

דוח מסכם לתוכנית מחקר מספר 20-12-0004  
פיתוח מערכת להערכת יבול באמצעות סונר

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אביטל בכר<sup>1</sup>, גבור קושה<sup>2</sup>, יוסי יובל<sup>3</sup>, גיא לידור<sup>1</sup>, יוסי פורטל<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי; <sup>2</sup>בי"ס להנדסה מכאנית, אוניברסיטת תל אביב; <sup>3</sup>המחלקה  
לזואולוגיה, אוניברסיטת תל אביב

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

מאי 2016

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



חתימת החוקר

### תקציר

בארץ כ- 30,000 דונם מטעי תמרים, כ- 60,000 דונם ירקות, 320,000 דונם זיתים וכ- 150,000 דונם נשירים (נתוני לשכת המדען הראשי). הערכת היבול הצפוי וכמות הפרי הינה בעיה מרכזית בגידולים שונים בחקלאות ומעסיקה חקלאים, מערכות בתי אריזה ואיחסון וכן תחשיבי פיצוי לחקלאים. בחלק מהגידולים, כגון נשירים ותמרים מתבצע דילול פירות בשלב שבו קיימים חנטים ופירות צעירים בכדי להשפיע על משקל הפרי הבודד וכן בכדי להימנע ממנעד דו שנתי ברמת היבול מפגיעה בצימוח ובפריחה בעונה העוקבת. בזיתים יש חשיבות להערכת יבול ברמת העץ הבודד גם בכדי לקבוע את תהליך ומועדי המסיק. כיום בהעדר יכולת מדויקת להערכת כמות הפרי חקלאים נוטים להפריז או להמעיט בדילול הפרי בהתאם להבנתם וגורמים לעומס על העצים, עבודה מיותרת במשך העונה הכוללת דילול ידני עתיר ידיים עובדות בהיקף של כ- 5 ימי עבודה לדונם, פירות קטנים ופגיעה בכמות הפריחה בעונה העוקבת. הערכה כמותית מדויקת של הפרי או החנטים תאפשר קבלת החלטות טובה יותר לביצוע הדילול והקצאת המשאבים המתאימים בהתאם והקטנת העלויות הכלולות בביצוע פעולות אלו. בנוסף, טכנולוגיה להערכת היבול הצפוי במטעים ובגידולי ירקות תאפשר לחקלאי לחזות את הרווח הצפוי ולהעריך את כח האדם הדרוש, את חוסר האחידות בחלקה אשר מצריכה טיפול שונה ברמת תת האזור או הצמח ולבצע ניהול הסיכונים בהתאם. כיום הערכת היבול מתבצעת בספירת הפירות על עצים/צמחים נבחרים על ידי עובדים. שיטה צורכת זמן רב ובעלת דיוק נמוך או שמבוצעת הערכה גסה שאינה מדויקת.

לטכנולוגיית סונר יש שלושה יתרונות בולטים לעומת החיישנים הנ"ל: (1) היא מאפשרת מדידת מרחק מדויקת (בסדר גודל של מילימטרים), (2) בגלל אורכי הגל הארוכים יחסית, היא חודרת לתוך העלווה ומספקת אינפורמציה

מעומק הצמת, ו- (3) השימוש באות סונר רחב תדר מאפשר לבחון את תגובת התדר של העצם המחזיר בתדרים שונים כאשר אורכי גל שונים מספקים מידע על עצמים בגדלים שונים ובהתאם על היחס ביניהם (למשל פירות גדולים מול פירות קטנים). למרות יתרונות אלה, בעיקר בגלל מחסור בכלים חישוביים לעיבוד הנתונים, כיום יש שימוש מועט מאוד – אם בכלל – בסונר באבחון חקלאי.

במחקר הנוכחי פותחו שני אבי טיפוס של מערכת סונר. המערכת הראשונה נבנתה לבחינה ראשונית והתאמת טכנולוגיית הסונר לגידולים חקלאיים ועבדה בתחום תדרים של 10 – 150 Khz. מערכת הסונר השנייה כוללת שני חלקים אחד מערכת הסונר והשנייה מערכת ראייה. שני החלקים מחוברים במערכת באמצעות מתאמים שתוכננו וניבנו במדפסת תלת מימדית. מערכת הסונר עבדה בתחום תדרים של 20 – 120 Khz. מערכת הסונר השנייה הותאמה והותקנה לנשיאה על ידי שתי פלטפורמות רובוטיות: פלטפורמה רובוטית לריסוס בחממות שפותחה במכון להנדסה חקלאית וזרוע רובוטית בעלת 6 דרגות חופש.

בוצעו שלושה ניסויים לבחינת הסונר להערכת פירות ועלים ושתי בדיקות של התאמת מערכת הסונר לפלטפורמה רובוטית ולזרוע רובוטית. הניסויים כללו ניסוי מעבדה על פרי או עלה בודדים בכדי לקבוע את החתימה הספקטרלית של פרי או עלה, ניסוי מעבדה על צמחים שלמים לבחינת מספר הפירות והעלים על עוצמת ותבנית ההזרחה ולהערכת משקל הפירות ומספר העלים בכל צמח; וניסוי בחממה לסיווג העצמים השונים כגון צמחים, שורות צמחים, קירות החממה, הקרקע, עמודים ותשתיות חממה נוספות. הניסויים והבדיקות בוצעו על פלפל ומלפפון.

התוצאות הראו כי ההחזר האקוסטי של פרי ועלה בודדים דומה בכל הספקטרום מלבד בשלושה תדרים: 33, 45 ו-70 Khz. בתדרים 33 ו-45 Khz עוצמת ההחזר של העלים גבוהה יותר וב-70 Khz עוצמת ההחזר של הפרי גבוהה יותר (איור 8). גם ערכי סטיות התקן של עוצמות ההחזר האקוסטי שונים עבור עלים ופירות. מאחר והפירות סימטריים יחסית סטיית התקן נמוכה בעוד שהעלים הינם דמויי משטח, הכיווניות שלהם מאוד משפיעה על רמת ההחזר ולכן סטיית התקן גבוהה. נמצא כי התדירויות המשמעותיות ביותר בפלפל הן 20, 32, 68, 96 ו-116 Khz. בוצעה רגרסיה לינארית רבת משתנים להערכת האנרגיה המוחזרת עבור תחומי תדרים שונים. בניתוח של תחום תדרים צר נמצאה התאמה של 84% ו-64% ( $R^2$ ) ברמת מובהקות גבוהה ( $P << 0.001$ ) בין עוצמת ההחזר האקוסטי (האנרגיה) לבין כמות הפירות ומספר העלים בצמח בהתאמה.

פותח מודל רשתות עצביות עם 6 שכבות נסתרות מבוסס אלגוריתם Levenberg-Marquardt לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח. בבחינת המודל לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח נמצא כי ההתאמה הינו גבוה ועומד על 86% ו-95% ( $R^2$ ) בהתאמה.

בניסוי החממה נמצא כי ניתן לאפיין את ההחזר האקוסטי מהקרקע ולכן ניתן לנקות אותו מהדגימה ולקבל נתונים נקיים יותר של הגידול. ההחזר מהצמחים של האות האקוסטי הינו יחסית חזק בתחום התדרים של 40 – 60 Khz. בכדי לשפר את זיהוי הצמחים, בוצע נירמול של עוצמת ההחזר בעוצמת השידור של ה-CHIRP עבור כל תדירות אשר שיפר את יחס האות לרעש (SNR). באמצעות הסונר ניתן היה לזהות את מיקום שורות הפלפל בערוגות השונות, גם בערוגות ניסטרות. בהשוואה בין החזר של קיר החממה לבין שורת צמחים נמצא כי ההחזר האקוסטי של קיר החממה יותר צר מאשר הצמחים בכל התדרים שנמדדו וכו החתימה הספקטרלית שונה בתחום התדרים 70 – 105 Khz. בתחום תדרים זה קיימת הנמכה חזקה בעוצמת ההחזר של צמחים אך ההחזר מהקיר נישאר גבוה. התוצאות הראו כי באמצעות הסונר ניתן לזהות את מיקום העצמים השונים ולהבדיל ביניהם.

## תוכן עניינים

4.....	מבוא.....	1
4.....	רקע מדעי .....	1.1
5.....	מטרות המחקר לתקופת הדוח .....	1.2
5.....	פיתוח מערכת הסונר .....	2
6.....	מערכות רובוטיות .....	3
6.....	עיבוד האות האקוסטי.....	4
7.....	ניסויים ובדיקות.....	5
8.....	ניסוי מעבדה על פירות ועלים בודדים.....	5.1
8.....	ניסוי מעבדה על צמחי פלפל בוגרים .....	5.2
10.....	ניסוי חממה בחלקת פלפל ומלפפון.....	5.3
12.....	בדיקת התאמת מערכת הסונר לזרוע רובוטית.....	5.4
12.....	פיתוח מודל רשתות עצביות לחיזוי משקל הפרי ומספר העלים בצמח.....	6
13.....	סיכום ומסקנות.....	7

## 1 מבוא

### 1.1 רקע מדעי

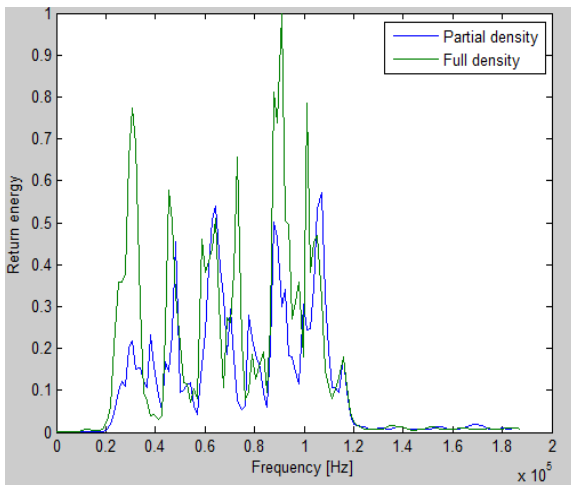
בארץ כ- 30,000 דונם מטעי תמרים, כ- 60,000 דונם ירקות, 320,000 דונם זיתים וכ- 150,000 דונם נשירים (נתוני לשכת המדען הראשי). הערכת היבול הצפוי וכמות הפרי הינה בעיה מרכזית בגידולים שונים בחקלאות ומעסיקה חקלאים, מערכות בתי אריזה ואיחסון וכן תחשיבי פיצוי לחקלאים. בחלק מהגידולים, כגון נשירים ותמרים מתבצע דילול פירות בשלב שבו קיימים חנטים ופירות צעירים בכדי להשפיע על משקל הפרי הבודד וכן בכדי להימנע ממנעד דו שנתי ברמת היבול מפגיעה בצימוח ובפריחה בעונה העוקבת. בזיתים יש חשיבות להערכת יכולת ברמת העץ הבודד גם בכדי לקבוע את תהליך ומועדי המסיק. כיום בהעדר יכולת מדויקת להערכת כמות הפרי חקלאים נוטים להפריז או להמעיט בדילול הפרי בהתאם להבנתם וגורמים לעומס על העצים, עבודה מיותרת במשך העונה הכוללת דילול ידני עתיר ידיים עובדות בהיקף של כ- 5 ימי עבודה לדונם, פירות קטנים ופגיעה בכמות הפריחה בעונה העוקבת. הערכה כמותית מדויקת של הפרי או החנטים תאפשר קבלת החלטות טובה יותר לביצוע הדילול והקצאת המשאבים המתאימים בהתאם והקטנת העלויות הכלולות בביצוע פעולות אלו. בנוסף, טכנולוגיה להערכת היבול הצפוי במטעים ובגידולי ירקות תאפשר לחקלאי לחזות את הרווח הצפוי ולהעריך את כח האדם הדרוש, את חוסר האחידות בחלקה אשר מצריכה טיפול שונה ברמת תת האזור או הצמח ולבצע ניהול הסיכונים בהתאם. כיום הערכת היבול מתבצעת בספירת הפירות על עצים/צמחים נבחרים על ידי עובדים. שיטה צורכת זמן רב ובעלת דיוק נמוך או שמבוצעת הערכה גסה שאינה מדויקת.

בוצעו מחקרים רבים בנושא הערכת יכולת וזיהוי הפירות באמצעים שונים. ברובם השתמשו במערכות ראייה מסוגים שונים כגון מצלמות בתחום הנראה, הדמיות תרמיות, הדמיות היפרספקטראליות ושילוב שלהם. הקשיים בשימוש באמצעים הנ"ל כוללים: (1) קושי בזיהוי הפרי כאשר הפירות והעלים הם בעלי צבע דומה וקונטרסט נמוך. (2) התמודדות עם השפעת תנאי תאורה דינמיים, ו-(3) יכולת מוגבלת לחדור לתוך נוף העץ ולזהות פירות אשר אינם על המעטפת או מוסתרים.

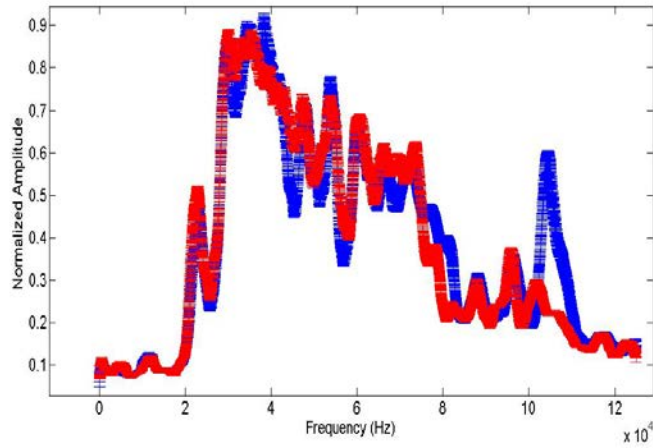
לטכנולוגיית סונר יש שלושה יתרונות בולטים לעומת החיישנים הנ"ל: (1) היא מאפשרת מדידת מרחק מדויקת (בסדר גודל של מילימטרים), (2) בגלל אורכי הגל הארוכים יחסית, היא חודרת לתוך העלוה ומספקת אינפורמציה מעומק הצמח, ו-(3) השימוש באות סונר רחב תדר מאפשר לבחון את תגובת התדר של העצם המחזיר בתדרים שונים כאשר אורכי גל שונים מספקים מידע על עצמים בגדלים שונים ובהתאם על היחס ביניהם (למשל פירות גדולים מול פירות קטנים). למרות יתרונות אלה, בעיקר בגלל מחסור בכלים חישוביים לעיבוד הנתונים, כיום יש שימוש מועט מאוד – אם בכלל – בסונר באבחון חקלאי.

בשנת 2013 ו- 2014 בוצעו ניסויים הקדמיים לזיהוי נוכחות פירות פלפל וצפיפות עלווה בחממת הרובוטיקה במכון להנדסה חקלאית. בניסויים נבדקו ארבעה טיפולים, (1) צמחי פלפל ללא פירות, (2) צמחי פלפל עם פירות, (3) צמח פלפל עם עלווה צפופה ו-(4) צמח פלפל עם עלווה דלילה. ניתוח ראשוני של הסיגנל הראה כי ניתן לזהות נוכחות פרי בצמחים (איור 1) וכי יש הבדל בסיגנל לצמחים עם עלווה בצפיפות שונה (איור 2).

**החלטת ועדת ההיגוי היתה כי התוכנית תקוצר לשנה ותתמקד בפיתוח הסונר בכדי להראות היתכנות שלאחריה תתבררנה הדרישות מהרובוט. המחקר שבוצע התמקד בפיתוח טכנולוגיית הסונר ומערכת החישה תוך התחשבות בהתאמתה העתידית ליחידת קצה (end-effector) של רובוט ואיפיון הדרישות ממערכת רובוטית עתידית להערכת ייבול.**



איור 2: דוגמה של ספקטרום של צמח עם עלווה צפופה (ירוק) ועלווה דלילה (כחול).



איור 1: דוגמה של ספקטרום של החזר של צמח עם פירות (כחול) לעומת צמח ללא פירות (אדום).

### 1.2 מטרת המחקר לתקופת הדוח

1. פיתוח מערכת הסונר.
2. פיתוח אלגוריתמים להערכת ייבול.
3. התאמת מערכת הסונר לזרוע רובוטית ואיפיון הדרישות מרובוט עתיד.

### 2 פיתוח מערכת הסונר

במהלך המחקר פותחו שני אבי טיפוס למערכות סונר. מערכת 1 מבוססת (Avisoft) UltraSoundGate 116hm. מערכת 2 מבוססת (Bioacoustics, Germany) כוללת משדר אולטראסוני 10 W. מקלט CM16/CMP בתחום תדרים 10 kHz עד 150 kHz, מגבר, מערכת הקלטה ומתאם אנלוגי לדיגיטלי (איור 3).



Figure 3: UltraSoundGate 116hm recording system: a. UltraSoundGate 116 player, b. UltraSoundGate 116hm recorder, c. CM16/CMP microphone, d. Ultrasonic Dynamic Speaker Vifa speaker.

מערכת הסונר השנייה (מערכת 2, איור 4) כוללת שני חלקים אחד מערכת הסונר והשנייה מערכת ראייה. שני החלקים מחוברים במערכת באמצעות מתאמים שתוכננו וניבנו במדפסת תלת מימדית. המערכת כוללת מקלט (CM16/CMP, Avisoft Bioacoustics, Germany) (1), משדר (XT25SC90-04, Tymphany, Denmark) (2) בתחום 1 עד 120 KHz, מגבר למשדר (PA12, Apex, USA) (3), מגבר למקלט (CMPA40-5V, Avisoft Bioacoustics, ) (4), כרטיס (USB-6210, National Instruments, USA) (5) ומצלמה (6).

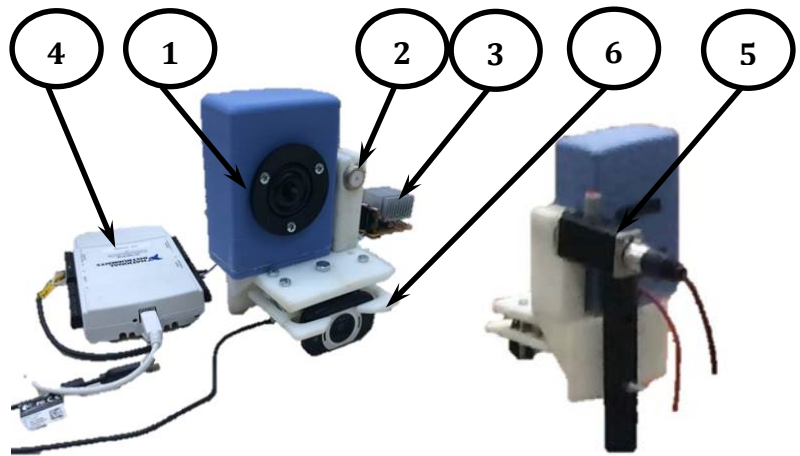


Figure 4: Forward (a) and back (b) view of the sensing system that has: 1) Ultrasonic loudspeaker, 2) Ultrasonic Microphone, 3) Loudspeaker amplifier, 4) Microphone supply and amplifier, 5) DAQ card and 6) Camera

### 3 מערכות רובוטיות

מערכת הסונר השנייה הותאמה והותקנה לנשיאה על ידי שתי פלטפורמות רובוטיות: פלטפורמה רובוטית לריסוס בחממות שפותחה במכון להנדסה חקלאית וזרוע רובוטית בעלת 6 דרגות חופש (VP-6242G, Denso, Japan), איור 5). מערכת הסונר שנבדקה על הפלטפורמה הרובוטית לחממות, הוחזקה על ידי מערכת גימבלים (Ronin, DJI, China) לשמירת כיוון. עבור שתי המערכות הרובוטיות פותחו יחידות קצה (end-effector) ייעודיים בכדי לשמור על מקבילות ומרחק מינימלי בין המקלט למשדר.



איור 5: מערכת הסונר המותקנת על זרוע רובוטית (ימין) ועל פלטפורמה (שמאל).

### 4 עיבוד האות האקוסטי

האות האקוסטי ששודר היה מסוג CHIRP בתדרים 20-120 Khz. עיבוד ולכידת הנתונים בוצעה בתוכנת MATLAB וכרטיס DAQ מסוג NI-6218 בקצב של 10 הרץ. בוצע ניתוח מסוג multi spectral analysis. הנתונים

הגולמיים (איור 6א') הומרו לתמונת ספקטרוגרמה באמצעות short time Fourier transform algorithm כאשר ציר X הינו זמן קליטת האות וציר Y הינו תדירות האות (איור 6ב'). הספקטרוגרמה עברה התמרה כך שהזמן לקליטת האות תורגם למרחק וציר Y מבטא את המרחק מהמקלט שבו מקלטו ההדים האקוסטיים. ערך הפיקסל במיקום Y,X בספקטרוגרמה המותמרת (איור 6ג') מבטא את עוצמת החזר האות בתדירות Y ובמרחק X מהמקלט. הספקטרוגרמה מאפשרת להבדיל בין ה- CHIRP ובין החזר מאובייקטים שונים וכן מאפשרת ביצוע ניתוח סטטיסטי, ניתוח אות או ניתוח מורפולוגי בדומה לעיבוד תמונה על ההדים החוזרים מעצמים שונים.

בשל דעיכת עוצמת החזר האות עם המרחק, בוצע תיקון של ערכי העוצמה הנקלטת כך שלא תושפע ממרחק האובייקט ותתקבל אותה חתימה ספקטראלית עבור אובייקט קרוב או רחוק באותו סוג. התיקון בוצע באמצעות שיטת Ordinary Least Squares (OLS) המתארת את פונקציית הדעיכה של האות במרחק.

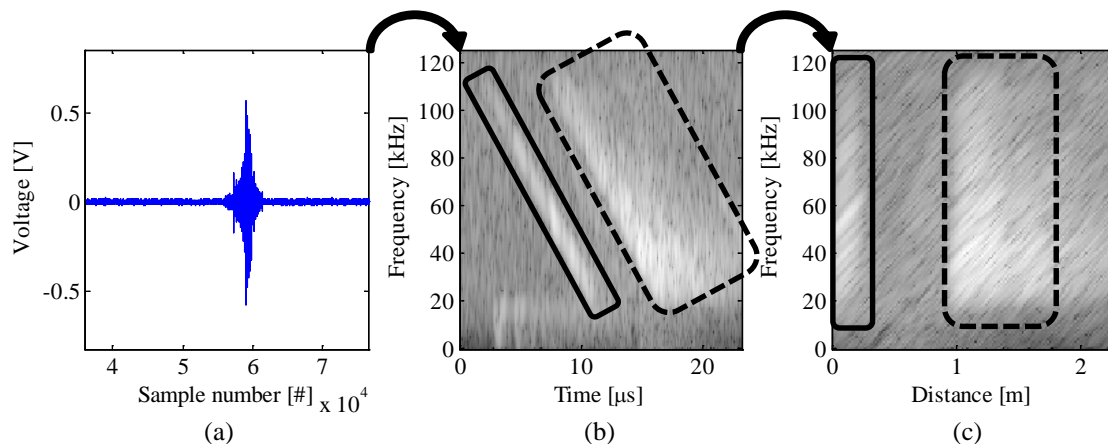


Figure 6: Basic data processing steps: (a) Recorded signal. (b) Frequency-time spectrogram. (c) Frequency-distance spectrogram.

## 5 ניסויים ובדיקות

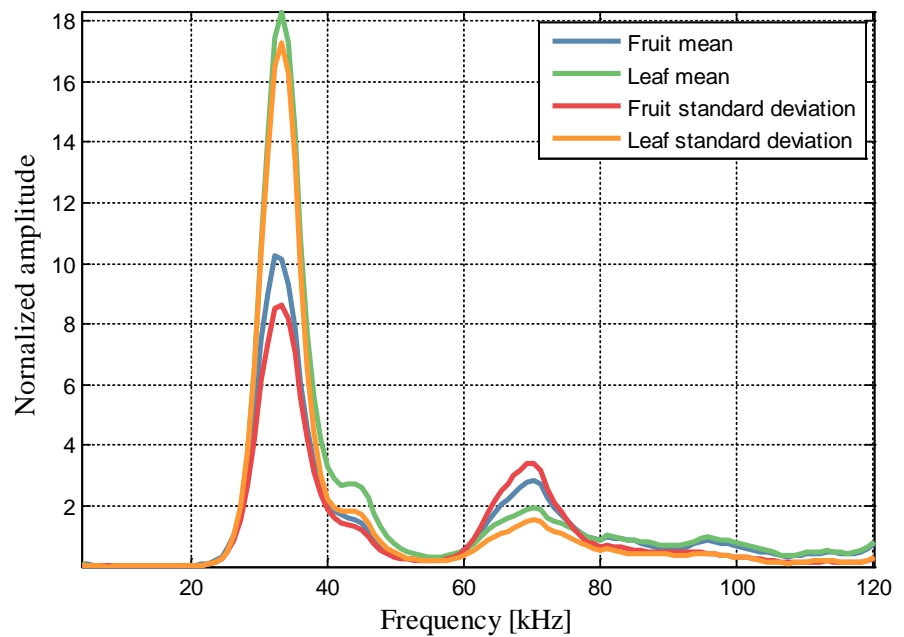
בוצעו שלושה ניסויים (איור 7): (א) ניסוי מעבדה על פרי או עלה בודדים בכדי לקבוע את החתימה הספקטראלית של פרי או עלה; (ב) ניסוי מעבדה על צמחים שלמים לבחינת מספר הפירות והעלים על עוצמת ותבנית החוזר ולהערכת משקל הפירות ומספר העלים בכל צמח; (ג) ניסוי בחממה לסיווג העצמים השונים כגון צמחים, שורות צמחים, קירות החממה, הקרקע, עמודים ותשתיות חממה נוספות. כמו כן בוצעו שתי בדיקות של התאמת מערכת הסונר לפלטפורמה רובוטית ולזרוע רובוטית.



איור 7: ניסוי מעבדה על צמחי פלפל בודדים (ימין) על פירות בודדים (מרכז) ובחממה על שורות פלפל (שמאל).

## 5.1 ניסוי מעבדה על פירות ועלים בודדים

הניסוי בוצע במעבדת הרובוטיקה החקלאית שבמכון להנדסה חקלאית. הניסוי כלל את מערכת הסונר השנייה וכן 5 פירות בודדים ו-5 עלים בודדים שנקטפו בסמוך למועד הניסוי. כל עלה או פרי נדגם 50 פעם באמצעות מערכת הסונר ממרחק של 1 מ' ובאוריאנטציות שונות אשר נבחרו באופן אקראי. בכדי לבדוד את ההחזר האקוסטי של הפירות והעלים מהסביבה, הם ניתלו מהתיקרה באמצעות חוט דק (איור 7 מרכז). ההחזר האקוסטי של החוט נבדק ונמצא כי הוא חלש ומתחת לערך סף קליטת מערכת הסונר כך שלא ישפיע על התוצאות. התוצאות הראו כי ההחזר האקוסטי של פרי ועלה בודדים דומה בכל הספקטרום מלבד בשלושה תדרים: 33, 45 ו-70 Khz. בתדרים 33 ו-45 Khz עוצמת ההחזר של העלים גבוהה יותר וב-70 Khz עוצמת ההחזר של הפרי גבוהה יותר (איור 8). גם ערכי סטיות התקן של עוצמות ההחזר האקוסטי שונים עבור עלים ופירות. מאחר והפירות סימטריים יחסית סטיית התקן נמוכה בעוד שהעלים הינם דמויי משטח, הכיווניות שלהם מאוד משפיעה על רמת ההחזר ולכן סטיית התקן גבוהה.



איור 8 : החתימה הספקטראלית של עלה ופרי בודדים. ממצוע וסטיית תקן בעקומים נפרדים.

## 5.2 ניסוי מעבדה על צמחי פלפל בוגרים

הניסוי בוצע במעבדת הרובוטיקה החקלאית שבמכון להנדסה חקלאית. הניסוי כלל את מערכת הסונר השנייה וכן 5 צמחי פלפל בוגרים שגודלו בחממת המחקר של המעבדה לרובוטיקה חקלאית והועברו לעציצים בסמוך לניסוי. כל צמח נשא פירות במשקל כולל של 500 עד 1200 לצמח. הצמחים ניתלו מהתיקרה באמצעות חוט דק. כל צמח נדגם מ-3 כיוונים שונים בהפרשי זווית של 120 מעלות, מ-2 מרחקים: 0.625 מ' ו-1.25 מ' וב-3 רמות פרי: מלוא הפרי, רמת ביניים, וללא פרי. סף הכל 18 קומבינציות ניסוי לכל צמח. כל קומבינציה נדגמה 30 פעם בתדירות של 10 הרץ ובוצע מיצוע של ההדמים החוזרים.

איור 9 מציג ספקטרוגרמה של צמח פלפל עם פירות (איור 9א), ללא פירות (איור 9ב) וההפרש ביניהם (איור 9ג) כפי שמתבטא בעוצמות ההחזר עבור התדרים השונים בכל טווח הצמח. באיור 9ג, האזורים הבהירים מציינים מקומות שבהם היו פירות ואת התדירויות בהם זה מתבטא. בוצע ניתוח על כל הקומבינציות ונמצאו התדירויות בהם השינויים הינם המשמעותיים ביותר: 20, 32, 68, 96 ו-116 Khz. בוצעה גרסיה לינארית רבת משתנים להערכת האנרגיה



המוחזרת עבור תחומי תדרים שונים. בניתוח של תחום תדרים 28 עד 20 KHz בלבד נמצאה התאמה של 84% ( $R^2$ ) ברמת מובהקות גבוהה ( $P < 0.001$ ).

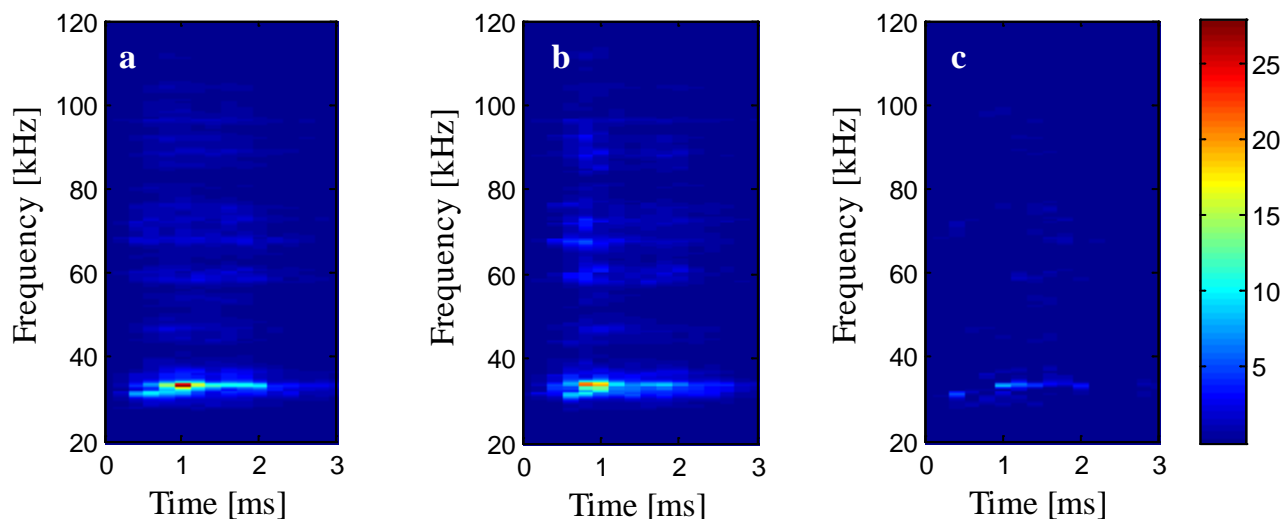
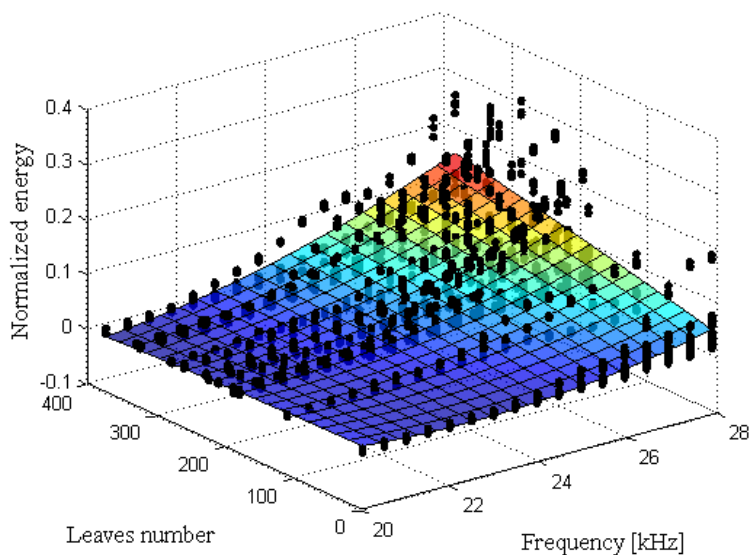


Figure 9: (a) Mean normalized echo for unpicked plant (b) Mean normalized echo for picked plant (c) Difference between a and b.

באופן דומה בוצע ניתוח תוצאות הניסוי לבחינת הקשר בין עוצמות ההחזר האקוסטי בתדרים השונים (האנרגיה) לבין מספר העלים בצמח (איור 10). בוצעה רגרסיה ליניארית רבת משתנים להערכת האנרגיה המוחזרת עבור תחומי תדרים שונים. בניתוח של תחום תדרים 28 עד 20 KHz בלבד נמצאה התאמה של 64% ( $R^2$ ) ברמת מובהקות גבוהה ( $P < 0.001$ ).



איור 10: הקשר בין רמת ההחזר האקוסטי (אנרגיה) בתדרים השונים ומספר עלים שונה בצמח.

### 5.3 ניסוי חממה בחלקת פלפל ומלפפון

הניסוי בוצע בחממת המחקר של המעבדה לרובוטיקה חקלאית, בחלקת פלפל ומלפפון אשר גודלו בשיטות ומאפיינים של גידול מסחרי. הניסוי כלל את מערכת הסונר השנייה ונדגמו עצמים שונים כגון צמחים, שורות צמחים, קירות החממה, הקרקע, עמודים ותשתיות חממה. נמדדו מרחקים שונים במדידות עצמים שונים: (1) מרחק רציף במדידת אפקט החזר הקרקע; (2) שורות גידול פלפל במרחקים של 0.5, 1, 1.5 ו-2 מ'; (3) קיר החממה במרחקים של 0.5, 1, 1.5 ו-2 מ'; (4) שורות גידול פלפל במרחקים של 0.5, 1, 1.5 מ'. בכל המדידות, מערכת הסונר היתה ניצבת לאובייקט. בוצעו 30 חזרות לכל קומבינציה של אובייקט-מרחק. דוגמאות למיקום מערכת הסונר מופיע באיור 11.

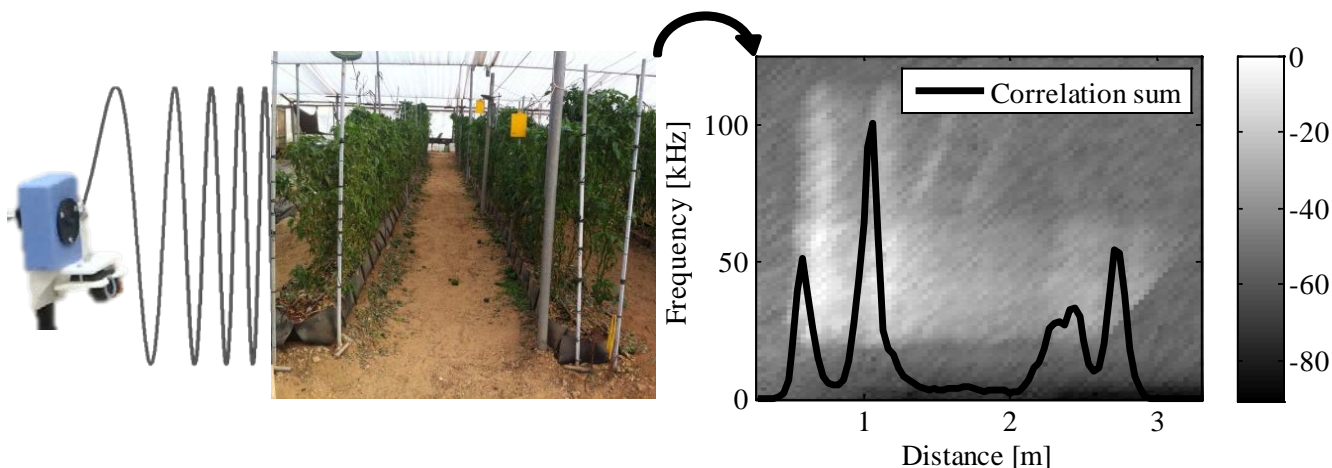


איור 11: מדידת עצמים שונים: (1) קרקע, (2) שורת פלפל, (3) קיר חממה, (4) שורת מלפפון.

התוצאות הראו כי ההחזר של האנרגיה (עוצמת ההחזר) מהקרקע גבוה במרחקים של 72 – 220 ס"מ ממערכת הסונר בתחום תדירויות של 20 – 60 Khz. לכן, יש להתחשב בהחזר האקוסטי מהקרקע ביישום מערכת הסונר בשימושים חקלאיים. בניתוח תוצאות הניסוי ההחזר האקוסטי מהקרקע "נוקה" מהחזר הכולל בכדי להקטין את השפעתו.

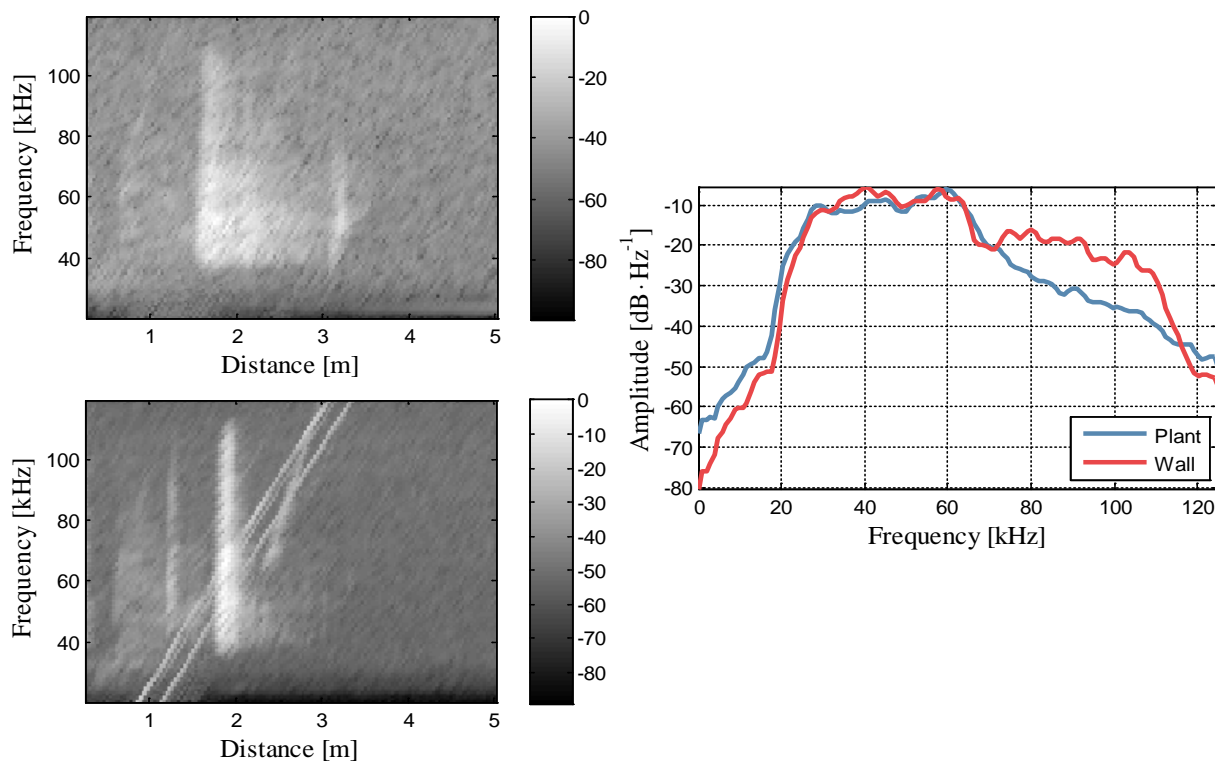
ההחזר מהצמחים של האות האקוסטי הינו יחסית חזק בתחום התדרים של 40 – 60 Khz. בכדי לשפר את זיהוי הצמחים, בוצע נירמול של עוצמת ההחזר בעוצמת השידור של ה-CHIRP עבור כל תדירות אשר שיפר את יחס האות לרעש (SNR). איור 12 מראה את מערך הניסוי והספטרורמה כאשר מערכת הסונר היתה במרחק של 0.5 מ' משורת הפלפל. הקו השחור בספקטורוגרמה מתאר את עוצמת ההחזר האקוסטי בתחום תדרים של 40-60 Khz. מיקום ארבעת הפסגות בעקום תואמות למיקומן של ארבעת השורות בשתע הערוגות שבתמונה. הניסוי הראה כי ניתן לזהות בדיוק

גבוה את השורות בערוגה השניה גם אם הן ניסטרות מאחורי הערוגה הראשונה. תכונה זו הינה ייחודית לטכנולוגיית הסונר.



איור 12: תיאור מערכת הניסוי לזיהוי שורות פלפל והביטוי שלהן בספקטרוגרמה.

בהשוואה בין החזר של קיר החממה לבין שורת צמחים נמצא כי ההחזר האקוסטי של קיר החממה יותר צר מאשר הצמחים בכל התדרים שנמדדו וכו' החתימה הספקטראלית שונה בתחום התדרים 70 – 105 KHz. בתחום תדרים זה קיימת הנמכה חזקה בעוצמת ההחזר של צמחים אך ההחזר מהקיר נישאר גבוה (איור 13). איור 13 מציג התוצאות עבור מקחר של 2 מ' בין האוביקט למערכת הסונר. התוצאות הראו כי באמצעות הסונר ניתן לזהות את מיקום העצמים השונים ולהבדיל ביניהם.

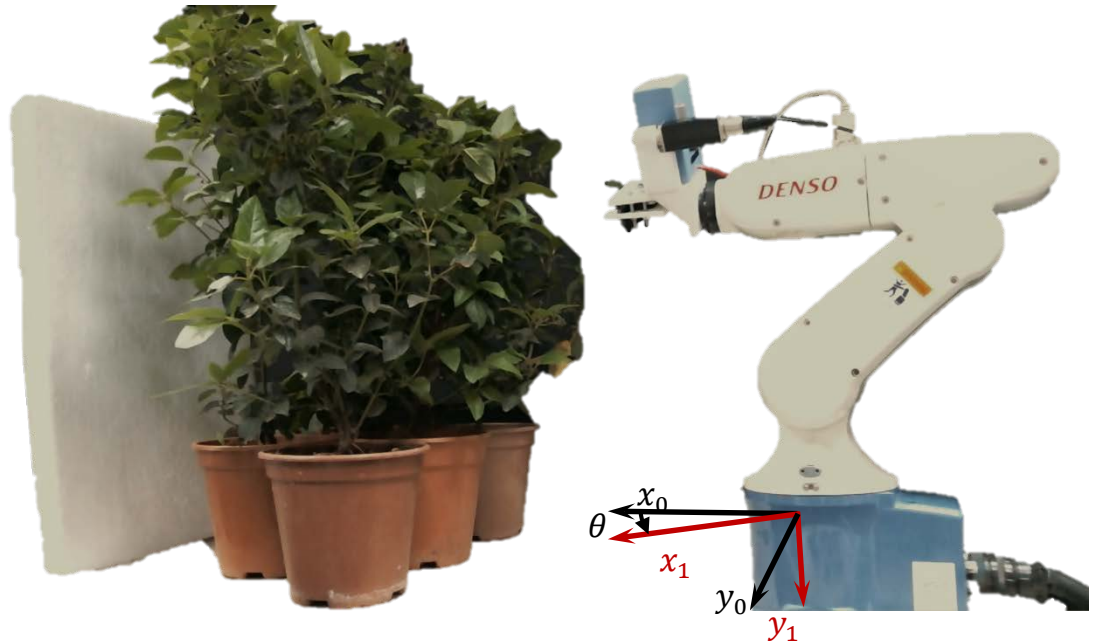


איור 13 : הספקטרוגרמות של שורת צמחי פלפל (למעלה) וקיר החממה (למטה) והחתימה הספקטראלית של שורת צמחים וקיר החממה (ימין).

#### 5.4 בדיקת התאמת מערכת הסונר לזרוע רובוטית

הבדיקה בוצעה במעבדת הרובוטיקה של הנדסת מכונות באוניברסיטת תל אביב. מטרת הבדיקה היתה לבחון את התאמת מערכת הסונר לזרוע רובוטית במשימות מיפוי הסביבה, זיהוי וסיווג עצמים ובחינת יכולת הסונר לזהות עצמים נסתרים (איור 14).

התוצאות הראו כי סריקת חדר שלם אורכת כ- 1 עד 5 דקות, תלוי במיקום הרובוט. מערכת הסונר שנשלטה על ידי הזרוע הרובוטית הצליחה לזהות עצמים שונים כגון צמחים או קירות וכן צורות כגון משטחים.

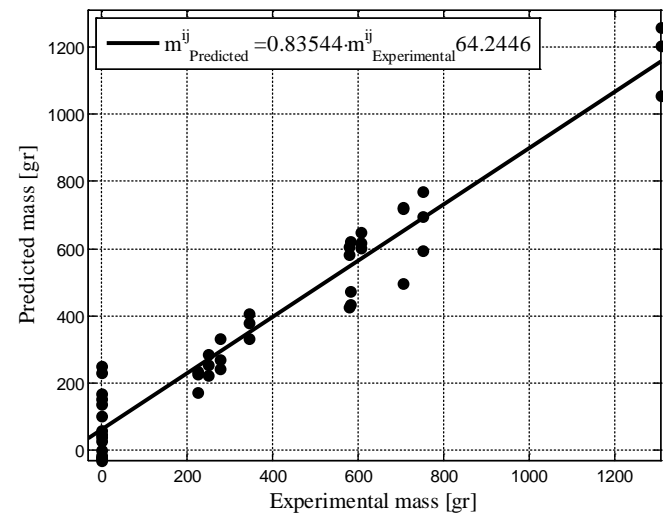
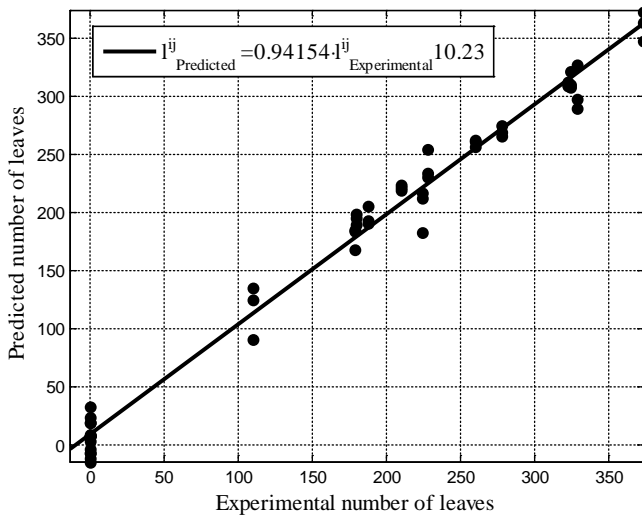


איור 14 : מערך הבדיקה של מערכת הסונר לזרוע רובוטית.

#### 6 פיתוח מודל רשתות עצביות לחיזוי משקל הפרי ומספר העלים בצמח

התוצאות בסעיף 5.2 הראו כי קיים קשר סטטיסטי מובהק בין עוצמת ההחזר האקוסטי בתדרים השונים (אנרגיה) לבין מספר העלים ומשקל הפירות.

פותח מודל רשתות עצביות עם 6 שכבות נסתרות מבוסס אלגוריתם Levenberg-Marquardt. הקלט למודל היו ההחזרים האקוסטיים (האנרגיות) בתדרים המשמעותיים שנמצאו בסעיף 5.2: 20, 33, 68, 96 ו-116 Khz. פלט המודל הם משקל הפירות על הצמח ומספר העלים. 85% מתוצאות הניסוי בסעיף 5.2 שימשו לאימון המודל ו-15% שימשו לבחינתו. בבחינת המודל לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח נמצא כי ההתאם הינו גבוה ועומד על 86% ו-95% ( $R^2$ ) בהתאמה. איור 15 מציג את חיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח כתלות במשקל הפירות האמיתי שנמדד בניסוי עבור מרחק של 1.25 מ' בין מערכת הסונר לצמח. הקו הרציף מייצג את משוואת הרגרסיה הליניארית על פי מודל הרשתות העצביות.



איור 15: חיזוי משקל הפירות (ימין) ומספר העלים (שמאל) בצמח באמצעות מודל רשתות עצביות.

## 7 סיכום ומסקנות

פותחו שני אבי טיפוס של מערכת הסונר. המערכת הראשונה נבנתה לבחינה ראשונית והתאמת טכנולוגיית הסונר לגידולים חקלאיים ועבדה בתחום תדרים של 10 – 150 Khz. מערכת הסונר השנייה כוללת שני חלקים אחד מערכת הסונר והשנייה מערכת ראייה. שני החלקים מחוברים במערכת באמצעות מתאמים שתוכננו וניבנו במדפסת תלת מימדית. מערכת הסונר עבדה בתחום תדרים של 20 – 120 Khz. מערכת הסונר השנייה הותאמה והותקנה לנשיאה על ידי שתי פלטפורמות רובוטיות: פלטפורמה רובוטית לריסוס בחממות שפותחה במכון להנדסה חקלאית וזרוע רובוטית בעלת 6 דרגות חופש.

בוצעו שלושה ניסויים לבחינת הסונר להערכת פירות ועלים ושתי בדיקות של התאמת מערכת הסונר לפלטפורמה רובוטית ולזרוע רובוטית. הניסויים כללו ניסוי מעבדה על פרי או עלה בודדים בכדי לקבוע את החתימה הספקטראלית של פרי או עלה, ניסוי מעבדה על צמחים שלמים לבחינת מספר הפירות והעלים על עוצמת ותבנית ההד החוזר ולהערכת משקל הפירות ומספר העלים בכל צמח; וניסוי בחממה לסיווג העצמים השונים כגון צמחים, שורות צמחים, קירות החממה, הקרקע, עמודים ותשתיות חממה נוספות. הניסויים והבדיקות בוצעו על פלפל ומלפפון.

התוצאות הראו כי החוזר האקוסטי של פרי ועלה בודדים דומה בכל הספקטרום מלבד בשלושה תדרים: 33, 45 ו-70 Khz. בתדרים 33 ו-45 Khz עוצמת החוזר של העלים גבוהה יותר וב-70 Khz עוצמת החוזר של הפרי גבוהה יותר (איור 8). גם ערכי סטיות התקן של עוצמות החוזר האקוסטי שונים עבור עלים ופירות. מאחר והפירות סימטריים יחסית סטיית התקן נמוכה בעוד שהעלים הינם דמויי משטח, הכיווניות שלהם מאוד משפיעה על רמת החוזר ולכן סטיית התקן גבוהה. נמצא כי התדירויות המשמעותיות ביותר בפלפל הן 20, 32, 68, 96 ו-116 Khz. בוצעה רגרסיה לינארית רבת משתנים להערכת האנרגיה המוחזרת עבור תחומי תדרים שונים. בניתוח של תחום תדרים צר נמצאה התאמה של 84% ו-64% ( $R^2$ ) ברמת מובהקות גבוהה ( $P \ll 0.001$ ) בין עוצמת החוזר האקוסטי (האנרגיה) לבין כמות הפירות ומספר העלים בצמח בהתאמה.

פותח מודל רשתות עצביות עם 6 שכבות נסתרות מבוסס אלגוריתם Levenberg-Marquardt לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח. בבחינת המודל לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח נמצא כי ההתאם הינו גבוה ועומד על 86% ו-95% ( $R^2$ ) בהתאמה.

בניסוי החממה נמצא כי ניתן לאפיין את ההחזר האקוסטי מהקרקע ולכן ניתן לנקות אותו מהדגימה ולקבל נתונים נקיים יותר של הגידול. ההחזר מהצמחים של האות האקוסטי הינו יחסית חזק בתחום התדרים של 40 – 60 Khz. בכדי לשפר את זיהוי הצמחים, בוצע ניסוי של עוצמת החזר בעוצמת השידור של ה-CHIRP עבור כל תדירות אשר שיפר את יחס האות לרעש (SNR). באמצעות הסונר ניתן היה לזהות את מיקום שורות הפלפל בערוגות השונות, גם בערוגות ניסיוניות. בהשוואה בין החזר של קיר החממה לבין שורת צמחים נמצא כי ההחזר האקוסטי של קיר החממה יותר צר מאשר הצמחים בכל התדרים שנמדדו וכו' החתימה הספקטראלית שונה בתחום התדרים 70 – 105 Khz. בתחום תדרים זה קיימת הנמכה חזקה בעוצמת החזר של צמחים אך ההחזר מהקיר נישאר גבוה. התוצאות הראו כי באמצעות הסונר ניתן לזהות את מיקום העצמים השונים ולהבדיל ביניהם.

## סיכום עם שאלות מנחות

נא לענות על כל השאלות, בקצרה ולעניין, ב 3 עד 4 שורות מכסימום לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).  
שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

<p><b>1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.</b> פיתוח מערכת הסונר. פיתוח אלגוריתמים להערכת ייבול. התאמת מערכת הסונר לזרוע רובוטית ואיפיון הדרישות מרובוט עתידי.</p>
<p><b>2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.</b> פיתוח שני אבי טיפוס של מערכת הסונר. המערכת הראשונה נבנתה לבחינה ראשונית והתאמת טכנולוגיית הסונר לגידולים חקלאיים ועבדה בתחום תדרים של 10 – 150 Khz. מערכת הסונר השנייה כוללת שני חלקים אחד מערכת הסונר והשנייה מערכת ראייה. מערכת הסונר עבדה בתחום תדרים של 20 – 120 Khz, הותאמה והותקנה לנשיאה על ידי שתי פלטפורמות רובוטיות: פלטפורמה רובוטית לריסוס בחממות שפותחה במכון להנדסה חקלאית וזרוע רובוטית. בוצעו שלושה ניסויים לבחינת הסונר להערכת פירות ועלים ושתי בדיקות של התאמת מערכת הסונר לפלטפורמה רובוטית ולזרוע רובוטית. הניסויים כללו ניסוי מעבדה על פרי או עלה בודדים בכדי לקבוע את החתימה הספקטראלית של פרי או עלה, ניסוי מעבדה על צמחים שלמים לבחינת מספר הפירות והעלים על עוצמת ותבנית ההד החוזר ולהערכת משקל הפירות ומספר העלים בכל צמח; וניסוי בחממה לסיווג העצמים השונים כגון צמחים, שורות צמחים, קירות החממה, הקרקע, עמודים ותשתיות חממה נוספות. הניסויים והבדיקות בוצעו על פלפל ומלפפון. פותח מודל רשתות עצביות עם 6 שכבות נסתרות מבוסס אלגוריתם Levenberg-Marquardt לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח.</p>
<p><b>3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרת המחקר בתקופת הדו"ח.</b> התוצאות הראו כי ההחזר האקוסטי של פרי ועלה בודדים דומה בכל הספקטרום מלבד בשלושה תדרים: 33, 45 ו-70 Khz. בתדרים 33 ו-45 Khz עוצמת ההחזר של העלים גבוהה יותר וב-70 Khz עוצמת ההחזר של הפרי גבוהה יותר (איור 8). גם ערכי סטיות התקן של עוצמות ההחזר האקוסטי שונים עבור עלים ופירות. מאחר והפירות סימטריים יחסית סטיית התקן נמוכה בעוד שהעלים הינם דמויי משטח, הכיוונית שלהם מאוד משפיעה על רמת ההחזר ולכן סטיית התקן גבוהה. נמצא כי התדירויות המשמעותיות ביותר בפלפל הן 20, 32, 68, 96 ו-116 Khz. בוצעה גרסיה לינארית רבת משתנים להערכת האנרגיה המוחזרת עבור תחומי תדרים שונים. בנייתו של תחום תדרים צר נמצאה התאמה של 84% ו-64% (<math>R^2</math>) ברמת מובהקות גבוהה (<math>P &lt;&lt; 0.001</math>) בין עוצמת ההחזר האקוסטי (האנרגיה) לבין כמות הפירות ומספר העלים בצמח בהתאמה. בבחינת מודל הרשתות העצביות לחיזוי משקל הפירות ומספר העלים בצמח נמצא כי ההתאם הינו גבוה ועומד על 86% ו-95% (<math>R^2</math>) בהתאמה.</p>
<p><b>4. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרת המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר.</b> לא רלוונטי</p>
<p><b>5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח - יש לפרט: פרסומים – כמקובל בביבליוגרפיה, פטנטים - יש לציין מס' פטנט, הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום ותאריך.</b></p>
<p>הנושא הוצג בכנס האגודה הישראלית להנדסה חקלאית, בכנס השנתי של הנדסת מכונות, כנס ICR 2016, בסדנת קמ"ח בנושא רובוטיקה בחקלאות מדייקת ובכנס ECPA.</p>
<p><b>6. פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)</b></p>
<p>← רק בספריות</p>
<p>← ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)</p>
<p>← חסוי – לא לפרסם, ניבדקת אפשרות לרישום פטנט על הטכנולוגיות שבפיתוח ומערכת הסונר לחקלאות</p>