot sec$. חישוב קרינה פעילה פוטוסינתטית יומית (PAR, 400-700nm, ביחידות של $MJ/m^2 \cdot day$) נעשה עפ"י הנוסחה:

$$PAR = \sum_{i=1}^{n=24} \left(\left(\frac{GI \times 3600}{10^6} \right) \times 0.45 \right)$$

כאשר n הוא מספר המדידות ביום, GI היא מדידת הקרינה הגלובלית, הכפלה ב- 3600 על מנת לקבל את עוצמת הקרינה השעתית, חלוקה ב- 10^6 לעבור מיחידות של J ל- MJ ו- 0.45 הוא הפקטור לקבלת היחס של ה- PAR מתוך סך הקרינה הגלובלית (8,12).

חישוב הקרינה הפעילה פוטוסינטטית המצטברת (CPAR, ביחידות של MJ/m^2) נעשה עפ"י הנוסחה:

$$CPAR = \sum_{i=1}^n (PAR)$$

כאשר n הוא מספר הימים ו- PAR היא הקרינה הפעילה פוטוסינטטית היומית.

נתוני טמפרטורת הקרקע ועוצמת הקרינה היוו הבסיס לחישוב הצטברות ימי המעלה האפקטיביים. סך ימי המעלה האפקטיביים שהצטברו ביום n חושב בנוסחה על פי (2):

$$EDD^{-1} = GDD^{-1} + f \times CPAR^{-1}$$

כאשר f הוא פקטור אמפירי המתאר את מאפייני הגדילה של גומא הפקעים במודל הפוטו-תרמלי. ערך פקטור זה במודל גדילה שנתי של גומא הפקעים הוא 0.62. ערך זה הושג בצורה אמפירית במהלך ביצוע המחקר.

תוצאות

סיכום הקשרים בין תנאי הסביבה שנבחנו להתפתחות גומא הפקעים ניתן לראות באיור 3. עוד בטרם מתרחש הבלבול, בשלב S_0 , לטמפרטורה ולתכולת הרטיבות בפקעות השפעה משמעותית על חיוניותן. נמצא כי משך החשיפה לייבוש בתקופת טרום הבלבול הינו גורם בעל השפעה מובהקת על חיוניות הפקעות. ככל שטמפרטורת הקרקע הייתה גבוהה יותר, כך פחתה החיוניות מהר יותר. במטרה לכמת את ההשפעה המשולבת של הטמפרטורה ומשך הייבוש, שני גורמים אלה אוחדו באמצעות המרתם ליחידות של ימי מעלה (GDD). נמצא כי ניתן לייחס לצבירת ימי מעלה השפעה מובהקת על חיוניות הפקעות וביניהם מתקבל קשר סיגמואידלי שלילי.

כמו כן, נבדקה השפעתם של מספר גורמי סביבה נוספים על לבלוב פקעות גומא הפקעים (שלב S_1). מבין הגורמים שנבחנו נמצא כי לטמפרטורה השפעה משמעותית על לבלוב פקעות. גם במקרה זה נעשה שימוש ביחידות של ימי מעלה. בתנאים מבוקרים נמצא קשר מובהק בין ימי מעלה ולבלוב והוא מתוארבאמצעות משוואה סיגמואידית. משוואת החיזוי שהתקבלה אומתה בניסויים בתנאים לא מבוקרים ונמצא כי משוואה זו חוזה בדיוק רב את הקשר בין צבירת ימי מעלה ובין לבלוב פקעות. עוד נמצא כי למליחות תמיסת הגידול השפעה על לבלוב פקעות גומא הפקעים. עם העלאת ריכוז הנתרן הכלורי בתמיסת הגידול פחת שיעור לבלוב הפקעות. נמצא קשר סיגמואידלי שלילי בין המוליכות החשמלית של תמיסת הגידול ושיעור הבלבול. באמצעות קשר זה ניתן לצפות את שיעור הבלבול על סמך מדידת המוליכות בתמיסת הקרקע.

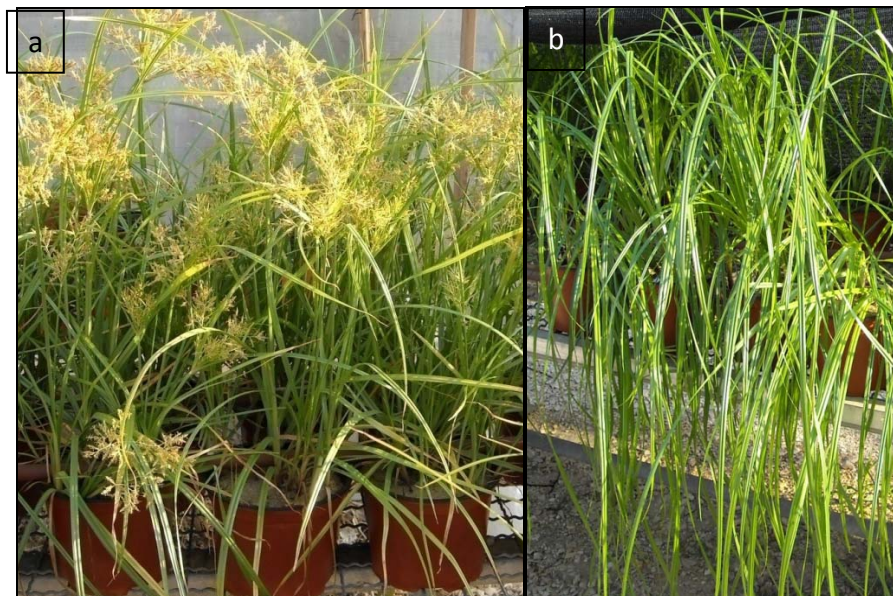
בעבודה זו נמצא כי לעומק הטמנת הפקעת השפעה משמעותית על מועד הצצת הנצר (שלב S_2) אך לא על יכולתו להציץ. ככל שהעומק היה רב יותר, משך ההצצה התארך. את מועד ההצצה כתלות בעומק ההטמנה ניתן למדוד בימי מעלה והוא מתואר ע"י נוסחה אקספוננציאלית.

עוד נמצא כי גם לתכולת הרטיבות בקרקע השפעה ישירה על התפתחות ממושכת של גומא הפקעים. יכולת צבירת הביומסה וייצור הפקעות של הצמחים נפגעת בתכולת רטיבות מינימאלית (MWC) נמוכה (פחות מ- 20% מקיבול שדה). ניתן לתאר קשר זה באמצעות רגרסיה ליניארית. בנוסף, נראה כי למליחות תמיסת הגידול השפעה ניכרת על צבירת ביומסה וייצור פקעות. התפתחות הצמחים נפגעה ברמות מליחות גבוהות. הקשר מתואר על ידי מישור בי-קוודראטי, תלוי ימי מעלה אפקטיביים ומוליכות חשמלית של התמיסה.

בבחינת הגורמים המשפיעים על יצירת פקעות וצבירת ביומסה בגומא הפקעים (שלב S_3), נמצא כי לעוצמת הקרינה השפעה ניכרת על פרמטרי הגדילה שנבחנו. באיור 2 ניתן לראות דוגמה לשיטה בה נותחו התוצאות, לטובת מידול הקשר בין טמפרטורה-קרינה, להתפתחות הגומא. את השפעת עוצמת הקרינה על התפתחות העשב ניתן לאפיין באמצעות חישוב צבירת ימי מעלה אפקטיביים (EDD). פרמטר זה משלב בתוכו הן את מדידת הטמפרטורות היומיות והן את הקרינה

היומית. כימות השפעות אלו באמצעות שימוש בימי מעלה אפקטיביים הניב קשר המתואר באמצעות נוסחה אקספוננציאלית ובאמצעותו ניתן לחזות את מועד תחילת שלב S_3 .

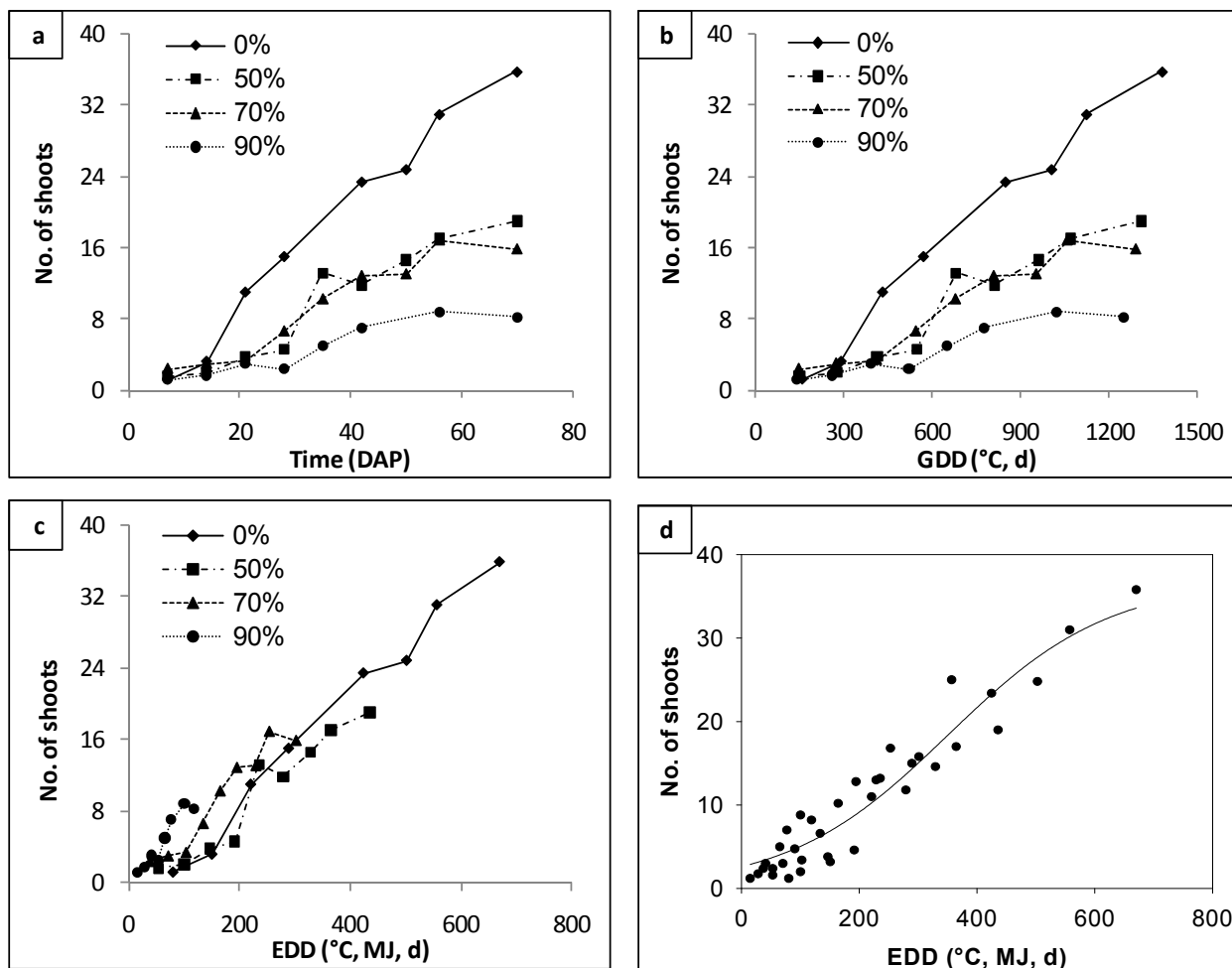
לעוצמת הקרינה השפעה מובהקת על מספר הנצרים לאורך הזמן הכרונולוגי (איור 2a). ככל שדרגת ההצללה הייתה גבוהה יותר, כך העלייה במספר הנצרים לאורך תקופת הניסוי הייתה פחות אינטנסיבית. בנוסף, הצמחים ששהו תחת הצללה חזקה יותר היו גבוהים יותר, נראו אטיוולנטים והתאפיינו בעלים ארוכים מאוד, בד"כ פי שתיים מצמחי הביקורת. לקראת סיום הניסוי אורכם אף עלה על מטר אחד (תמונה 1).



תמונה 1. צמחי גומא הפקעים בטיפול 0% הצללה (ביקורת) (a) ובטיפול 90% הצללה (b), 42 ימים משתילה.

פיתוח המשוואה (דוגמא לפרוצדורה בה השתמשנו לכימות מרבית הגורמים שנבחנו):

את מהלך פיתוח המשוואה ניתן לראות באיורים (a-d) 1. בתחילה נלקחה בחשבון אך ורק הזמן הכרונולוגי (איור 1a) בשלב שני צבירת ימי המעלה (איור 1b). תיאור השפעת עוצמות הקרינה שנבחנו על מאפייני הגדילה השונים על ציר זמן של ימי מעלה מספק הבנה לגבי הדינאמיקה ההתפתחותית של גומא הפקעים כתלות בטמפרטורת הסביבה. עם זאת, מעיבוד של נתונים זה עדיין לא ניתן להסיק כיצד יתפתח צמח שאינו נתון לאחת מרמות ההצללה שנבדקו. לשם כך נדרש עיבוד נוסף לנתונים אשר יאפשר גם את כימות אפקט הקרינה. על מנת לחשב ימי מעלה אפקטיביים יש לקחת בחשבון הן את השפעת הטמפרטורות היומיות והן את השפעת הקרינה היומית. ניתן לראות כי באופן זה ארבעת העקומים מתאחדים בקירוב לכדי עקום אחד (איור 1c). את העקום הנ"ל ניתן לתאר באמצעות רגרסיה סיגמואידית בעלת משוואה ספציפית (איור 1d).



איור 1. השפעת רמת ההצללה על מספר הנצרים בגומא הפקעים. הנתונים מוצגים על ציר זמן כרונולוגי (a), על ציר של ימי מעלה ($T_{base}=10$) (b) או על ציר של ימי מעלה אפקטיביים (c). השוואת ממוצעים נבחנה במבחן Tukey HSD (p<0.05) בנייתוח היררכי, $SED=2.28$; הקשר בין ימי מעלה אפקטיביים ומספר הנצרים מוצג ע"י רגרסיה לא-ליניארית (משוואה מס' 1). $p<0.0001$, $R^2=0.91$; $x_0=351.26$, $b=136.45$, $a=36.83$. (d)

סיכום:

במודל החיזוי משולבים הקשרים בעלי ההשפעה המרכזית על ההתפתחות הקרקעית של גומא הפקעים. ניתן לסכם מודל זה באמצעות מספר משוואות. כימות האינטראקציות השונות על ציר זמן של ימי מעלה או ימי מעלה אפקטיביים מאפשר שיפור ההדברה של העשב. כימות האינטראקציה בין הטמפרטורה והזמן בתקופת טרום הבלבול מאפשרת למצוא את הסף הרצוי על מנת לאפשר הדברה מכאנית יעילה של העשב. כמו כן, לכימות מועד הבלבול ומועד ההצצה חשיבות רבה כאשר ברצוננו להשיג הדברה אופטימאלית אשר פוגעת במרבית הנצרים ומאפשרת השגת יתרון תחרותי לצמחי הגידול. ולבסוף, קביעת תחילת שלב ייצור הפקעות המאסיבי על ציר זמן של ימי מעלה אפקטיביים קריטי לתזמון אופטימאלי של חישת העשבים ונקיטת אמצעי הדברה.

עם זאת, חשוב להזכיר כי מודל זה פותח בעיקר על סמך ניסויים בתנאים מבוקרים וכן מרבית נוסחאות המודל אינן מציגות אינטראקציות בין הגורמים. על כן יש לבחון ולאמת את משוואות המודל בתנאי שדה במשך מספר עונות גידול.

מטרות 3-4: פיתוח מערכת לזיהוי הימצאות של גומא הפקעים ומצבם הפנולוגי ומיפוי מרחבי שלהם באמצעים אופטיים, ספקטראליים, ומידע פנולוגי תומך. פיתוח מערכת תומכת החלטה שתשלב בין מטרות משנה 1-3 ותהווה בסיס למפת ביצוע ריסוס משתנה במרחב.

בחלק זה של תכנית המחקר הרעיון המרכזי היה לבצע הפרדה בין עשב לגידול בעלות נמוכה אך יעילה, להפקת 'מפת עשבים' שתשמש ליישום קוטלי עשבים בצורה מדויקת כאשר בשלב מתקדם יותר ניתן יהיה לרסס תוך כדי צילום. הגישה החדשה המוצעת כאן כוללת שילוב של מידע ביולוגי מתוך מודל המבוסס על תנאי סביבה (שהוצג בחלק הראשוני של הדו"ח) לתוך אלגוריתמים של עיבוד תמונה. מידע זה כולל את שטח העלווה הצפוי של העשב והמרחק הצפוי בין פקעיות הצמח. המערכת המוצעת בנויה ממצלמת RGB פשוטה, המורכבת על מוט הריסוס של טרקטור ומחוברת למחשב. המידע המגיע מן המצלמה הוא קובץ וידאו עם קצב של 7.5 תמונות לשנייה. התמונות מחולצות מקובץ זה ומנותחות בסביבת MatlabTM. המשך התהליך כולל החלת אינדקסים שונים של צמחייה באמצעות ערוצי ה-RGB, הפרדה של האובייקטים בתמונה באמצעות הליכי עיבוד תמונה ומיון. תהליך המיון מתבסס על תכונות מורפולוגיות ומשלב את המידע ממודל ימי המעלה ונתונים מסדרת האימון. סידרת האימון משמשת את מנגנון הלמידה של המערכת המוזן מסווג ידני שנעשה ע"י המשתמש. התוצר של המערכת הוא 'מפת עשבים' מכוילת עם נתוני dGPS שנאספו בשלב רכישת התמונה. המידע שייאסף בכל שנה ישמר לתוך בסיס נתונים רב שנתי שישמש גם עבור עדכון מתמשך של מודל ימי המעלה. תוצאות הסיווג עברו הערכה באמצעות מטריצת בלבול והראו דיוק של יותר מ-90% ביכולת להפריד את העשבים מהכותנה. שילוב המידע מהמודל הביולוגי הראה פוטנציאל גבוה לשיפור תהליך המיון על אף היותו עדיין בשלב מחקר. המערכת נבנתה בצורה גמישה כך שניתן להתאימה לעבוד בסביבות שונות באמצעות בניית סדרות אימון שונים, החלפת או הוספת אינדקסים ושימוש בתכונות צורניות שונות לסיווג.

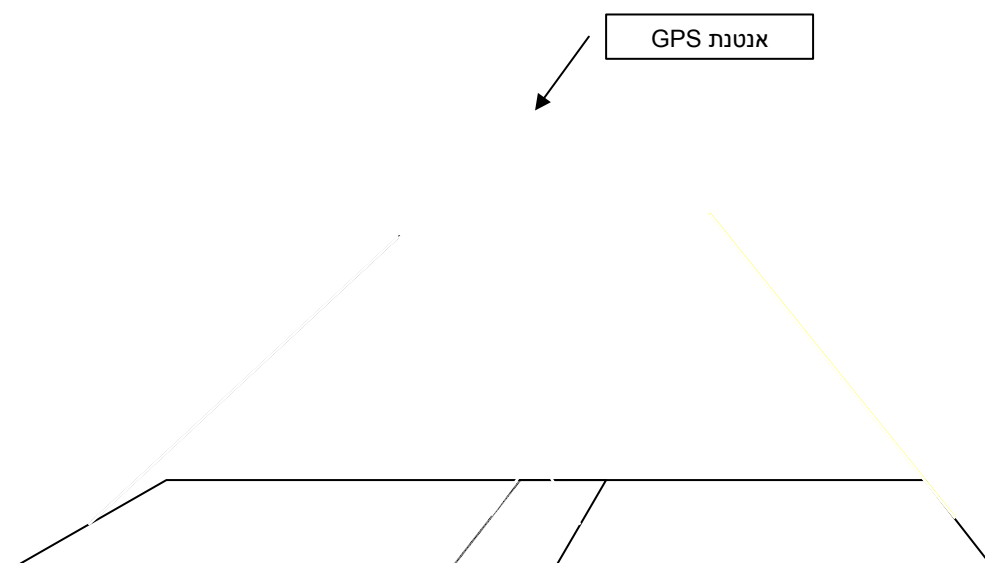
חלק זה של הדו"ח עוסק באיפיון האופטי והגיאומטרי ובפיענוחו והיעדים הספציפיים בעבודה זו הם:

- איפיון מערך צילום המתבסס על טכנולוגיות זמינות וזולות.
 - פיתוח אלגוריתם להפרדה בין הכותנה רחבת העלים לבין עשבי הבר צרי העלים. בשלב זה של המחקר ניתוח התמונה התבצע במעבדה מתוך הנחה שבעתיד יבוצע התהליך בזמן אמת תוך כדי נסיעה של הטרקטור.
 - פיתוח כלים ושיטות לשילוב מודל ימי-מעלה של התפתחות עשבים עם אלגוריתמי הזיהוי והערכת תרומתו לתהליך ההפרדה והזיהוי.
 - פיתוח מתודולוגיה ליצירת מפת עשבים על ידי שילוב המידע האופטי, הביולוגי והמרחבי הנאסף, בהתאמה, מהמצלמות ועיבוד תמונה, מודל ימי-המעלה וה-GPS.
- קו מנחה בעבודה זו היה ראיית הדברים באופן מעשי ופרקטי כך שהמוצר הסופי, שישען על תוצאות העבודה, יוכל להיות להוות כלי חקלאי מסחרי, שהשימוש בו הוא בעל הצדקה כלכלית לחקלאי. בהתאם לכך מצאנו לנכון להתבסס כבר מהשלב המחקרי על טכנולוגיה זולה, זמינה ופשוטה ככל הניתן. חזון המחקר הינו מערכת עצמאית ומודולרית שתדע לעבוד גם בזמן אמת (real-time) וגם בצורה מפוצלת (off-line). ככזאת, תורכב המערכת משלושה חלקים: החלק המצלם, החלק המעבד/ מנתח/ מחליט והחלק המבצע (מרסס). ההתייחסות במחקר זה הינה רק לשלבי הצילום ועיבוד הנתונים ואינה נוגעת בפעילות המרסס. הגישה שנבדקה ונבחנה במחקר זה היא כזו שמיועדת לעבודה מפוצלת, דהיינו, מעבר אחד של כלי חקלאי (טרקטור) על השדה למטרת צילום ואיסוף המידע, יצירת מפת עשבים והמלצות ליישום ומעבר נוסף ליישום. שיטת העבודה במחקר כללה שני חלקים. חלק אחד כלל שלושה ניסויי שדה שנערכו לאורך שלוש עונות גידול ובהם צולמו שלושה שדות כותנה שונים (טבלה 1). החלק השני כלל את עבודת המעבדה, ניתוח הנתונים ועיבודם, זאת על-ידי מערכת שפותחה במיוחד לצרכי המחקר שלנו. לאחר בחינה של אפשרויות נוספות לסביבת פיתוח ועבודה, תוך שימוש בכלים מסחריים ותוכנות קיימות לעיבוד תמונה (ENVI, ERDAS) הוחלט כי פיתוח המערכת יעשה על ידינו תוך שימוש בסביבת העבודה

של MATLAB. על אף שהחלטה זו גררה זמן פיתוח ארוך, יתרונותיה הברורים הם בגמישות מרבית בביצועי המערכת, שליטה על זמני עיבוד מתוך ראייה עתידית של פיתוח המערכת לעבודה בזמן-אמת ועלות כספית נמוכה יחסית. המערכת המוצעת בעבודה זו מחולקת לשלושה שלבים. סדר הפעולות ושיטת העבודה כפי שבוצעו ונבחנו מתואר איור 4. שלב א' הינו שלב רכישת התמונה (הצילום). שלב ב' הוא שלב הפעלת האינדקסים להפרדת הצמחייה מהרקע, עיבוד וניתוח התמונה. ושלב ג' הפקת התוצר, קרי – מפת עשבים/המלצות יישום. בבחינת ביצועי המערכת כפי שיתואר בהמשך, נבחנו ביצועי כל שלב בנפרד בנוסף לבחינת ביצועי המערכת כמכלול אחד. תחילתו של השלב הראשון הוא הצילום בשדה, וזה כאמור, התבצע במשך שלוש עונות של גידול כותנה. בכל עונה צולמו מספר רב של תמונות ומערך הצילום היה שונה במקצת בין העונות.

טבלה 1. סיכום מערכי הניסויים.

מספר ניסוי	תאריך	מיקום	מספר תמונות	פלטפורמה	תיאור
1.1	4-5-2006	גדי"ש לביא	700	4 מצלמות על מוט הריסוס	ניסוי כלים
2.1	10-5-2007	מכון וולקני	21,000	2 מצלמות USB על מוט הריסוס	ניסוי כלים
2.2	15-5-2007	גדי"ש אלונים 1	130,000	2 מצלמות USB על מוט הריסוס	צילום ערוגות 12
2.3	30-5-2007	גדי"ש אלונים 1	130,000	2 מצלמות USB על מוט הריסוס	צילום ערוגות 12
3.1	2-4-2008	גדי"ש אלונים 2	32,000	מצלמת USB אחת על מוט הריסוס	צילום ערוגות 6
3.2	7-5-2008	גדי"ש אלונים 2	700	צילום ידני ממוט מגביה	צילום ערוגות 6



איור 4. מיקום המצלמות על הטרקטור ושדה הראייה שלהן ניסוי 2.2



איור 5. מפת העשבים שהופקה בסוף תהליך עיבוד הנתונים של אלונים 2.2

בעבודה זו נבחן עשב המודל גומא הפקעים (*Cyperus rotundus*) שבעבורו פותח כאמור מודל התפתחות וזיהוי בתוך גידולי שורה של כותנה. יחד עם זאת, המערכת והאלגוריתם עליו היא מבוססת נבנו בצורה כזו שניתן להתאימם לגידולים אחרים תוך בניית סדרת אימון רלוונטית. האלגוריתם המוצע נבנה בצורה כזו שהוא נתמך על-ידי המודל הביולוגי תלוי תנאי סביבה ובעתיד גם יספק לו משוב, כך שעבודה רב עונתית עם המערכת תשפר הן את טיב המיון והן את מודל ימי המעלה. על מנת לאפשר שליטה מרבית בעבודת המערכת ולצמצם את התלות בגורמים ותוכנות חיצוניות, נבנה רוב התהליך בסביבת הפיתוח של MatLab™. שיקול נוסף בבניית המערכת היה פיתוח בעלות נמוכה, מתוך ראייה שמערכת מסחרית צריכה בראש ובראשונה להוות יתרון כלכלי לחקלאי. המצלמות איתן צולמו השדות החקלאיים היו פשוטות וזולות מן הסוג שמשמש ליישומי וידאו באינטרנט. יעד העבודה היה הפקת מפת עשבים שתוכל לשמש מפת יישום לריסוס סלקטיבי. מפה שכזו, כפי שהוצגה באיור 5. יכולה לשמש הן כמפת המלצה, מפת יישום או שכבה בבסיס נתונים רב שנתי על השדה. מהלך העבודה כלל צילומים בשדה, עיבוד התמונות במעבדה והפקת המפות. ביצועי המערכת נבחנו הן ברמות פרטניות של שלבי העיבוד והן ברמה הכוללת של טיב המיון. מטריצות בלבול הופקו לשלוש רמות של עבודה. אימות סדרת המיון, בדיקת מיפוי של שורת גידול השונה מסדרת המיון ובדיקה של שורה ממועד אחר. אחוזי דיוק של מעל 90% הושגו בבחינת מיון אובייקטים מתוך סדרת האימון בשיטת Leave-One-Out-Cross-Validation. בשורה מקבילה המערכת השיגה עד 78% דיוק ובבחינת המועד המאוחר מסדרת המיון הגיעה המערכת עד 69%. האלגוריתם שפותח בעבודה זו מראה, כי שילוב מידע ביולוגי בתהליכים של מיון וזיהוי אוטומאטי הינו משמעותי. בבחינת יכולתו הפוטנציאלית של המודל הביולוגי לתרומה הכוללת של התהליך נמצאו תחומי פרמטרים שבהם הטעות במיון הייתה נמוכה יחסית (קאפה גבוהה). משמע, המודל תרם לפתרון הדילמות בהם לא הייתה החלטה חד משמעית מהמיון הגיאומטרי. יש לזכור כי השימוש במודל הביולוגי אינו מהווה תחליף אלא משלים למיון הגיאומטרי. ולכן, השוואה של הצלחת המיון בין שני התהליכים איננה רלוונטית. יחד עם זאת, תיקופה של מערכת זו והערכת חלקו של המודל הביולוגי ותרומתם עדיין צריכים להיבדק במחקר המשכי ומתמשך.

המשך המחקר

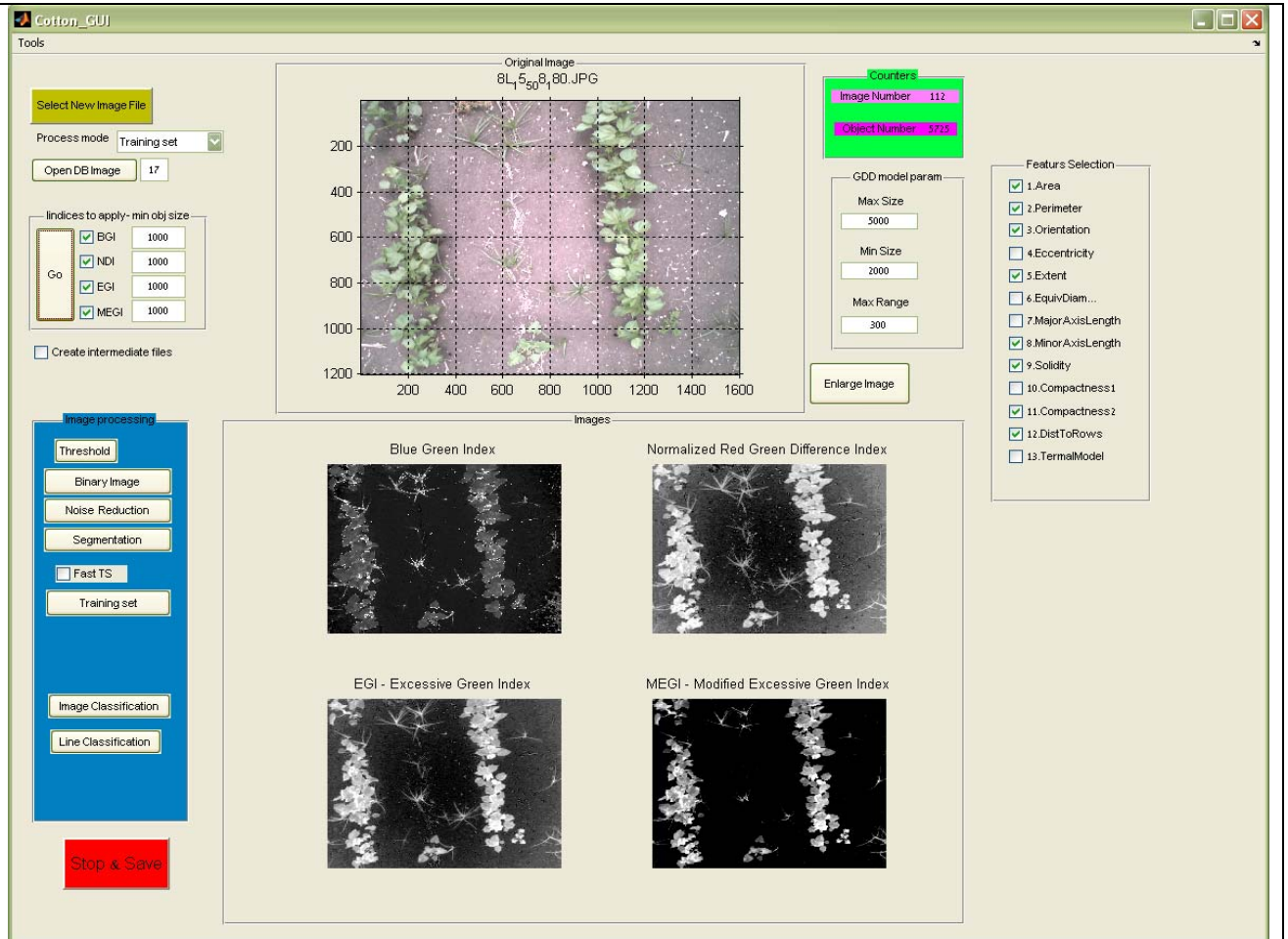
על מנת להמשיך ולשפר את המערכת מוצעות להלן מספר נקודות אליהן כדאי להתייחס במחקרים עתידיים. הכיוון הראשון הוא כאמור תיקוף של המערכת. על מנת להתאים את המערכת לסביבות פעולה נוספות יש ליצור מאגר של סדרות אימון, כאלה שיכללו תנאי תאורה משתנים, רקעים (קרקעות) שונים ושלבים פנולוגיים שונים של הגידול. מאגר זה יהווה את בסיס המידע של המערכת, וממנו יוכל המשתמש לבחור את סדרת האימון הרלוונטית לסביבת העבודה.

כיוון נוסף אליו צריכה המערכת לשאוף הוא עבודה בזמן אמת (Real Time). ריסוס בזמן אמת, ולא על בסיס מפה, מהווה חיסכון תפעולי משמעותי מאחר שהוא דורש רק מעבר אחד בשדה. הסבה של המערכת לעבודה בזמן אמת דורשת פיתוח בעוד מספר כיוונים. ראשית, צמצום של זמני החישוב על ידי שיפור האלגוריתם במידת האפשר. כתיבת התוכנה בשפה מעשית ומהירה יותר כגון C++\VB. ובנוסף, פיתוח הממשק בין אפליקציית הזיהוי לאפליקציית הריסוס.

הוראות הפעלה למערכת – User Manual

בפרק זה מוסברים ומפורטים שלבי העבודה והשימוש בממשק הגרפי (GUI) של המערכת.

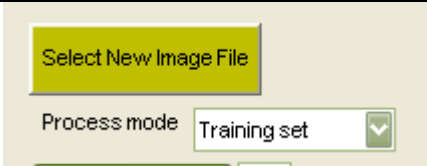
עם הפעלת התוכנה מוצג למשתמש חלון העבודה הראשי (איור) שבו מתבצעת רוב העבודה עם המערכת. למערכת זו ישנם שלושה מצבי פעולה אימון (Training set), ביצוע (On-line) והערכת ביצועים (Evaluation). בשלב ראשון נדרש המשתמש לבחור את מצב הפעולה (Process mode).

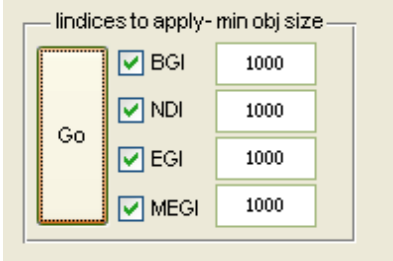
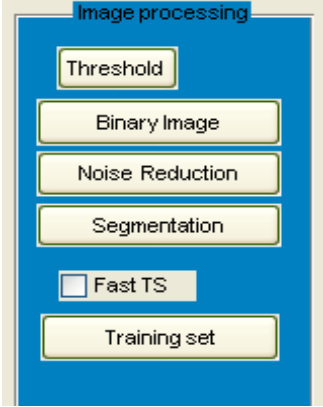


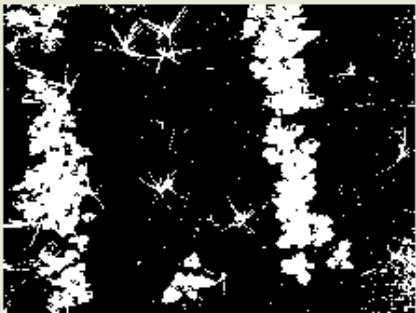
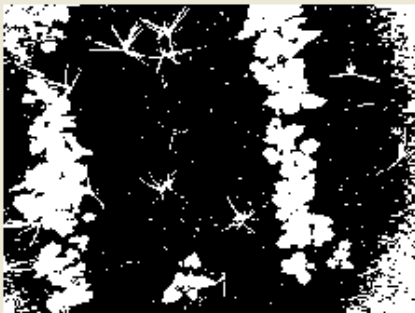
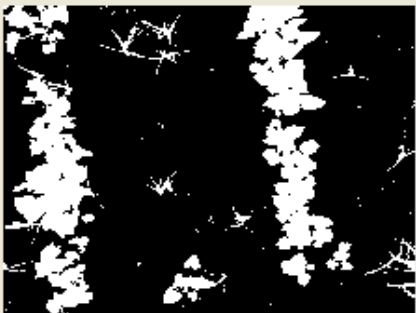
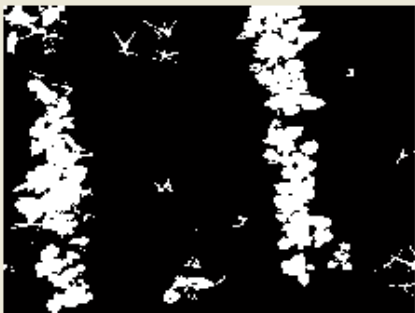
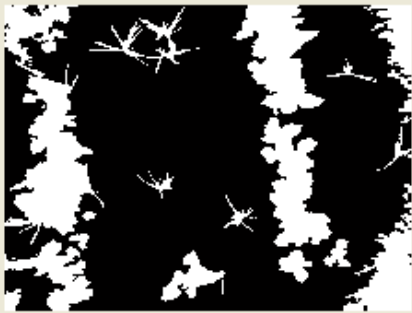
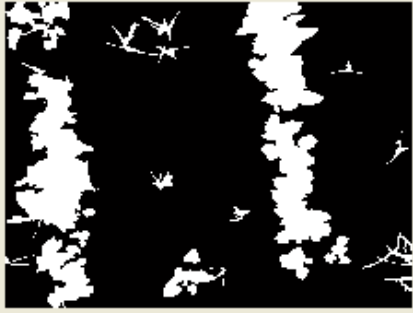
איור 6. – ממשק המשתמש הראשי

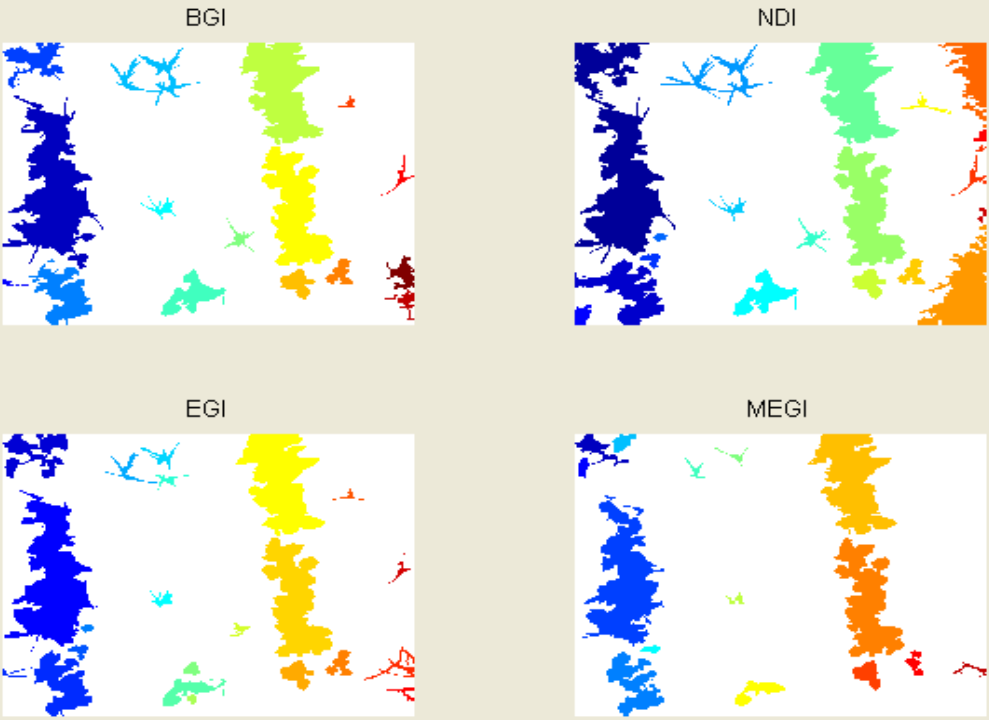
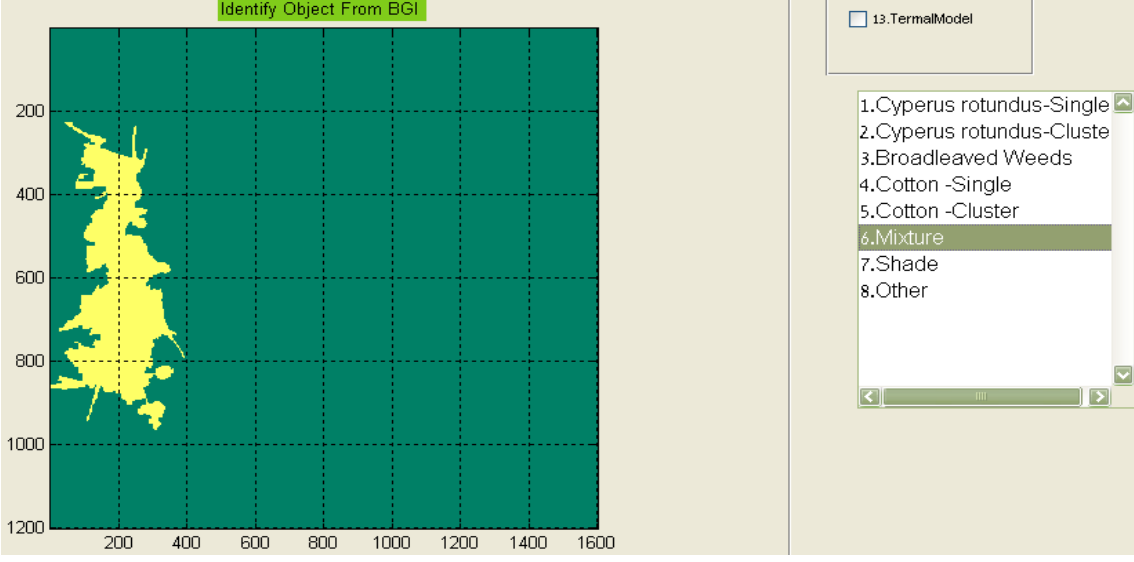
עבודה במצב אימון (Training set).

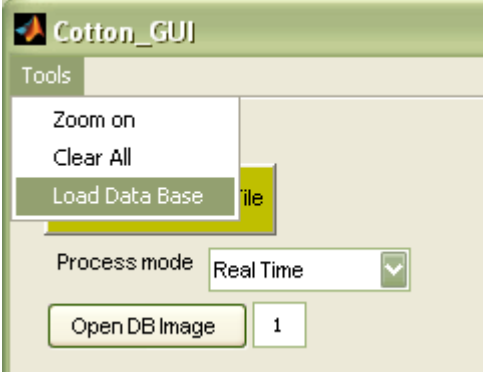
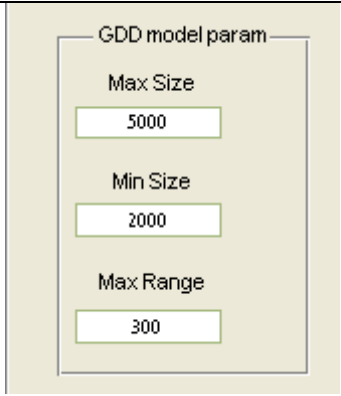
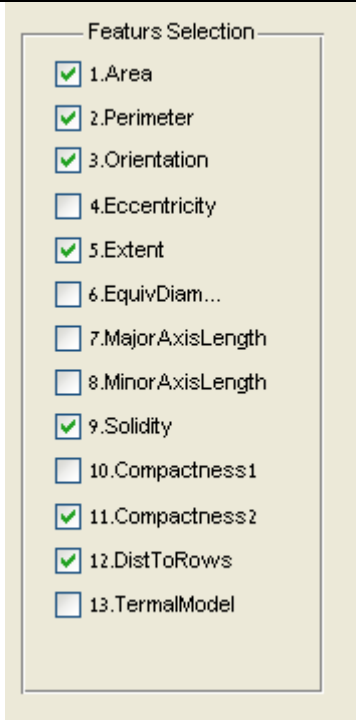
במצב זה המערכת לומדת את תכונות האובייקטים והמשתמש נדרש לזהות באופן ויזואלי פרטני כל אובייקט מכל אינדקס בכל תמונה. שלבי העבודה .

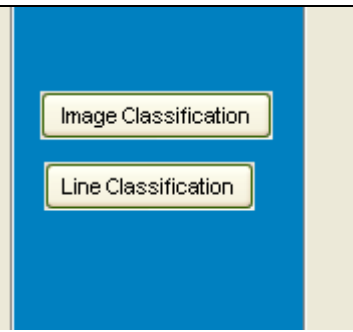
	1. בחירת מצב העבודה מתוך הרשימה. 2. בחירת תמונה חדשה מתוך מאגר התמונות שצולם
---	---

	3. סימון האינדקסים הרצויים וגודל האובייקט המינימלי לשלב הניקוי. הפעלה על כפתור Go.
	שלבי עיבוד התמונה 4. קביעת ערך הסף לבינאריזציה (נפתח חלון חדש – איור 5. בינאריזציה - איור 6. ניקוי רעשים - איור 7. סיגמנטציה- איור ניתן להריץ את כל התהליך משלב 3 עד 7 באופן רציף ושקוף למשתמש על-ידי סימון התיבה Fast TS
	
איור 7. – חלון לקביעת ערך הסף לבינאריזציה. ניתן לראות בתצוגה מקדימה את השפעת שינוי ערך הסף על הבינאריזציה של התמונה בכל אחד מהאינדקסים.	

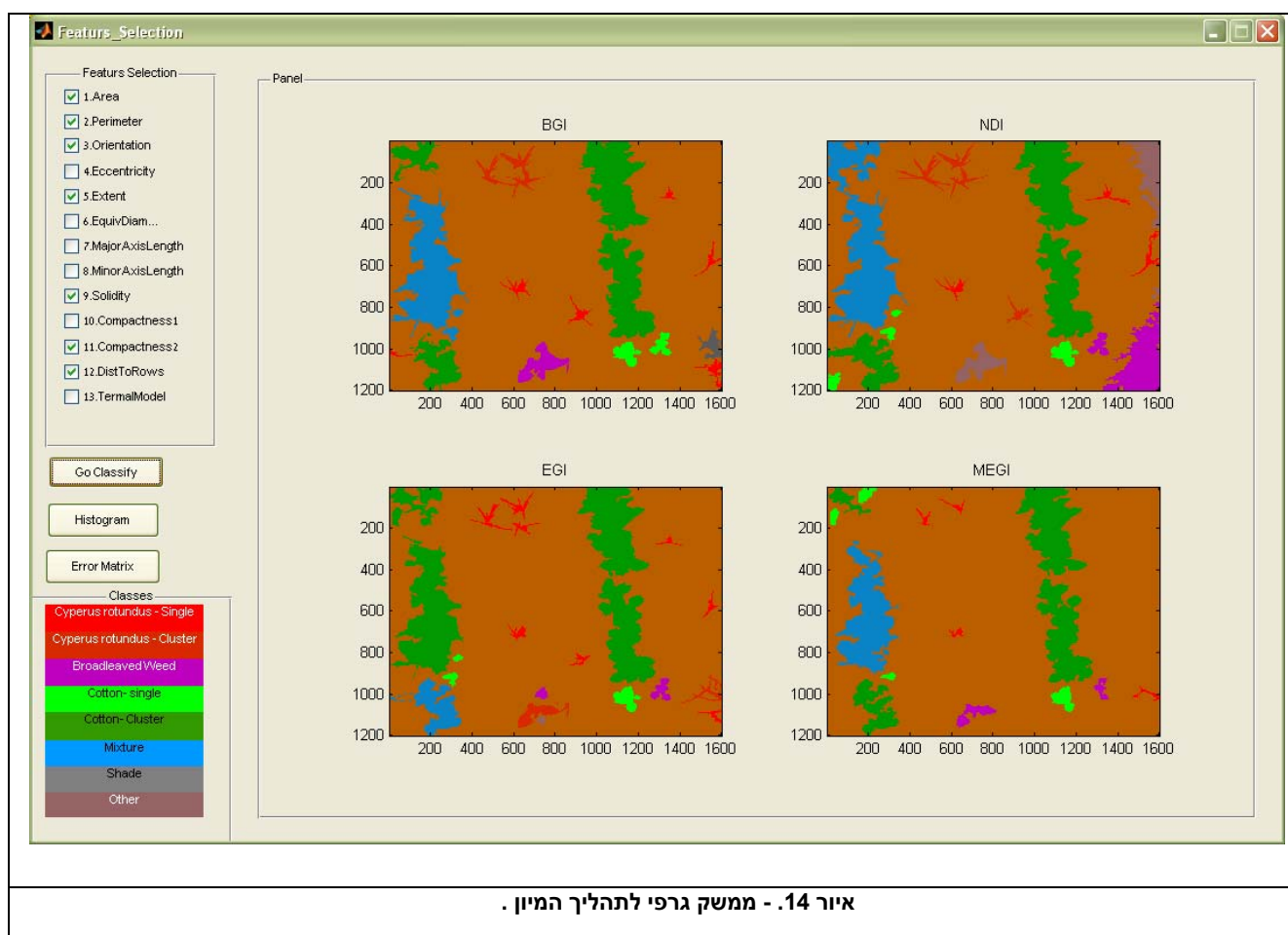
BGI  NDI  EGI  MEGI 	איור 8. – בינאריזציה
BGI  NDI  EGI  MEGI 	איור 9. – ניקוי התמונה

	איור 10. – סגמנטציה
8. לחיצה על כפתור ה Training set מתחילה את התהליך האינטראקטיבי של זיהוי האובייקטים. כשלב מקדים נדרש המשתמש לזהות את שורות הגידול בתמונה המקורית ולסמן עם העכבר את ההתחלה והסוף של כל שורה. המערכת מכניסה לבסיס הנתונים את הווקטור המאפיין כל שורה. 9. בשלב זה מופיעה רשימת קבוצות הזהות על המסך והאובייקטים מתחלפים אחד אחרי השני כאשר המשתמש מסמן לאיזה קבוצה הם שייכים (איור).	
	איור 11. – זיהוי אובייקטים
10. כאשר מסיימים לזהות את כל האובייקטים מאינדקס אחד עוברים לאינדקס הבא (תהליך אוטומטי). כאשר מסיימים עם התמונה כולה עוברים לתמונה חדשה וחוזר חלילה. בסיום התהליך לוחצים Stop & Save וכל המידע נשמר בבסיס הנתונים (Database). ניתן לראות את מספר האובייקטים והתמונות במונה (Counter) שבמסגרת הירוקה.	

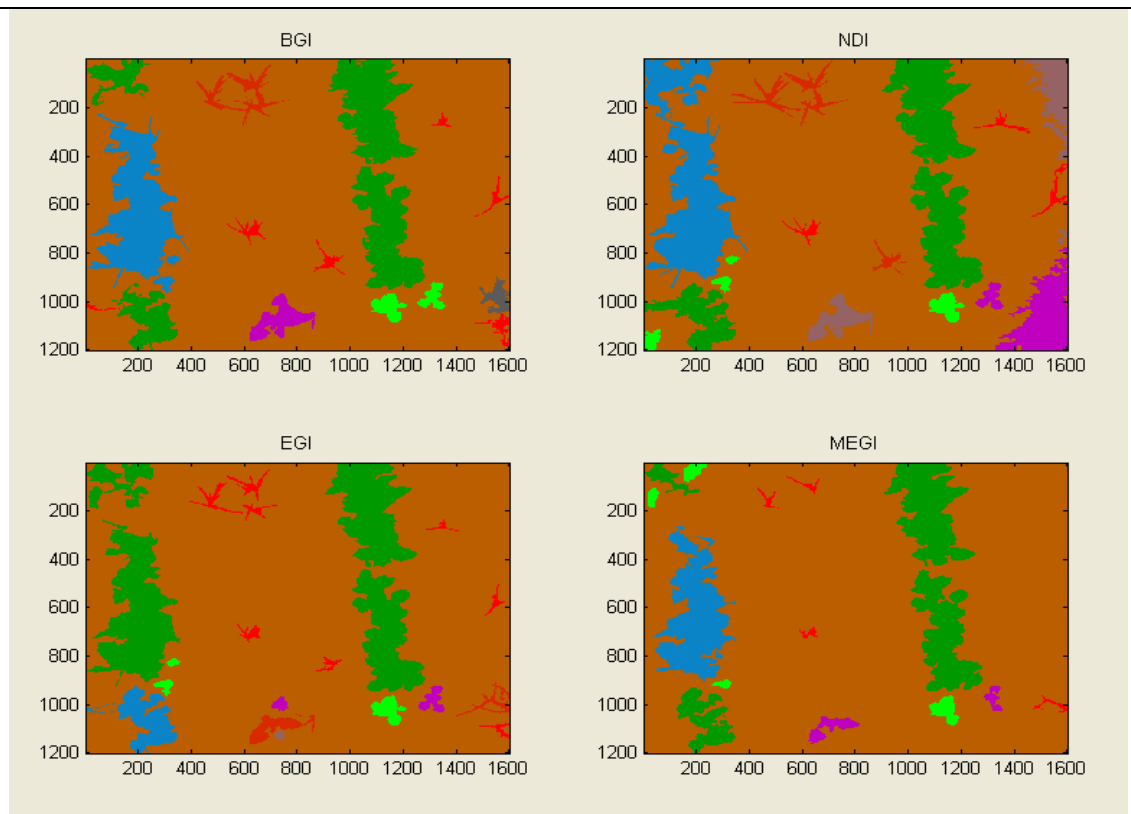
	1. בחירת מצב העבודה - Real time. 2. מתוך התפריט יש לבחור את Load Database. חלון בחירה ייפתח ומתוכו יש לבחור את בסיס הנתונים שמכיל את סט האימון הרלוונטי.
	3. הכנסת הפרמטרים של מודל ימי המעלה a. גודל מקסימלי של עשבוני בודד. b. גודל מינימלי של עשבוני בודד. c. המרחק המקסימלי בין פקעית אם ופקעית בת. היחידות הן בפיקסלים
	4. בחירת התכונות הגיאומטריות שישמשו לאפיון האובייקטים בתהליך המיון האוטומטי.

	5. לניתוח ומיון האובייקטים מתמונה בודדת יש ללחוץ Image classification. במצב זה יפתח חלון נוסף (איור) בו נדרש המפעיל לבחור את טווח התמונות למיון. למיון סט שלם של תמונות (שורת גידול). יש לבחור Line classification.
--	--

תהליך המיון האוטומטי מורכב ממיון ראשוני, המבוסס על עיבוד תמונה, ומיון שניוני המבוסס על מודל ימי המעלה. את תוצאות המיון הראשוני ניתן לראות באופן גרפי כאשר בוחרים במיון תמונה בודדת (איור). צבעי האובייקטים הם לפי קבוצות הזהות.



בסוף תהליך המיון האוטומטי מתקבלת טבלה שמכילה את המידע מכל התמונות ברצף.



איור 15. - תצוגה גרפית של תוצאות המיון הראשוני.

מצב הערכת ביצועים (Evaluation)

במצב זה ניתן לבחון את הצלחת המערכת בביצוע המיון. יש לבצע מיון ידני שיהווה מקור השוואה למיון האוטומטי. הערכת הביצועים, כפי שמתוארת בסעיף **שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.** מתבצעת על-ידי בניית מטריצות בלבול. הערכת יכולת ההפרדה של התכונות הגיאומטריות מתבצעת על-ידי בניית היסטוגרמות (**שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.**).

תהליך בניית reference זהה לבניית סט האימון והתוצאות נשמרות גם כן בבסיס הנתונים. בתחילת התהליך יש לבחור את מצב העבודה Evaluation ולפעול להשלמת התהליך כפי שמפורט בסעיף 0. בסוף תהליך המיון הידני יש ללחוץ על Line classification וחלון הממשק הגרפי למיון ידני (איור) יפתח.

	1. לביצוע מיון של תמונה בודדת יש ללחוץ על - Go classify. 2. לבניית היסטוגרמות להשוואת יכולת ההפרדה של התכונות הגיאומטריות (סעיף שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא. שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.) יש ללחוץ Histogram. 3. ליצירת מטריצות הבלבול (סעיף שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא. שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.) יש ללחוץ Error Matrix.
--	---

1. Naamat, T., Rubin, B. and Eizenberg H. (2009). Factors affecting soil sub-surface phases of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*) development. 2nd International Conference on Novel and Sustainable Weed Management in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems, September, 2009, Santorini, Greece.
2. Eizenberg H. (2009). Site specific weed management: mapping the tempo-spatial development of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*). 2nd International Conference on Novel and Sustainable Weed Management in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems, September, 2009, Santorini, Greece.
3. Efron, R., Alchanatis, V., Cohen, Y. and Eizenberg, H. (2008). Weeds mapping in cotton based on computer vision. *Nir Vatelem* (4): 32-33.
4. Naamat T. M.Sc. thesis. Modeling the sub-surface development of purple nutsedge. The Institute of Plant Sciences and Genetics, Faculty of Agricultural, Food and Environmental Sciences, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot, Israel.
5. Efron, R., Alchanatis, V., Cohen, Y. , Levi, A., Eizenberg, H. and Shani, U. (2009). Development of an integrated approach for weed detection in cotton, for site specific weed management. 7th ECPA, European Conference on Precision Agriculture, July 6-8, 2009 – Wageningen, the Netherlands
6. Efron R, M.Sc. thesis. Development of an Integrated Approach for Weed Detection in Cotton, for Site Specific Weed Management The institute of soils and water. Food and Environmental Sciences, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot, Israel

1. Alchanatis V., Ridet L., Hetzroni A., Yaroslavsky L. (2005) Weed detection in multi-spectral images of cotton fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 47:243-260.
2. Benjamin, L. R. and S. E. Park. 2007. The conductance model of plant growth and competition in monoculture and species mixtures: a review. *Weed Res.* 47:284-298.
3. Brown, R. F. and D.G. Mayer. 1988. Representing cumulative germination. 2. The use of the Weibull function and other empirically derived curves. *Ann. of Bot.* 61:127-138.
4. Cho S.I., Lee D.S., Jeong J.Y. (2002) AE--Automation and Emerging Technologies: Weed-plant Discrimination by Machine Vision and Artificial Neural Network. *Biosystems Engineering* 83:275.
5. El-Faki M.S., Zhang N., Peterson D.E. (2000) Weed detection using color machine vision. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers* 43:1969-1978.
6. Grundy, A. C. 2003. Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges. *Weed Res.* 43:1-11.
7. Holt, J. S., and D. R. Orcutt. 1996. Temperature thresholds for bud sprouting in perennial weeds and seed germination in cotton. *Weed Sci.* 44:523-533.
8. Jacovides, C. P., F. S. Tymvios, D. N. Asimakopoulos, K. M. Theofilou and S. Pashiardes. 2003. Global photosynthetically active radiation and its relationship with global solar radiation in the Eastern Mediterranean basin. *Theor. Appl. Climatol.* 74:227-233.
9. McMaster, G. S. and W. W. Wilhelm. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric for Meteorol.* 87:291-300.
10. Scott, J. S., R. A. Jones and W. A. Williams. 1984. Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Sci.* 24:1192- 1198.
11. Stafford J.V., Benlloch J.V. (1997) Machine-assisted detection of weeds and weed patches. *Precision Agriculture* 97:511-518.
12. Udo, S. O. and T. O. Aro. 1999. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agri. Forest Meteorol.* 97:21-31.
13. Wang N., Zhang N., Dowell F.E., Sun Y., Peterson D.E. (2001) Design of an optical weed sensor using plant spectral characteristics. *Transactions of the ASAE* 44:409-419.
14. Weibull, W. A. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 18:292-297.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת העל של המחקר היתה לפתח מודל זמן ומרחב להדברה מושכלת של גומא הפקעים. מטרות משנה היו :
(1) פיתוח מודל התפתחות של גומא הפקעים תלוי גורמי סביבה ו (2) פיתוח יכולת צילום והפרדה בין גומא הפקעים לכותנה. (3) בחינת שילוב שני המודלים.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
פותחו שני המודלים שצוינו לעיל. (1) מודל חיזוי צלוי גורמי סביבה להתפתחות הגומא ; ו (2) אלגוריתם להפרדת הגומא מהכותנה. נמצא כי השילוב בין גורמי הזמן והמרחב משפרים את אמינות המודל ותומכים האחד בשני.
הוכנה מפת עשבים בשדה לפי סיווג מיני עשבים וגודל הכתם.
מסקנות מדעיות והשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
בעיות שנוותרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שנדרשים עקב העבודה.
יש לבחון את המודל המוצע בתנאי שדה במהלך 3 שנים לפחות, בגלל תנאי סביבה משתנים שישפיעו על המודל.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - <u>ציטוט</u> ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי ; פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט ; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.
ראה סעיף 5 בדוח.
פרסום הדוח : אני ממליץ לפרסם את הדוח : (סמן אחת מהאופציות)
☐ רק בספריות
☒ ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
☐ חסוי – לא לפרסם.
האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי ? *

*יש לענות על שאלה זו רק בדוח שנה ראשונה במחקר שאושר לשנתיים, או בדוח שנה שנייה במחקר שאושר לשלוש שנים