

דוח מסכם לתכנית מחקר 20-07-0018

פיתוח מערכת דילול רובוטי לתמר 'מג'הול'

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ע"י:

אביטל בכר¹, אמנון גרינברג², אבי סדובסקי², יובל כהן³, יוסי יובל⁴, זאב שמילוביץ¹, סיגל ברמן⁵, יעל זלצר¹, נוי שרף¹, אהרון הופמן¹, לביא רוזנפלד¹, ליעד רשף¹, עופר בן טובים², יורם סדן², דקל מאיר¹, ענבר בן דוד^{1,4}, אבישי סינטוב⁴

¹המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי; ²מו"פ ערבה דרומית; ³המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי; ⁴המחלקה לזואולוגיה/הנדסה מיכנית, אוניברסיטת תל אביב; ⁵המחלקה להנדסת תע"נ, אוניברסיטת בן גוריון

הניסויים אינם מהווים המלצות לחקלאים

_____ חתימת החוקר _____ תאריך: 14.8.2021 _____

תקציר

תהליכי העבודה בגידול תמרים הינם עתירי ידיים עובדות. עיקר העבודה מושקעת בשלבי הדילול והגדיד: בדילול מושקעים כ- 4 ימי עבודה לדונם וסה"כ כ- 180,000 ימי עבודה בשנה. בגדיד ידני מושקעים כ- 5 ימי עבודה לדונם; פיתוחים טכנולוגיים קיימים ומעבר לגדיד מכני בניעור מאפשרים הורדה של עבודת הגדיד לכ- 2 ימי עבודה לדונם בלבד. לכן, היום צוואר הבקבוק העיקרי בעבודה הינו שלב הדילול. היבול השנתי הצפוי בעוד 10 שנים רק מהעצים הנטועים כיום צפוי להגיע למעלה מ- 50,000 טון. תוספת זו של כ- 40% ביבול ובשטח המניב תצריך תוספת של כ- 80,000 ימי עבודה בדילול תמרים בשנה וזאת ללא תוספת היבול הצפויה מנטיעות חדשות במהלך התקופה.

במהלך מספר עונות דילול פיתחנו מערכת קצה ליישום הדילול, המערכת הנוכחית מבוססת בעיקרה על מצבט חובק ומסור דיסק עגול. המערכת נבחנה ביכולתה לבצע חיתוך סנסנים עם חנטים במידות שונות ועל עצים במטעים שונים. בניסויים לאורך הפיתוח נמצא תמיד שבשיטה הזו הקצב של ביצוע משימת הגיזום של סנסנים לצורכי דילול הוא מהיר עד פי 10 מהגיזום הידני המקובל. ממצא זה מעודד מבחינת הכדאיות הכלכלית של יישום שיטה זו כתחליף לעבודה הידנית. עבודת הדילול היא כיום רבע מהעבודה הידנית המושקעת במטעי מג'הול. הוכחה היכולת לקבל בגישת הדילול שפותחה אשכול המדולל כיאות מחד ומאיך ההתאמה להרכבה על זרוע רובוטית כחלק מרובוט לדילול בתמרים

כולל בתפעול על מתקן עבודה בגובה. במקביל, נמצא כי נדרש לפתח זרוע רובוטית ייעודית המתאימה למשימה זו ובעלויות שיש סיכוי שמגדלים יוכלו לעמוד בהן והנושא נמצא בשלבי בנייה מתקדמים. בוצע תכן של זרוע רובוטית ייעודית לדילול חנטי תמר מגהול על פי המאפיינים שחושבו. המערכת שאופיינה ומפותחת תכיל המערכות הנדרשות להפעלת הרובוט כגון: אנקודרים מובנים, דרייברים ובקרים המיועדים לתקשורת עם מחשב בכדי לבנות מערכת רובוטית לניסוי במטע אשר תכיל את כל המכלולים בפרויקט כגון יחידת חיתוך הסנסנים וחיישנים. המערכת הרובוטית כוללת 5 מנועי סרוו ושתי בוכנות סרוו לינאריות. בנוסף, הוגדרו מאפייני דיוק של 10 מ"מ, ושימוש בתימסורות להפחתת מהירות התנועה והגדלת הכוחות והמומנטים הנדרשים. בוצע ניסוי בדיקת כוחות כיפוף על המוט אשר התבסס על העמדת הדורגל במחצית המוט. בדיקת כוחות העלתה שמדובר בכ- 280 ניוטון.

בוצע פיתוח של אשכולות וירטואליים לצורך אימון אלגוריתמים להערכת גודל האשכול ומציאת מישור הדילול. הוקמו מאגרי תמונות לצורך זיהוי פרמטרי האשכול לתיכנון תנועת הזרוע לדילול. פותחו מספר אלגוריתמים מבוססי צבע ומאפיינים גאומטריים של האשכול לזיהוי נקודת מרכז קצה הידה, זווית הידה ואורך ורוחב האשכול. כמו כן פותח אלגוריתם של זיהוי כיוון האשכול במרחב על פי זיהוי כיוון המסגרת של הסנסנים. רובוט UR5 מודל בסביבת תכנת UNITY ובעזרת חבילת למידת המכונה ML-Agents בוצעה למידה של מסלולי תנועה. הסביבה שמודלה בשלב הראשון הינה הגעה לנקודה (כהכנה להגעה למנח אחיזת הידה מתחת לסנסנים). הלמידה נעשית באמצעות למידת חיזוקים עמוקה עם אלגוריתם Proximal Policy Optimization (PPO) וברשת נוירונים שכוללת 2 שכבות שבכל אחת מהן יש 128 נוירונים.

פותחה מערכת סונר רב ערוצית הכוללת ארבעה משדרים ושמונה מיקרופונים להקלטת הדי חנטיים. המערכת משדרת וקולטת בקצב של 250 קה"צ בכל ערוץ. המערכת נבנתה מחומרה ייעודית ונכתב קוד חדש להפעלתה. בוצעו ניסויים לאיסוף ההדים מאשכולות במעבדה ובמטע. במטע בוצע איסוף של מאות הדי חנטיים לפני ואחרי דילול בעונת הדילול. פותח אלגוריתם להערכת כמות החנטיים בהתבסס על ההדים המבוסס על רגרסיה פשוטה. האלגוריתם הציג יכולות טובות עם שגיאה ממוצעת של 11% ממשקל החנטיים. פותח אלגוריתם לומד לשחזור תלת-מימדי של עצמים, יוצר מאגר מדע של הדים של עצמים תלת מימדיים המדמים פירות ואומנה רשת נוירונים (הכוללת שכבות RNN+CNN), שמקבלת את ההד כאינפוט ומשחזרת את צורתו בתלת-מימד על בסיס הנתונים. הגישה הוכיחה את יכולתה לשחזר צורת עצם תלת מימדי על בסיס ההד שלו. בעתיד, השיטה תוכל לשמש לשחזור תלת מימד של ענף נושא פירות אשר שיאפשר לספור את מספר העצמים (פירות / חנטיים).

בתחום ממשקי אדם-מערכת, על בסיס רמת האוטומציה הרב-מימדית בוצע פיתוח מודל Operational Event Sequence Diagrams (OESD) והוגדרו 5 מרכיבי מערכת ורשימת דרישות המכתיבה את ממשקי-אדם מערכת. כמו כן, הניתוח ממפה את ההתממשקות של רכיבי המערכת המפותחים על ידי הצוותים השונים והאינטראקציה ביניהם. בוצעו צילומים במטעי תמר. על גבי רובוט נייד שפותח במעבדה לרובוטיקה חקלאית במכון וולקני הותקנו שלוש מצלמות, צולמו כ-30 סרטים משלוש מצלמות במקביל (סך הכל 90 קבצי צילום). בסדרת צילומים ראשונה (כ-24 צילומים) הרובוט נסע על הקרקע והקיף את העצים הצעירים תוך צילום רציף של אשכולות העץ. בסדרת הצילומים

השניה (כ-6 צילומים) הרובוט הועמס על במת גובה אל רום העץ (כ-16 מטר). בוצעו צילומים בזמן נסיעה סביב העץ על גבי הבמה, כמו גם צילומים בהם נעשה שינוי כיוון התבוננות זרוע הרובוט לא בנסיעה. על סמך נתונים אלו פותח ממשק משתמש לשיתוף פעולה אדם-רובוט למשימת דילול חנטי תמרים. בוצע ניסוי שימושיות אשר העלה נקודות מרכזיות לשיפור, אשר חלקם יושמו וחלקם ייעדו לשלבי הפיתוח הבאים.

בוצע ניסוי ופוח מודל לתיאור התכונות הפיסיקליות של עלה תמר הרתום לגזע. המודל מדמה קורה רתומה באמצעות מערכת קפיצים אל גזע העץ. פותח קונספט לתנועה של זרוע רובוטית בסביבה עם מכשולים. בוצע ניסוי למדידת תנועת זרוע מומחה אנושי בשלוש משימות רובוטיות: pick and place, ריתוך ודילול חנטיים. פותח קונספט לתיכנון זרוע אופטימלית למשימת דילול חנטיים. נבחנו 7 אלגוריתמי אופטימיזציה שונים למציאת הזרוע הרובוטית המיטבית לביצוע המשימה. פותח אלגוריתם אופטימיזציה חדש (RA-PSO) המבוסס על מודל PSO אשר הראה ביצועים משופרים בקצב ההתכנסות, זמן החישוב וכח המיחשוב הנדרש. באמצעות מודל האופטימיזציה נמצאה הקונפיגורציה הרובוטית המיטבית ונבחנה בסימולציה. נערך ניסוי מעבדה עם זרוע מסוג kinova תוך התאמה של מסלולי התנועה מהזרוע המיטבית שנמצאה.

תוכן עיניינים

5.....	מבוא ותיאור הבעיה	1.
6.....	מטרות המחקר (מתוך הצעת המחקר).....	2.
7.....	סטיות ושינויים מתכנית העבודה המקורית	2.1
7.....	תוצאות המחקר	3.
	פיתוח מערכת מפעיל הקצה של דילול רובוטי ותכן של זרוע רובוטית (בהובלת דר' זאב שמילוביץ ופרופ' אביטל בכר)	3.1
7.....	בחינה ראשונית של מגוון כלים לדילול	3.1.1
7.....	מהלך הפיתוח	3.1.2
15.....	תכנון התנועה הרובוטי ועיבוד תמונה לצורך תנועה (בהובלת פרופ' סיגל ברמן)	3.2
15.....	בסיסי נתונים	3.2.1
18.....	זיהוי פרמטרי אשכולות עבור תכנון תנועת דילול	3.2.2
23.....	תכנון תנועה רובוטית לדילול תמר מג'הול	3.2.3
	פיתוח מערכת סונר לזיהוי אשכולות וכמות חנטיים (בהובלת פרופ' יוסי יובל ופרופ' אביטל בכר)	3.3
	25	
28.....	מערכת תומכת החלטה וממשק אדם-מערכת דילול אוטומטית (בהובלת דר' יעל זלצר)	3.4
	פיתוח מודל כולל לשילוב אדם במערכת האוטונומית וניתוח השלכות על ממשק עתידי ויישום בשטח	3.4.1
28.....	מודל כולל לשילוב אדם במערכת האוטונומית וניתוח השלכות על ממשק עתידי ויישום בשטח... ..	3.4.2
29.....	פיתוח ממשקי משתמש	3.4.3
36.....	אופטימיזציה של זרוע רובוטית לדילול (בהובלת פרופ' אביטל בכר ודר' אבישי סינטוב)	3.5
38.....	ניסוי ומידול התכונות הפיסיקליות של מכשולים גמישים בתמר	3.5.1
43.....	פיתוח קונספט לתיכנון זרוע אופטימלית	3.5.2
44.....	ניסויים ופיתוח אלגוריתם אופטימיזציה	3.5.3
48.....	זרוע אופטימלית	3.5.4
49.....	אינטגרציה	3.6
50.....	דיון ומסקנות	4.
52.....	רשימת ספרות מצוטטת ובתחום	5.

1. מבוא ותיאור הבעיה

התמר מהווה את גידול המטע העיקרי באזורים השחונים של הארץ לאורך בקע הירדן מאיזור הכינרת ועד הערבה הדרומית. ככול שמדרימים הופך ענף התמרים ענף המטעים העיקרי או אף היחיד, וחשיבותו לכלכלת אותם אזורים הינה גדולה מאוד. 'מג'הול' הינו זן התמר העיקרי בישראל, והיקפיו כבר מגיעים לכ-80% מכלל העצים הנטועים. בסוף שנת 2018 היו בישראל כ-44,000 דונם בצפיפות נטיעה ממוצעת של כ-12.3 עצים לדונם, מתוכם כשליש עצים צעירים (מפקד מגדלי התמרים 2017, שולחן תמר במועצת התמרים). הפדיון ליבול מעץ בוגר נע בין 1000 ל-2500 שקל. יבול ה'מג'הול' ב-2018 היה כ-38,000 טון בערך כולל של כ-500 מיליון שקל בשער המטע. ההצלחה הכלכלית גדולה וענף התמר בארץ גדל ברציפות לאורך כ-25 שנה בהיקף שנתי של 5-10%.

תהליכי העבודה בגידול תמרים הינם עתירי ידיים עובדות. עיקר העבודה מושקעת בשלבי הדילול והגדיד: בדילול מושקעים כ-4 ימי עבודה לדונם וסה"כ כ-180,000 ימי עבודה בשנה. בגדיד ידני מושקעים כ-5 ימי עבודה לדונם; פיתוחים טכנולוגיים קיימים ומעבר לגדיד מכני בניעור מאפשרים הורדה של עבודת הגדיד לכ-2 ימי עבודה לדונם בלבד (סדובסקי וחובריו 2015). לכן, היום צוואר הבקבוק העיקרי בעבודה הינו שלב הדילול. היבול השנתי הצפוי בעוד 10 שנים, בחישוב העצים הנטועים כיום, צפוי להגיע למעלה מ-70,000 טון. תוספת זו של כ-40% ביבול ובשטח המניב תצריך תוספת של כ-80,000 ימי עבודה בדילול תמרים בשנה וזאת ללא תוספת היבול הצפויה מנטיעות חדשות במהלך התקופה.

דילול מבוקר של הפרי הינו חיוני במיוחד בזן "מג'הול", בו לאיכות הפרי ולגודלו יש חשיבות מיוחדת. בדילול איכותי ("מקסיקני") פורטים העובדים ומסירים כשניים מתוך כל שלושה חנטים לאורך כל אחד מהסנסנים באשכול וכך מביאים להתפתחות מבוקרת של כ-1/3 מהפירות בכל אשכול, המפוזרים באופן אחיד לאורך כל הסנסנים. שיטה זו הינה עתירת עבודה וכיום כבר כמעט ואינה מיושמת בארץ. אילוצי כח אדם ועלות הביאו לשיטות דילול מהירות יותר, המבוססות על קיצור הסנסן (הסרת חלק ממנו תוך השארת מספר חנטים רצוי), הסרת חלקים מהאשכול (סילוק המרכז - הסנסנים הפנימיים של האשכול) והורדת חלק מהאשכולות של העץ כדי שיביאו לעומס פרי אופטימאלי. חלק מהשותפים לעבודה זו עוסקים בשיטות הורטיקולטוריות לדילול, בין היתר כבר בעת ההאבקה, על ידי שליטה בכמות האבקה ואיכותה באופן שיביא לחנטה חלקית ברמה מבוקרת. עבודות אחרות להן שותפים חברי הצוות עוסקות בהשפעות רמות הדילול על היבול ועל איכויות הפרי המתקבל (סדובסקי וחובריו 2011, סדובסקי וחובריו 2017).

בוצעו מחקרים רבים בנושא הערכת יבול וזיהוי פירות באמצעים שונים (Jimenez et al., 2000). ברובם השתמשו במערכות ראייה כגון מצלמות בתחום הנראה (Linker et al., 2012), הדמיות תרמיות (Stajanko et al., 2004), הדמיות היפרספקטראליות (Safern et al., 2007) ושילוב שלהם (Wachs et al., 2010). הקשיים בשימוש באמצעים הנ"ל כוללים: (1) קושי בזיהוי הפרי. (2) התמודדות עם השפעת תנאי תאורה דינמיים, ו-(3) יכולת מוגבלת לחדור לתוך נוף העץ ולזהות פירות וחנטים מוסתרים. בעץ התמר הבעיה גדולה יותר בגלל מיקומם של מאות חנטים צפופים מאוד על כל אשכול. הפתרון המוצע כאן חדשני ומתבסס על שימוש בגלי קול בתדרים גבוהים – סונר. החוקר המוביל את החלק הסונרי

בפרויקט (יובל) הראה בעבר יכולת לסווג מיני צמחים שונים באמצעות סונר (Yovel et al., 2008; 2009). במחקר חדש פותחה על ידי יובל ובכר מערכת סונר להערכת יבול ומצב הצמח בדיוק גבוה. בניסוי שבוצע על צמחי פלפל התקבלה יכולת אומדן של משקל הפרי על צמח שלם בדיוק של 100 גרם ואת מספר העלים על הצמח בדיוק של 30 עלים (Finkelstein et al., 2017). יתרונו המרכזי של הסונר הוא ביכולתו "לחוש" את האשכול, כולל את אשר בתוכו ללא צורך לביצוע הערכה של חנטים מוסתרים או לבצע דגימה בלבד. הסנסור הסונרי זול יחסית (בהשוואה לחיישנים אופטיים) והחקלאי יוכל לסרוק את החלקה ברמת האשכול ולקבל אומדן מדויק של כמות החנטים. כמו כן, בתוכנית יבוצע מחקר לזיהוי מוקדם של חנטים (וכאלה אשר לא חנטו), זאת באמצעים היפרספקטראליים וטכנולוגיות הקיימים ברשות השותפים, בכדי להגדיל את הדיוק של אומדן כמות החנטים הנדרשת לדילול והארכת והקדמת עונת הדילול.

קבלת ההחלטות לביצוע הדילול צריכה לאפשר למגדל לקבוע את רמת הדילול בהתאם לנתוני ורצונו. נמצא כי דילול המבוצע לאחר 8 שבועות מהפריחה כשהחנטים כבר גדולים משמעותית, פוגע ביבול ואיכותו וכי שיטת הדילול לא משפיעה על גודל הפרי (סדובסקי וחובריו 2011, 2017). פיתוח מערכת דילול מכני אוטונומית משולבת אדם מחייב מחקר משותף הנדסי-ביולוגי. בכדי שניתן יהיה לדלל חנטים באופן מכני יש לפתח את שיטת הדילול הרצויה מההיבטים הביולוגיים / האגרוטכניים בשילוב עם המחקר ההנדסי. המערכת תהיה מבוססת על אמצעי להפלת החנטים או לקיצור הסנסנים אשר יהיה מורכב על זרוע או מערכת אוטומציה רובוטית ומערכת בקרה משולבת אדם. הצעת המחקר הנוכחית עוסקת בכל שלושת השלבים של משימת הדילול ומחייבת שילוב של מחקר הנדסי ומחקר ביולוגי/אגרונומי בכדי להגיע בגמר הפרויקט לאב טיפוס מתפקד מעבר לשלב הוכחת התכנות (proof of concept). מערכת הדילול המכני המורכבת על זרוע רובוטית או מערכת אוטומציה רובוטית תאפשר דילול מהיר, מדויק ואינדיבידואלי לכל אשכול על פי הגדרות המגדל. אחת ממטרות המיזם העיקריות לפתח מערכת חישה להערכת כמות החנטים באשכול על מנת לבצע את הדילול לרמה המבוקשת. בד"כ רצוי להתחיל בדילול רק כאשר המגדלים מזהים בבירור את רמת החנטה בעצים, כחודש עד חודש וחצי לאחר ההאבקה. עד שלב זה בהתפתחות הפרי חלק ניכר מהחנטים הצעירים עתיד לנשור (נשירת הפרי המוקדמת באפריל ומאי). רק לאחר תקופה זו ניתן לזהות את הפרחים שחנטו ויתפתחו לפרי ולהבדילם מאלה שלא מתפתחים כהלכה ושינשרו (נשירה מעטה חלה לאורך כל תקופת הצימוח, ונשירה חזקה נוספת מתרחשת בחודש יוני). אולם אילוצים במטע וכמות העבודה הנדרשת בדילול מכריחים מגדלים רבים להתחיל את הדילול מוקדם יותר, עוד לפני שהם יודעים את רמת החנטה האמיתית. הערכת רמת החנטה (ורמת הנשירה הצפויה של חנטים לא תקינים) מוקדם ככל הניתן תאפשר להגדיל את הדיוק של כמות החנטים שיש להשאיר לאחר הדילול, ולהתחיל את הדילול בעונה מוקדמת יותר, לפני שלב הנשירה המוקדמת.

2. מטרות המחקר (מתוך הצעת המחקר)

המטרה של מחקר זה היא פיתוח אמצעי לדילול מכני מהיר ויעיל של חנטי תמר 'מג'הול' שיאפשר דיוק בדילול, חיסכון בידיים עובדות, בזמן ובעלויות. המטרות הספציפיות הינן :

1. התאמת מערכת החישה המבוססת חיישן סונר ומצלמות לתמרים לשם הערכת כמות החנטיים.
2. שילוב חישה באמצעים היפרספקטראליים לזיהוי האשכולות וסיווג החנטיים.
3. פיתוח מודל ומערכת קבלת ההחלטות עבור רמת הדילול בהתאם להערכת כמות החנטיים ממערכת החישה, עומס הפרי הרצוי ואופיו (גודל פרי) שייקבע על ידי החקלאי וכן מידע אגרוטכני וביולוגי.
4. פיתוח טכניקת הדילול המיטבית המותאמת לדילול מכני מהיבטים אגרונומיים והנדסיים ופיתוח אמצעי מכני לדילול.
5. פיתוח מערכת אוטומציה לשליטה באמצעי החישה והדילול המקבלת מידע ממערכת החישה לשם דילול מדויק ומהיר בזמן אמת.
6. פיתוח ממשק אדם מכונה שיאפשר מעקב אחר פעולת המערכת ותיקון החלטות אוטומטיות כגון: זיהוי אשכול, שיפור מיקום המערכת אל מול האשכול, אפשרות עריכה ואישרור של החלטות המערכת האוטומטית לגבי איפיון חנטיים וביצוע הדילול, חזרה על דילול.
7. אינטגרציה סינרגטית של כל המערכות ופיתוח אב טיפוס להערכת כמות חנטיים ולביצוע הדילול.

2.1 סטיות ושינויים מתכנית העבודה המקורית

באישור ועדת ההיגוי בוצעו השינויים הבאים:

1. דר' יעל זלצר צורפה לצוות התוכנית בנושאי שיתוף אדם מערכת וקבלת החלטות, במקום דר' אמוץ חצרוני שיצא לגמלאות באוגוסט 2018.
2. המשימה לזיהוי האשכול ומיקומו בכדי להביא אליו את כלי הדילול הוקדמה משנה שניה לראשונה ותשולב במערכת S1 - בהובלת פרופ' סיגל ברמן.
3. שילוב מצלמה תרמית בניסוי זיהוי חנטיים – בהובלת פרופ' אביטל בכר, בוצעה בשנה ראשונה.
4. ועדת ההיגוי קיבלה את בקשתו של פרופ' אביטל בכר ואת הנימוקים להאריך בשנה נוספת את המיזם והמליצה להאריך בשנה נוספת את המיזם.

3. תוצאות המחקר

3.1 פיתוח מערכת מפעיל הקצה של דילול רובוטי ותכן של זרוע רובוטית (בהובלת דר' זאב שמילוביץ ופרופ' אביטל בכר)

הדילול המסחרי המבוצע כרגע במטעים באופן ידני על ידי קיצור הסנסנים בשלבים שונים של החנטה עם מזמרה. במרבית המשקים מסירים גם את החלק המרכזי העליון של הידה (הסנסנים הפנימיים והקצרים יותר). מספר הפירות ואורך הסנסן לאחר הדילול תלויים במגדל ובמצב החנטה. פעמים רבות נעשה הדילול במספר שלבים בעונה, ותיקון דילול בשלבים שונים.

3.1.1 בחינה ראשונית של מגוון כלים לדילול

בשנה הראשונה בחנו מספר חלופות לביצוע הדילול. אלו כללו (א) מברשות סובבות בדומה לכלי למריטת עלים בפרחים, (ב) גלילי אצבעות גומי בדומה למריטת עלים בצמחי נוי, (ג) מערכת רטט ידנית כמו אלו המשמשות לניעור זיתים ושקדים, (ד) צורב אלקטרוסטטי, (ה) כלי מסור שונים: דיסק מסור עגול 4.5" - כמו במערכת שפותחה לגיזום רובוטי של נשירים, ובשלב מאוחר יותר מסור דיסק בקוטר 7", מסור ישר (jigsaw) באורך 10" ו- (i) מזמרה הידראולית עם מיפתח של 3.5". במהלך ארבע שנות המחקר פותחו מספר רב של אמצעים לבחינת ישימות הנושא. תיאור מפורט של כלים אלו ותוצאות תפעולם מפורטים בדוחות השנתיים. כאן המקום לציין שכל הכלים נוסו הן במעבדה והן במטע, גם על עצים צעירים (ללא כלי גובה) והן על עצים בוגרים עם כלי גובה. עיקר הניסויים נערכו במטעי קיבוץ אלמוג, במו"פ ערבה דרומית ביטבתה ובטירת צבי ותודתנו נתונה להם על שיתוף הפעולה.

3.1.2 מהלך הפיתוח

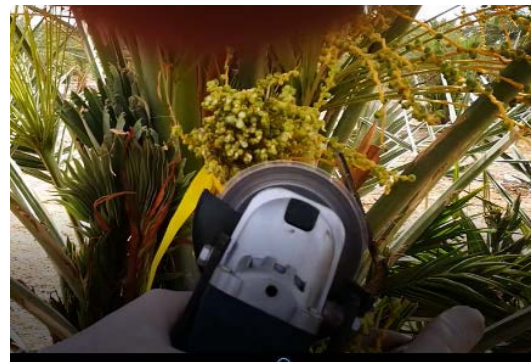
במהלך השנה הראשונה נבחנו הכלים הבאים: מברשות סובבות (מריטת עלים בפרחים), גלילי אצבעות גומי (מריטת עלים בצמחי נוי), מערכת רטט ידנית לניעור זיתים ושקדים. דיסק מסור עגול

4.5"), צורב אלקטרוסטטי. לכלים שנמצא יתכנות נערכו מספר ניסויים בשני מטעים במטע צעיר (אלמוג) ובמטע בוגר (טירת צבי). הניסויים הראו שדיסק חיתוך יכול להוות בסיס לאביזר הקצה של הרובוט ושיעילותו גבוהה מאוד. במקביל הוחלט לשפר את דיוק מקום החיתוך וזווית החיתוך באשכול על פי הניסיון שנצבר. בנוסף, נמצא כי מערכת רטט ידנית לניעור זיתים ושקדים עם אצבעות קצרות קלה יותר לשליטה מאשר המערכת ארוכת האצבעות שנבחנה בניסוי הראשון. אולם, נראה כי נגרם נזק מכאני לחנטים בריטוט. הוכח כי דיסק מסור עגול " 4.5 מבצע חיתוך יעיל ומהיר יחסית. במכשיר זה נמצא כי המראה של הסנסנים החתוכים דומה מאוד לטיפול הרגיל. הפעלת צורב אלקטרוסטטי מחייבת דיוק בתפעול ולוקח זמן רב לביצוע ובמקרה של צריבת ידות לא הניבה תגובה. כבר בשנה זו נאמד זמן הטיפול באשכול בעצים בוגרים בכ-20-15 אחוז מהזמן הנדרש לדילול עם מזמרת יד. בחינת זמני הביצוע בעצים בוגרים הראתה קצב של עד כדקה לאשכול לעומת 5 עד 10 דקות במזמרה. הצריבה בסנסנים גרמה למעין כוויה וניוון של החלק הקדמי. לאחר בחינת האפשרויות לדילול שלעיל ניכר היה כי כדאי להתמקד בחיתוך באמצעות דיסק מסור עגול. כלי זה מבצע חיתוך יעיל ומהיר יחסית (איור 1), המראה של הסנסנים החתוכים דומה מאוד לטיפול הרגיל. בעונה השנייה במהלך המחקר בוצעו הניסויים הבאים:

1. ניסוי בחיתוך מוקדם מאוד, כבר בשלב המתחלים הסגורים ועוד לפני ההאבקה במו"פ ערבה דרומית באמצעות (א: חיתוך בדיסק; ב: חיתוך במזמרה חשמלית; ג: חיתוך במסור ישר).
2. ניסויים מורחבים בטירת צבי ובאלמוג עם דיסק חיתוך בשילוב אביזרים נוספים.
3. ניסוי בשורה שלמה באלמוג וטירת צבי בעצים צעירים וטיפול שלם גם במספר עצים בוגרים.
4. בחינת שיפור הכלים ואבי הטיפול
5. הגדלת קוטר דיסק החיתוך ובדיקתו
6. תכנון ויצירת גובלים שיאגדו את הסנסנים ויובילו את הסכין לנקודת החיתוך הנכונה
7. חיתוך השדרה המרכזית באשכולות עם דיסק מוקטן
8. בחינת הנעה סיבובית של כלי החיתוך באמצעות כבל לצורך הקטנת המתקן שנמצא בקצה
9. תכנון מערכת הקצה לזרוע הרובוטית

במקביל הוחלט לקדם את נושא מערכת חובק ודיסק חיתוך שלב נוסף. ואכן, במהלך שנת המחקר השנייה פותחה ושוכללה מערכת מכאנית אב טיפוס לדימוי מערכת קצה לחיתוך רובוטי. בניסויים ראשוניים נמצא במו"פ ערבה דרומית ביוטבתה שהחובק מאפשר חיתוך טוב. אך החובק העשוי מאלומיניום היה חלש מכאנית, ונמצא כי יש מקום להידוק יותר הדוק. תוצאות הדילול נבחנו איכותית על ידי המגדל בתום עונת הגידול. נמצא כי החתוך מדמה דילול ידני במזמרה, המקובלת לדילול, בצורה טובה. במהלך השנה השנייה למחקר פותחו ונבנו שני אבות טיפוס השונים במערכת החביקה שלהם. עליהם הורכבו שני מנגנוני דיסק: האחד עם מסור דיסק 4.5 אינץ' והשני עם מסור דיסק של 7 אינץ'. המנגנון מיועד לתפעול ידני של אדם אחד או שניים ומאפשר חדירה אל האשכול, סגירה ראשונית סביב ידת האשכול ואח"כ הנעת החובק אל נקודת ההידוק לחתוך, הידוק האשכול וחיתוך על ידי הנעת מערכת הדיסק על גבי מובילים הלוחך ושוב. במערכת האחת (איור 2, 3) החביקה מבוססת צבתות קשתיות ממוט נירוסטה 8 מ"מ. במערכת השנייה (איור 4) החבק בנוי משני ווים ממוט נירוסטה 8 מ"מ

הוא בזווית 90 מעלות כלפי מטה, אלו הסובבים בתשעים מעלות ויוצרים מסגרת מלבנית. ההידוק נעשה באמצעות לחי המקטינה את שטח המסגרת הפתוח. בעונה זו כאמור בוצעו ניסויים בכלים אלו במטעים באלמוג בעצים צעירים (עבודה מהקרקע) ובעצים בוגרים, כמו גם בעצים בוגרים בטירת צבי. הניסויים ותוצאותיהם פורטו בדו"ח השנתי של שנה ב'. במהלך השנה השלישית למחקר פותחה מערכת אב טיפוס לחובק ומערכת חיתוך בהתאמה לזרוע רובוטית עתידית. התאמת אב הטיפוס הנבחר לזרוע ולמערכת האוטומציה כללה תיכון ובחינת אופציות הנדסיות למימוש המערכת בהפעלה אלקטרו-מכנית מרחוק. בדיונים מקצועיים הוחלט בתיאום עם חוקרי הרובוטיקה כי הפעלה אוטומטית מלאה או חלקית על ידי מחשב הרובוט תבוצע בשלבים הבאים של הפיתוח. תיאור סכמתי של אופן עבודת המנגנון מופיעה באיורים הבאים (איור 5): (A) הגעה לידיה עם מצבטי חובקים פתוחים, (B) חביקה רפויה סביב ידת האשכול (C) תזוזה למקום החיתוך והידוק הסנסנים (D) תנועת חיתוך של מסור הדיסק (E) חיתוך הסנסנים (F) נסיגה לאחור, פתיחת החובקים, ומעבר לאשכול הבא.



איור 1: חיתוך חנטים במסור דיסק 4.5 אינץ' איור 2: כלי ראשון המדמה חובק רובוטי מדור ראשון



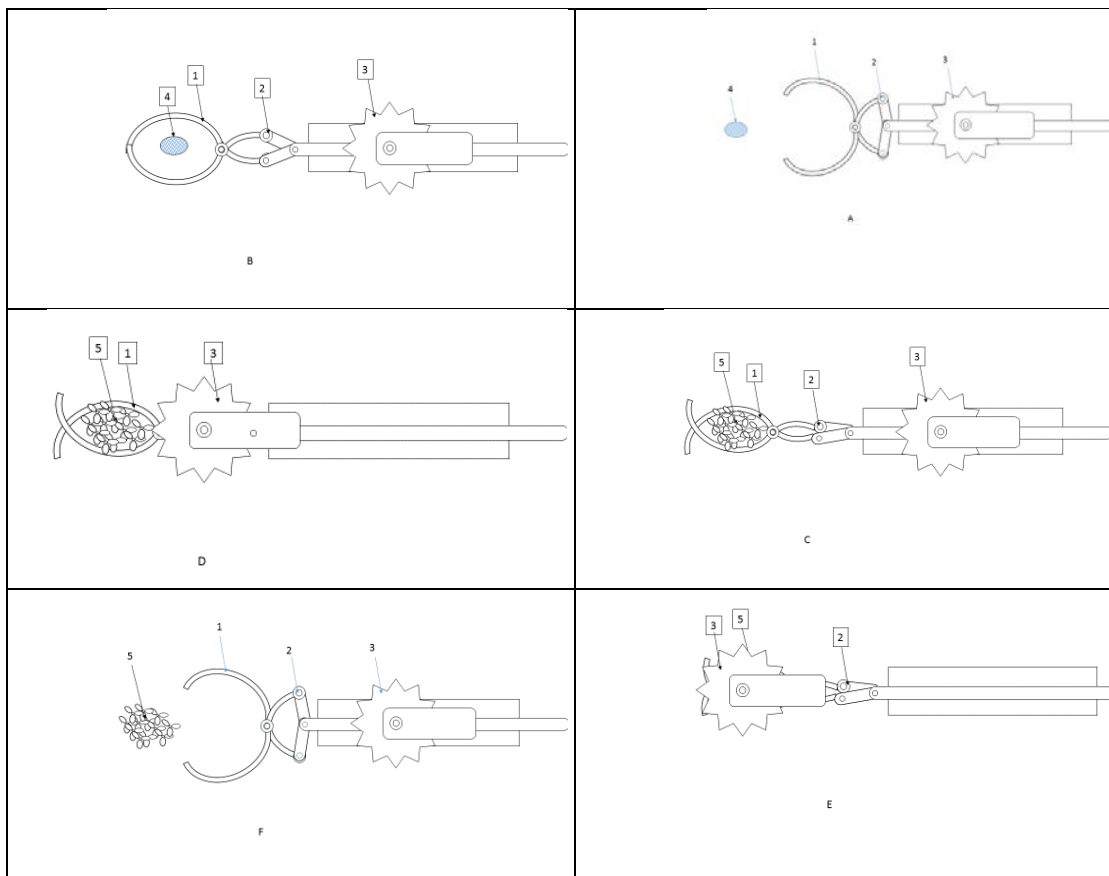
איור 3: חובק עם מערכת צבתות ומסור דיסק בקוטר 7".



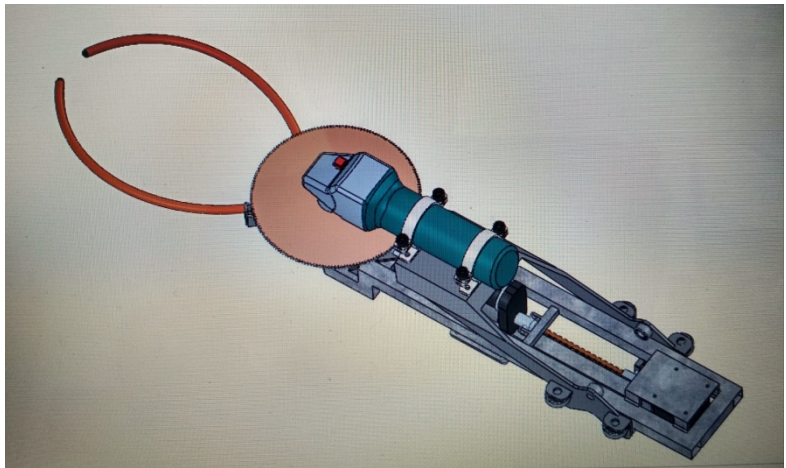
איור 4: חובק עם מערכת צבתות בצורת L.

התיכון ההנדסי שנמצא כאופטימלי מתואר איור של תיב"מ באיור 6. במערכת זו מנגנון החביקה וההידוק מבוסס מצבטיים המונעת על ידי בוכנה חשמלית עם אפשרות עצירה בכל נקודה. המסור מונע על גבי מובילים מקבילים באמצעות שרשרת חוליות המונעת על ידי מנוע חשמלי המאפשר מהלך קדימה לחיתוך ולאחור לנקודת ההתחלה. מקור הכוח הוא מצבר 12 וולט, השליטה על הפעולה היא באמצעות מתגים של ג'ויסטיק.

המערכת נבנתה במכון להנדסה חקלאית. בשלב ראשון נוסתה במעבדה כשהיא מורכבת על שולחן כמתואר באיור 7. נבחנו שני מצבים - מערכת מאוזנת, היינו הדיסק מקביל לקרקע, ומערכת מסובבת בתשעים מעלות (הדיסק ניצב לקרקע). מספר אשכולות הובאו אל אזור המצבטיים ונעשה דימוי בהיפוך של תנועת הזרוע הרובוטית על ידי תנועת האשכול, האשכול נחבק ובוצעה פעולת חיתוך. בשני המצבים הגענו לחיתוך הולם. תמונות המתעדות ניסוי זה מתוארות באיור 7. בשלב הבא הורכבה המערכת על זרוע רובוטית במעבדת הרובוטיקה שבאוניברסיטת בן גוריון (איור 8).



איור 5: תיאור סכמתי של אופן עבודת המנגנון האלקטרו-מכאני. (a) תנועה לעבר ידת האשכול; (b) סגירה רפויה סביב ידת האשכול (c) עליה לאורך הידה והסנסנים עד לנקודת החיתוך המתאימה; (d) ו- (e) תנועת הדיסק קדימה וחיתוך הסנסנים. (f) פתיחת הגובלים ושחרור האשכול ומעבר לאשכול הבא. 1. גובלים. 2. בסיס הגובלים. 3. סקין דיסק, 4 – ידת האשכול, 5. הסנסנים בנקודת החיתוך.



איור 6: שרטוט של התיכון ההנדסי למערכת אלקטרו-מכאנית שנמצאה אופטימלית



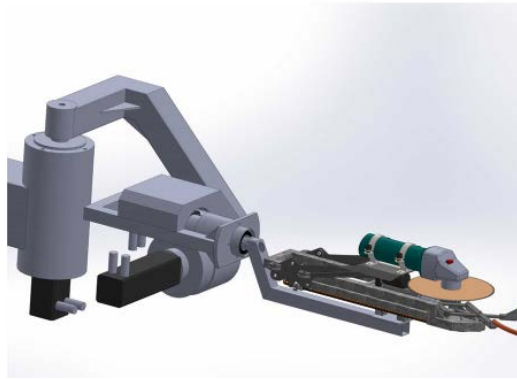
איור 7: ניסוי במערכת אלקטרו מכנית עם הפעלה מרחוק במעבדה עם דיסק במצב מאונך ובמצב מאוזן.



איור 8: מערכת חיתוך אלקטרו-מכאנית, עם שליטה מרחוק, מורכבת על רובוט MOTOMAN במעבדת רובוטיקה באוניברסיטת בן גוריון (אצל מעבדת פרופ' סיגל ברמן).

בעקבות הקשיים לעבוד עם אשכול בעל חנטיים גדולים הוחלט לנסות לפתח זרוע ייעודית. נעשתה הערכה של הכוחות הפועלים בקצה הזרוע (נמצא שכעד 300 ניוטון), ושל אורך הזרוע הדרוש (מינימום 2 מטר) מה שמביא למומנט מרבי של 700 ניוטון מטר [NM]. על פי נתונים אלו חיפושנו אחר זרוע מסחרית העלו אפשרויות שעלותם החל מ-100 אלף דולר ויותר. נעשתה חשיבה שמא אפשר לבנות מערכת זולה יותר באופן עצמי כשהוזלת העלויות תתבסס על כך שהמערכת תהא מנוונת מבחינת דיוק (סוכם כי ניתן להסתפק בדיוק של ± 1 ס"מ, לעומת חלקי מ"מ שמקובלים בדרך כלל בזרועות רובוטיות מסחריות) וגם מהירות הביצוע תופחת במידת הצורך (בגלל שימוש בתמסורת הפחתה כדי לקבל כוחות ומומנטים נדרשים תוך שימוש בממדים סבירים). שלבי התיכון עברו סדרה של בחינה חוזרת תוך כדי בדיקת אופציות זמינות בישראל ליחידות הנעה מסחריות. נתקלנו בקשיים של זמינות חלקים עקב הקורונה ופעילות מסחרית מוגבלת של החברות בארץ ובעולם. בשלב זה יש תיכון של מערכת שנראה כי יכולה לעמוד בדרישות ולהישאר בעלויות חומרים של כ-60 אלף ש"ח (הערכה היא שתהיה התייקרות נוספות שבגלל מחסור עולמי במכולות אבל עדיין בעלות נמוכה בהרבה ממערכת חלופית מסחרית ובסדרי גודל שנוכל לעמוד בהם). המערכת המוצעת תכיל כבר הכנה להפעלה רובוטית עתידית היינו : אנקודרים מובנים, דרייברים ובקרים המיועדים לתקשורת עם מחשב בעתיד. המטרה היא לבנות מערכת לניסוי במטע כמו גם מערכת שבה תהא הכנה לקליטת אלמנטים נוספים של המיזם כגון מצלמה ו/או יחידת סונר. המערכת כוללת 5 מנועי סרוו ושתי בוכנות סרוו לינאריות. מראה כללי של התכנון מוצג בתמונות 9 ו-10 שלהלן. למערכת זו בוצעו תיכון מלא ומפורט מחד ובחינת אפשרויות רכש זמינות מאידך. עידן הקורונה יצר קשיים לאורך הדרך גם מבחינת עלויות וגם מבחינת זמינות. נתונים השתנו כל הזמן. בעיות לוגיסטיקה ורכש מנעו מאיתנו לעמוד עם מערכת בנויה בעונת הדילול 2021. נבחנו בעונה זו כאמור חלופה ידנית לסימולציה של עבודת הרובוט. בימים אלו (כתיבת הדו"ח) מקודם נושא בניית הזרוע הרובוטית בייצור עצמי באמצעות רכש ומיקור חוץ לעבודות חיתוך בלייזר. היעד להגיע לעונת דילול 2022 לא הושג עקב בעיות תקצוב ולוגיסטיקה (כולל בעיות אספקה עולמית של ציוד עקב הקורונה) . התהליך בעיצומו בבית המלאכה של המכון להנדסה חקלאית (ראה איור 13).

מרגע שהנושא הובן בחרנו בחלופה של חיבור המערכת אלקטרומכנית לביצוע הדילול כולל שליטה מרחוק למדמה זרוע. המדמה שנבנה מבוסס על מוט עגול בקוטר 50 מ"מ ודורגל עם מערכת מסוב עם חופש מרחבי. אלו מאפשרים תנועה למעלה/למטה, קדימה ואחורה וגם סיבוב. תיאור המערכת באיור 11. הצלחנו להגיע עם מערכת זו לניסיונות במטע. הניסיונות בוצעו במטע אלמוג. המערכת נבחנו בעצים צעירים בשני מועדים במרץ ובתחילת אפריל, כל פעם ב-5 עצים. כאשר הדורגל מונח על הקרקע במרחק של 1.5-2 מטר מהעץ. כמו כן באפריל בחנו את המערכת על 2 עצים (בוגרים) בשני זמנים של הגידול, כשהדורגל הורכב על כלי גובה (ראה באיור 12).



איור 10: מבט מקרוב אל קצה התפעול המערכת המתוכננת



איור 9: מראה כללי המערכת המתוכננת



איור 12: ניסוי באלמוג עם המדמה כאשר הדורגל על כלי הגובה.



איור 11: ניסוי באלמוג עם המדמה כאשר הדורגל על הקרקע



איור 13: זרוע רובוטית ייעודית - חלקים מכאניים בבנייה.

במהלך השנה השנייה נבחנו תוצאות הדילול בשלב הפרי הצהוב לפני הגדיד ונמצא כי רוב האשכולות דוללו כהלכה, מספר הפירות וגודלם דומה לעצי הביקורת בבדיקת ראייה של המגדל וחוקר המטעים. בחלק מהאשכולות, כפי נחוזה גם בעת ביצוע הדילול, נמצא כי החיתוך אינו סימטרי ומספר של סנסנים היה בעומס גדול ובאחרים הוא מופחת. לעיתים נתגלו סנסנים שחמקו מהחובק ולא דוללו כהלכה. הערה: כאמור בשלב זה עדיין נבחנה האפשרות לבצע חיתוך של מתחלים (כשהסנסנים עדיין לא נפתחו) אך נתגלה שהחיתוך קשה לפעמים ובעיקר קשה להחליט על מיקום נכון של נקודת החיתוך. לא נמצאו נזקים לתמרים גם כשהיו הזזות יחסית בכוח לאורך האשכול בעת התמקמות לקראת חיתוך. במועד השני לא נמצא הבדל בתום העונה בין החובקים או בין הדיסקים. זמני תפעול שנבדקו הראו זמן תפעול של כדקה מאשכול לאשכול במקומות בהם הגישה הייתה נוחה בעיקר בעצים צעירים, זמן החיתוך עצמו 5 - 10 שניות. בעצים הצעירים היו בממוצע 8 אשכולות ובעצים הבוגרים כ- 20 אשכולות. במטע בוגר בטירת צבי נערכה בחינה בסוף עונת הגידול של עצים שטופלו בכלים הנ"ל לעומת עצי הביקורת הסמוכים. הבחינה הראתה על דעת המגדל וחוקר המטעים (ד"ר יובל כהן) שבמרבית האשכולות תוצאות הדילול הניבו תוצאה דומה ללא כל נזק ניכר. נמצא גם שדיסק בקוטר 7 אינץ' מקל על החיתוך מחד ומאידך עדיין מאפשר גישה טובה אל האשכולות אך חייב משנה זהירות ברמת הבטיחותית, ופוחת כלוב מגן מיוחד לשם כך. בשנה השלישית בוצעו תכנון בניה ופיתוח של מערכת אלקטרומכנית לביצוע הדילול כולל שליטה מרחוק. בנוסף בוצע בהצלחה חיבור יחידה אלקטרומכנית לביצוע דילול רובוטי אל רובוט מעבדתי במעבדת הרובוטיקה של אוניברסיטת בן גוריון בתום עונת הדילול של 2020. במעבדה הוכחה יכולת זרוע רובוטית עם מתקן החיתוך והחביקה בשליטה ידנית מרחוק לבצע את הפעולות הבאות: לנוע אל ידת האשכול, לחבוק ברווחה את הידה, לנוע אל נקודת חיתוך באזור הסנסנים, לחבוק ולהדק את הסנסנים, לבצע חיתוך של הסנסנים, לשחרר את האשכול, לסגת חזרה לנקודת ההתחלה. בכך הצלחנו לבצע סימולציה של הפעולות הנדרשות לדילול רובוטי כל עוד החנטים היו קטנים או כמות הסנסנים קטנה, בעומס גדול המערכת התקשתה לנוע בחופשיות. מכאן המסקנה בשלב זה הייתה שאין ברשותנו זרוע רובוטית חזקה מספיק לביצוע הדגמת יכולת במטע עצמו. כאמור בשלב ביניים בוצעו ניסויים עם דורגל ומוט הארכה המדמה זרוע רובוטית ותוצאות הדילול נבחנו על ידו ועל ידי המגדל עצמו ודר יובל כהן מצוות המחקר. בעצים צעירים ברוב המקרים הדילול היה תקין ומספק היו מקרים שסנסנים בודדים הצליחו לחמוק מהדילול ומספר מקרים בודד, של דילול יתר או חסר כמו גם חיתוך לא אחיד עקב זוויות גישה אלכסונית מדי של מתקן החיתוך. ההשוואה בין הביקורת לניסוי הראתה שיש יתרון קל מאד לגודל בדילול הידני בעיקר במקומות שהמרכז שהושאר על ידו לא התנוון. מאידך יש לציין שבעצי הדילול הידני הוסרו גם מספר אשכולות להקלת העומס שלא כך אצל עצי הדילול המכאני (עקב אי הבנה בינו לבין המגדל שהבין שאין לגעת כלל בעצי הניסוי). הדילול בעצים בוגרים היה חלקי והוא הופסק במהלך הניסוי עקב כשל מכאני (כיפוף חוזר ונשנה של המלקחיים הלופתות) המוט הארוך גרם להפעלת כוחות מרביים על המערכת, בדיקת כוחות העלתה שמדובר בכ- 280 ניוטון (דומה להערכת התכנון לעיל). בנוסף, הגישה אם המוט הארוך הביאה לחביקה אלכסונית ולדילול לא אחיד של הסנסנים.

3.2 תכנון התנועה הרובוטי ועיבוד תמונה לצורך תנועה (בהובלת פרופ' סיגל ברמן)

3.2.1 בסיסי נתונים

בתחילת הפרויקט לא היו בנמצא בסיסי נתונים של אשכולות מג'הול בתקופת הדילול. לכן לבחינה ופיתוח האלגוריתם השונים הוקמו ארבע בסיסי נתונים של אשכולות תמר מג'הול: אשכולות במעבדה, אשכולות וירטואלים, אשכולות ממורכזים, אשכולות לא ממורכזים.

אשכולות במעבדה (איור 14) – תשעה אשכולות שנגדדו בתקופת הדילול מרץ 2018 הועברו למעבדה וצולמו במתקן מיוחד יחד עם כפות תמר כשהם מוטים בשלוש זוויות שונות ביחס לאנך (איור 14). על הכפות סומן מיקום הדילול הנדרש על ידי domain expert.

אשכולות וירטואליים (איור 15) – פותח מודל סטוכסטי של מבנה אשכול המג'הול לאורך תקופת הדילול. המודל כולל הגדרה של התפלגויות עבור 10 מאפיינים של אשכול מג'הול ו-4 מאפייני תצורת של כל סנסן במרחב. מאפייני האשכול שהוגדרו הינם: רוחב הידה-רדיוס ראשי, רוחב הידה-רדיוס משני, אורך מדרגות, אורך הסנסן, מספר סנסנים, מרחק החנט הראשון, מבסיס הסנסן, קוטר חנט, מרחק בין חנטים, קוטר סנסן. האפיון הגאומטרי התלת מימדי של כל סנסן במרחב נעשה בעזרת עקומות בזייר (עבורן הוגדלו נקודות ההתחלה והסיום והגזרות המרחביות בנקודות אלו). פרמטרי המודל הוגדרו עבור כל דור (עליון, אמצעי, תחתון) ושלב בתקופת הדילול (התחלה, אמצע, סוף). בעזרת המודל הוגדלו אשכולות וירטואלים בתקופות שונות ובדורים שונים והוצגו בעזרת חבילת OpenGL בשפת פייטון (איור 15). מיקום הדילול הנדרש חושב על פי מספר החנטים לאורך הסנסנים במרכז האשכול, בהתאם לתקופת הדילול (Bar-Shira et al., under review; Bar-Shira et al., 2019). אשכולות ממורכזים (איור 16, 17) - בעונת הדילול 2019 נערך מאמץ מרוכז לאיסוף תמונות של אשכולות בשלב דילול. לשם כך פותחו מתקן לשילוב חיישנים ותוכנות דגימה (מצלמת SDLR, מצלמת תלת מימד וחיישן מרחק ליזר). התמונות נאספו באלמוג ובמופ ערבה דרומית. בסיס הנתונים כולל 146 תמונות של אשכולות מג'הול מעשרה עצים שונים וסומנו בו נתוני אמת (מסכות סנסנים וידות, קו דילול וכיוון סנסנים). בסיס נתונים זה הועלה למאגר ציבורי (Shoshan and Berman, 2021).

אשכולות לא ממורכזים (איור 18, 19) – בעונת הדילול 2020 צולמו תמונות של אשכולות ללא הכוונת האשכול למרכז התמונה במהלך עונת הדילול. שתי מצלמות ניקון D5600 זהות הוצבו בתוך מעמד כך שיהיו באלכסון אחת לשניה (מרחק 25 סמ' במישור האופקי ובמישור האנכי). שתי המצלמות הופעלו מרחוק באמצעות אפליקציה בטלפון חכם. המעמד כוון אל עבר אשכולות שונים ושתי תמונות משתי המצלמות נעשו בו-זמנית. איסוף התמונות נעשה במו"פ ערבה דרום. נאספו זוגות של תמונות של 87 אשכולות מ-4 עצים וסומנו בו נתוני אמת (מסכות סנסנים וידות). בסיס נתונים זה יעלה בקרוב גם הוא למאגר ציבורי (Regev and Berman, 2022).



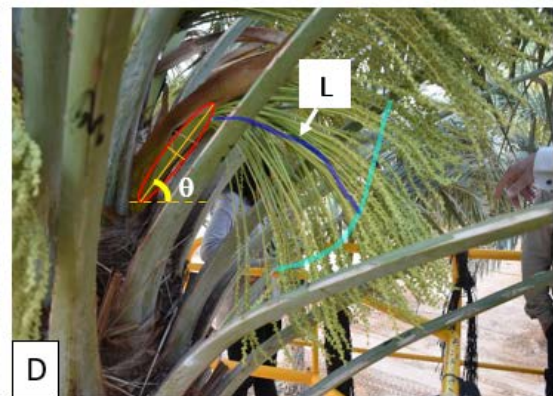
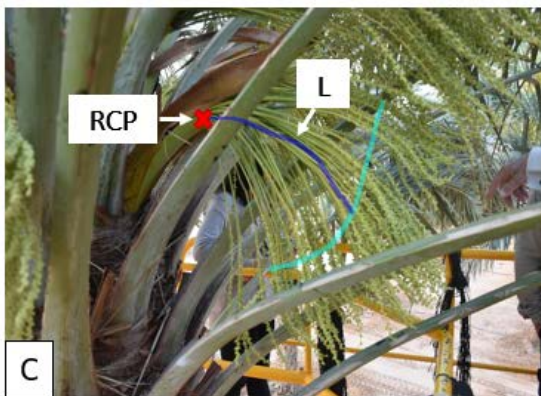
איור 14: אשכולות במעבדה עם כפות תמר בשלוש זוויות ביחס לאנך.



איור 15: אשכולות וירטואליים. משמאל אשכולות פסיקליים, במרכז אשכולות וירטואליים, מימין אשכולות וירטואליים נטועים בתמונה של תמר פסיקלי. למעלה דור עליון תקופת דילול ראשונה. למטה דור אמצעי תקופת דילול שניה.



איור 16: מתקן החזקת הציוד (מצלמת SDLR, RGBD, וחיישן מרחק ליזר). A, B. מתקן ראשוני עם הרבה דרגות חופש שנמצא מורכב מדי עבור צילום ברום העץ. C. מתקן ידני.



איור 17: אשכולות ממורכזים. A. סימון הדילול הנדרש על ידי מומחה תמר. B. סימון מסכת האשכולות על התמונה ללא סימון המומחה. C. סימון נקודת מרכז קצה הידה, כיוון הסנסנים וקו הדילול. D. סימון זווית הידה.



איור 18: מימין שתי המצלמות ממוקמות באלכסון אחת לשני בתוך מעמד. משמאל המעמד על מתקן הגובה במו"פ ערבה דרום במהלך הצילומים.



איור 19. דוגמא לשתי תמונות מזווית שונה של אותו אשכול. בתמונה מימין קשה להבחין בידה. בתמונה משמאל קל יותר.

3.2.2 זיהוי פרמטרי אשכולות עבור תכנון תנועת דילול

פתחו מספר אלגוריתמים לזיהוי פרמטרי האשכולות ואורך הנדרש של הסנסנים לאחר דילול.

האלגוריתמים נבחנו בעזרת מאגרי הנתונים השונים.

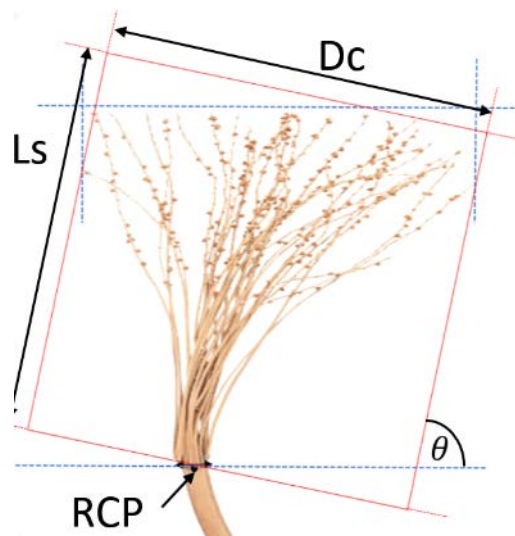
אשכולות במעבדה – פותח אלגוריתם מבוסס צבע ומאפיינים גאומטריים של האשכול (שימוש במרובע חוסם) לזיהוי נקודת מרכז קצה הידה, זווית הידה ואורך ורוחב האשכול (איור 20). בבחינת פעולת האלגוריתם היה קושי זיהוי נקודת החיבור בין הסנסנים לבין הידה כאשר האשכול בזווית גדולות אל מול האנך 20 מעלות ומעלה (Shoshan et al., 2022). הפרדה נכונה בין הסנסנים לבין הידה הינה היבט קריטי של האלגוריתם, לכן תמונות שבהן הטעות בזיהוי נקודה זאת הייתה מעל סף (חצי רוחב ידה ממוצע), נפסלו. הטעות הייתה נמוכה מהסף ב-78%, 56% ו-33% מהתמונות עבור זוויות 12° , 20° ו- 25° בהתאמה. עבור התמונות שלא נפסלו התקבלו התוצאות מפורטות בטבלה 1. לאור ממצאי זיהוי פרמטרי האשכולות במעבדה וערך שגיאה יחסית גבוה למדד L_s , נעשה מעבר לשימוש באלגוריתמים מתקדמים יותר של עיבוד תמונה מבוססי רשתות נוירונים. באלגוריתמים אלו לא ניתן היה להשתמש במעבדה בגלל הצורך בבסיס נתונים גדול. בחינה ראשונית של שימוש ברשתות נעשתה

על בסיס האשכולות הוירטואליים ולאור ההצלחה הגדולה, הושקע מאמץ גדול לבנית בסיס נתונים של תמונות של אשכולות בשדה ופיתוח אלגוריתמים בעזרתו. האלגוריתמים שפותחו השיגו תוצאות טובות באופן משמעותי כפי שמפורט בהמשך העבודה. מעבר לתרומה המשמעותית לפיתוח אלגוריתם זיהוי האשכולות ומציאת אורך הדילול, מדובר בבסיס נתונים ראשון מסוגו של אשכולות תמר מג'הול. בסיס הנתונים זמין לציבור הרחב.

טבלה 1: תוצאות פרמטרי האשכול שהופקו מאלגוריתם עיבוד התמונה.

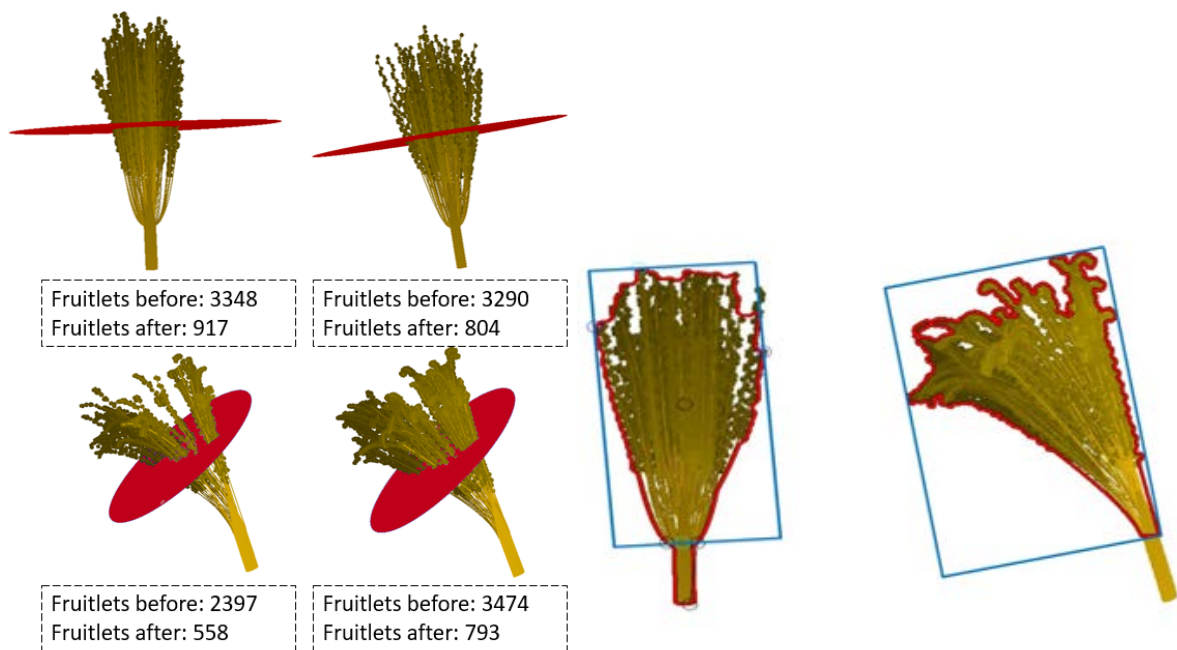
RCP_Y [mm]	RCP_X [mm]	Theta [°]	Dc [mm]	Ls [mm]	
7.3%	9.5%	8.3%	8.3%	18.4%	שגיאה ממוצעת באחוזים

RCP – Rachis center point. Theta – Spikelet's orientation. Ls – Spikelet's length. Dc – Spikelet's width



איור 20: למעלה: פרמטרי האשכול הדרושים לצורך תכנון תנועה, למטה: דוגמאות זיהוי.

אשכולות וירטואליים – פותח אלגוריתם עיבוד תמונה להפקת פרמטרי האשכול הדרושים לתנועה מתוך צילומי מסך של המודלים (איור 21). הפרמטרים שימשו ללימוד הקשר בין דרישות המשימה (היכן יש לחתוך את הסנסנים) לבין הפרמטרים של האשכול.

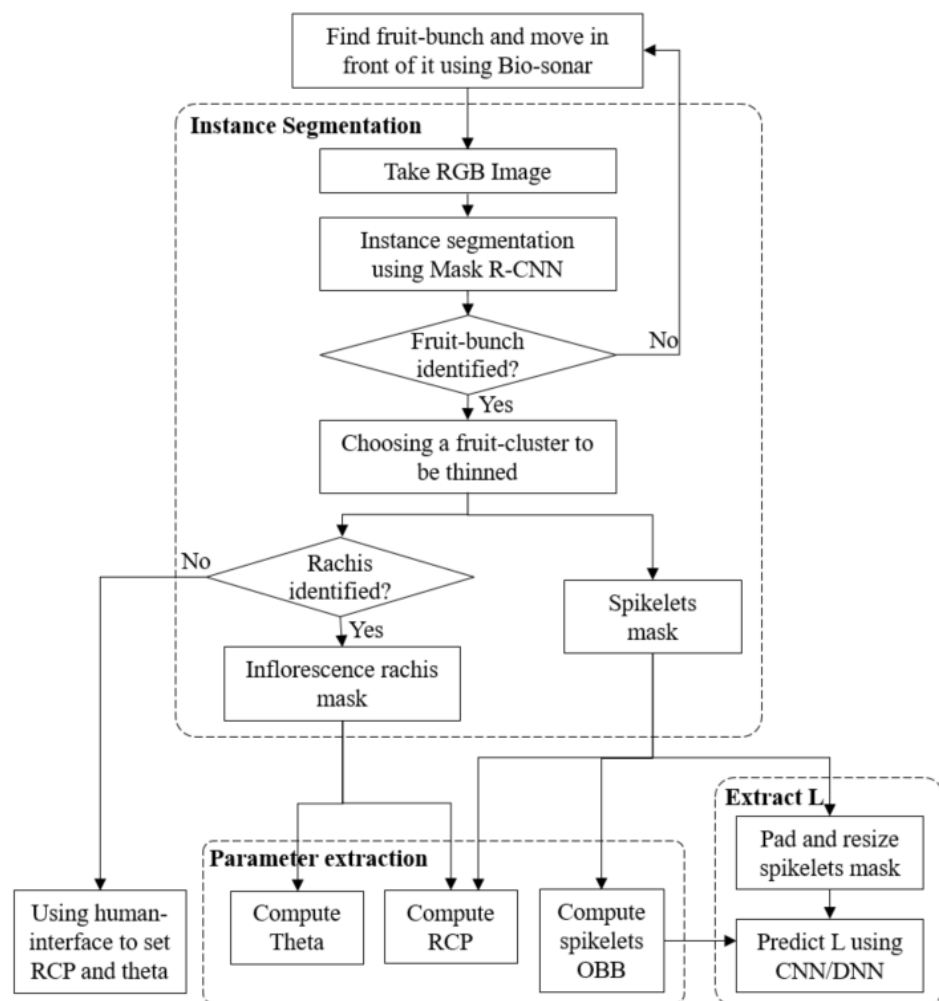


איור 21: למעלה: מימין דוגמאות לאשכולות סינטטיים וזיהוי אורך הדילול שלהם. משמאל זיהוי האשכולות.

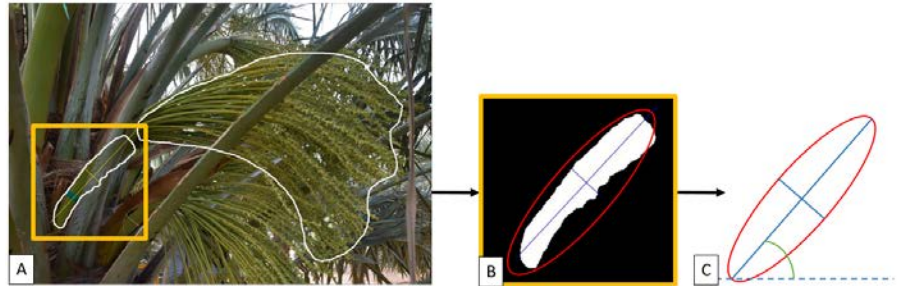
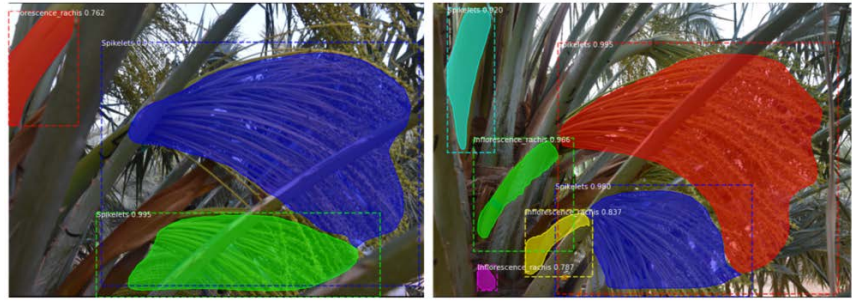
אשכולות ממורכזים - פותח אלגוריתם (איורים 22, 23) לזיהוי פרמטרי האשכול (מרחק החיתוך, זווית הידה ונקודת קצה הידה): מרכז הידה על קו הקצה של קו הגדילה של הכתר התחתון של הסנסנים). האלגוריתם זיהה בהצלחה סנסנים וידות (F1-score מעל ל-80%), חישב את זווית הידה (שגיאה ממוצעת כ-6 מעלות) וכן את נקודת קצה הידה (שגיאה ממוצעת כ-2 ס"מ, איורים 22-24). חישוב אורך מסלול הדילול נעשה בשתי שיטות שונות (שימוש ברשת קונבולוציה או ברשת רגרסיה). אולם השגיאה הנמוכה ביותר היא של כ-16% שהיא גבוהה יחסית. השגיאה נובעת כנראה גם מכך שבסיס הנתונים אינו גדול וגם כי יש קושי בסימון מרחק הדילול על ידי הצבעה בעזרת היד בניגוד לחיתוך בפועל.

אשכולות שאינם ממורכזים - בעבודה הקודמת זוהו קושי בזיהוי ידות. לאחר בחינה של ארבעה אלגוריתמים שונים (חיפוש סנסנים ואחר חיפוש ידה, חיפוש אשכול ואחר חיפוש סנסנים וידה, חיפוש ידות ואחר חיפוש סנסנים ושילוב של בחינת החפיפה עם מסכת האשכול וחיפוש ידה וסנסנים) נראה כי הבעיה הבסיסית קשורה בהסתרה של הידות. מכיוון שהידה קרובה יותר לגזע התמר ומכיוון שבחלק מהמקרים בתקופת הדילול הידה עדיין מוסתרת בתוך המתחל. פותח אלגוריתם של זיהוי כיוון האשכול במרחב על פי זיהוי כיוון המסגרת של הסנסנים. האלגוריתמים מבוסס על שימוש במסנן Savitzky-Golay יחד עם קביעת סף אופטימלי בשיטת Otsu (איור 24). לאחר מכן נעשה זיהוי קווים בעזרת התמרת Hough. מתוך הקווים שנמצאו נלקחו 15 הקווים שהכי מיוצגים בקלט (כלומר שמספר הפיקסלים המשוייכים אליהם הכי גבוה) והם חולקו לאשכולות בעזרת אלגוריתם k-means. מספר האשכולות האופטימלי נקבע בשיטת - Elbow עבור התחום $k=1...4$. המספר 15 נקבע באופן אמפירי.

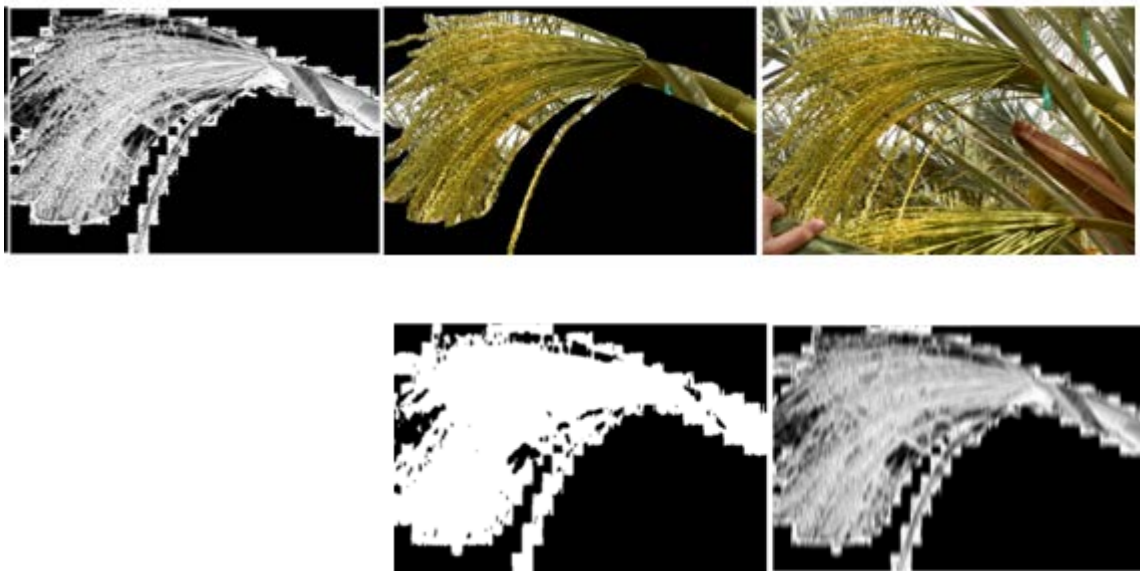
לאחר מכן נמצאו כל נקודות החיתוך בין הקווים בכל קבוצה. נקודות החיתוך נמצאו בעזרת אלגוריתם חיפוש נומרי (INTERX ב-MATLAB) של נקודות חיתוך בזוגות על פני כל זוגות הקווים בקבוצה. הקבוצה בעלת מספר נקודות החיתוך הגבוה ביותר נבחרה וכיוון האשכול נקבע על פי הזווית הממוצעת של הקווים בקבוצה זאת (איור 25). האלגוריתם הופעל עבור מאגר הנתונים (הכולל 114 תמונות בהן ניתן לראות ידות). ב-89.5% מהתמונות האלגוריתם מצא נקודות חיתוך באחד האשכולות ובתמונות אלו השיגה הממוצעת בזווית שנמצאה היתה של 28.3° (סטית תקן 23.7°). ערך זה אינו גבוה ומתאים להמשך הכוונת הרובוט לכיוון הידה.



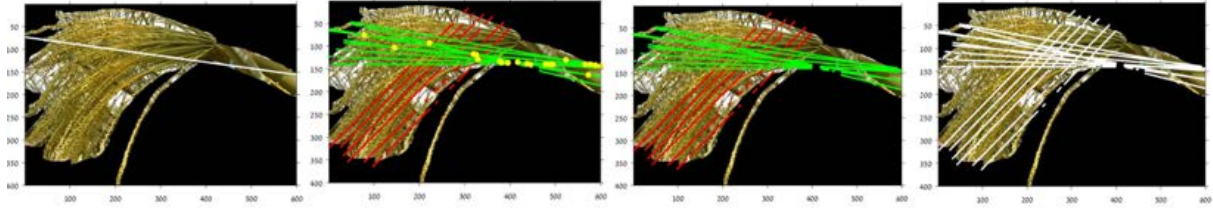
איור 22: אלגוריתם זיהוי פרמטרי אשכולות תמר



איור 23: למעלה - סימון אוטומטי של סנסנים וידות, באמצע - מציאת נקודת קצה הידה, למטה - מציאת זווית הידה



איור 24. למעלה מימין לשמאל – תמונה מקורית, האשכול לאחר שזוהה ובודד, מישור הסטורציה מהמרת האשכול למישור HSV. למטה מימין לשמאל – מישור הסטורציה לאחר שימוש בפילטר Savitzky-Golay, התמונה הבינרית לאחר שימוש בסף שנמצא על פי שיטת Otsu.



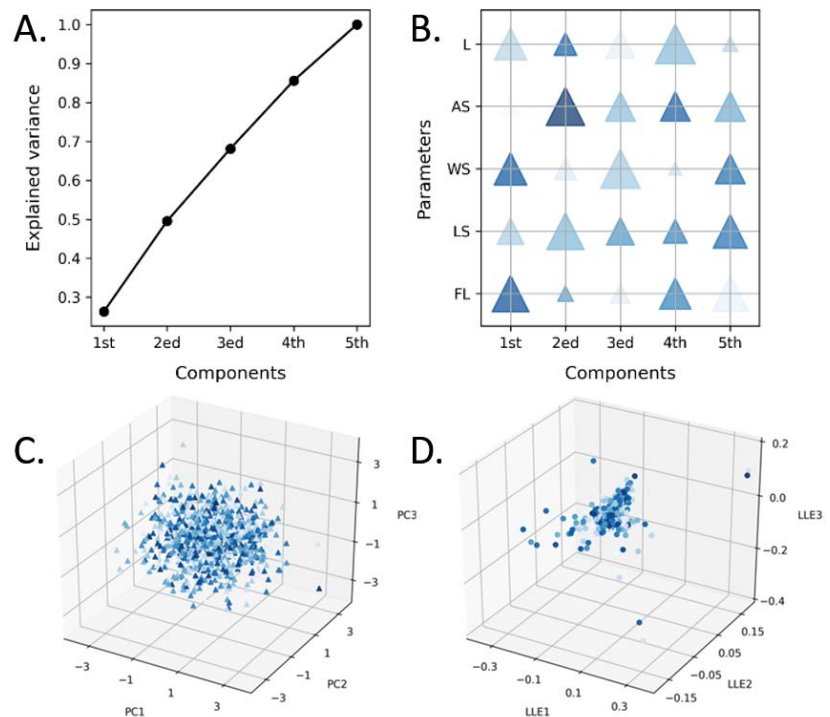
איור 25. מימין לשמאל – 15 הקווים המובהקים ביותר שנמצאו על פי התמרת הף (הקוים הלבנים), חלוקת הקווים לשתי קבוצות בעזרת k-means (הקוים האדומים והירוקים), מציאת נקודות החיתוך בין הקוים בכל קבוצה (הנקודות הצהובות). הזווית הממוצעת של הקבוצה בעלת הכי הרבה נקודות חיתוך (הקבוצה הירוקה).

3.2.3 תכנון תנועה רובוטית לדילול תמר מג'הול

לצורך בחינת שיטת תכנון תנועה בעזרת פרמטרים המחושבים על פי תמונה יוצרו 1000 תמונות סינתטיות של אשכולות תמר מג'הול, שחולקו לשתי קבוצות. קבוצה ראשונה עם 800 תמונות לכיול וקבוצה שנייה עם 200 תמונות לצורך בדיקות. מתוך התמונות חולצו פרמטרי האשכול (עומס פרי, זווית, אורך ורוחב מרובע חוסם). אורך הדילול האמיתי נקבע על ידי שני מומחים לגידול עצי מג'הול. מרחב פרמטרי הקלט והפלט נבחן בשיטת PCA (לינארי) ובשיטת ה-LLE (לא לינארי). כל חמשת רכיבי ה-PCA נדרשים כדי להסביר יותר מ-90% מהשונות וכמות השונות שמוסברת על ידי כל רכיבי ה-PCA דומה. נתון זה מצביע על מורכבות גבוהה יחסית של הבעיה. מרכיבי ה-LLE אינם הומוגניים דבר שמצביע על קשרים לא לינאריים. ערכי הרשת שמזערו את השגיאה עבור סט הכיול של 21 שכבות נסותרות ו-128 נזירונים בכל בשכבה (Bar-Shira et al., under review). הקרנלים הגאוסיאנים שנבנו היו 81 בממד 3^4 . אמדן השגיאה הממוצעת באורך החיתוך שחושב בשיטת רשת הנזירונים היה 2.6% ובשיטת השיערוך הקרנלי היה 2.1% בממוצע (איור 26). נעשו מספר ניסויי מעבדה של אגידת סנסנים בעזרת התכנון הפרמטרי. אוחד ראשוני שתוכנן ויוצר בעזרת הדפסה תלת מימדית נמצא כלא מתאים בניסוי במטעים באלמוג מפני שהאצבעות היו עבות מדי (איור 27). חלוקת המשימה לשלוש תתי משימות (הגעה אל מול נקודת הכניסה אל האשכול, תנועה ואחיזה של בסיס הידה, תנועת אגידה לאורך האשכול עד נקודת החיתוך) נערכה בהצלחה.

לצורך בחינה של למידה בשיטת החיזוקים מודלה בתכנת יוניטי (UNITY™) תנועה של רובוט ה-UR5 בעזרת חבילת למידת המכונה ML-Agents ובוצעה למידה של מסלולי תנועה. הסביבה שמודלה הינה הגעה לנקודה שסומנה באמצעות כדור והרובוט נדרש ללמוד להגיע לכדורים שמוקמו בנקודות שונות בחלל שסביבו (איור 28). הלמידה נעשית באמצעות למידת חיזוקים עמוקה עם אלגוריתם Proximal Policy Optimization (PPO). הרובוט מקבל תגמול חיובי בכל פעם שהקצה שלו נוגע בכדור (בסיום משימה מוצלח) והוא מקבל תגמול שלילי קטן על כל צעד שהוא מבצע, דבר שמעודד אותו לסיים את המשימה מהר ככל הניתן. הלמידה נעשית עבור רשת נזירונים שכוללת 2 שכבות שבכל אחת מהן יש 128 נזירונים. הקלט של הרשת (observations) הוא גודל זווית הפתיחה של כל אחד מששת המפרקים וכן המרחק (כסקלר) בין קצה הרובוט לבין הכדור. בכל צעד הרובוט יכול לשנות (להגדיל או להקטין) את הזווית של כל אחד מהמפרקים. לאחר לימוד של 10 מיליון צעדים,

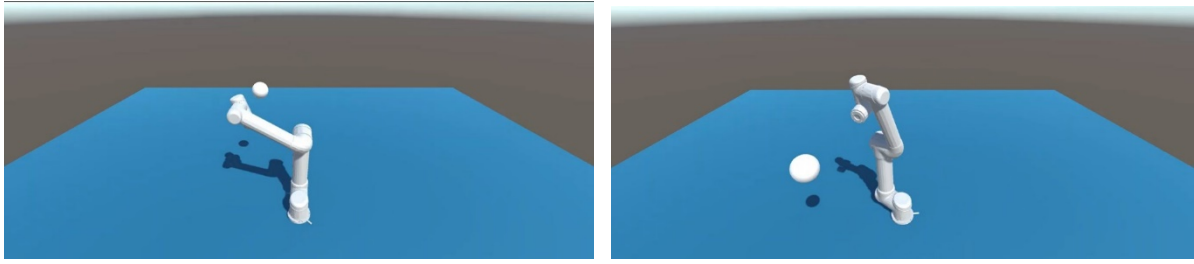
נבחנה פעולת הרובוט ב-10 חזרות שונות של משימת הגעה למיקום אקראי שונה של הכדור. הרובוט הצליח להגיע לכדור ב-7 מהבדיקות בזמן של 4.9 שניות בממוצע (2.5 סטית תקן).



איור 26: ניתוח מרחב הפרמטרים: (A) שונות מצטברת מוסברת על ידי רכיבי PCA (B) משקולות הפרמטרים המקוריים. (C) שלושת מרכיבי PCA המובילים. (D) שלושת מרכיבי ה-LLE המובילים



איור 27: ימין: אוחז ראשון שנבחן באלמוג, מרץ 2018. האגידה נעשתה כשורה אולם היה קשה להכניס האצבעות למקום הנדרש. בחינת תנועת אגידה במעבדה הרובוט עם אוחז בעל אצבעות דקות.



איור 28: סביבת הלימוד עם הרובוט מסוג UR5 והכדור המסמן את מטרת התנועה. באיור דוגמאות למיקומים שונים של הכדור ביחס לרובוט.

3.3 פיתוח מערכת סונר לזיהוי אשכולות וכמות חנטיים (בהובלת פרופ' יוסי יובל ופרופ' אביטל בכר)

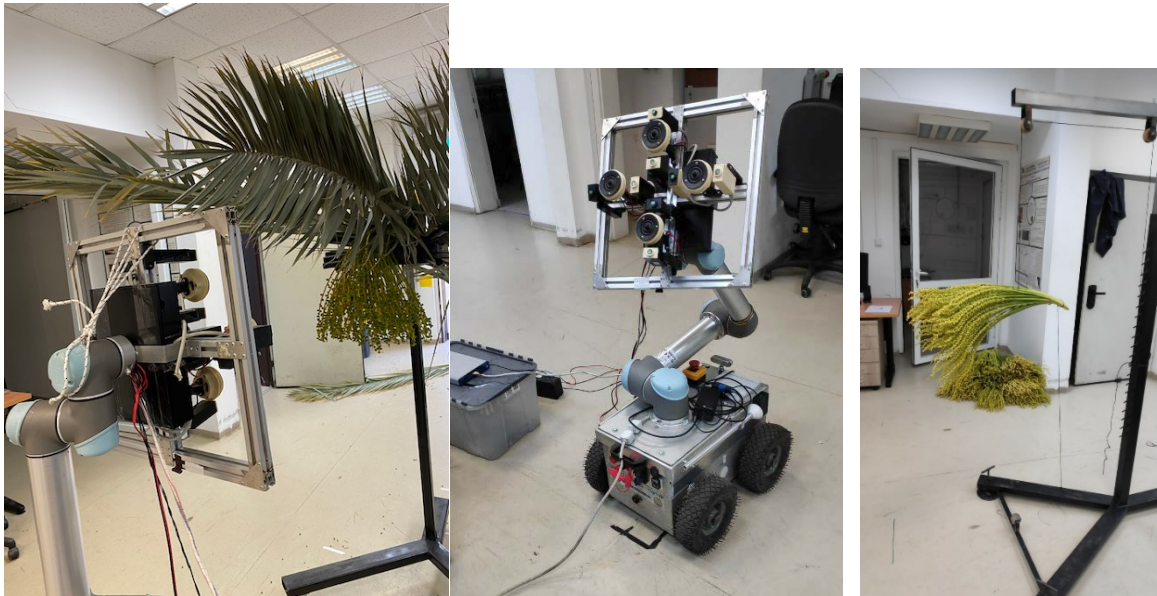
פותחה מערכת סונר רב ערוצית הכוללת ארבעה משדרים ושמונה מיקרופונים להקלטת הדי חנטיים. המערכת משדרת וקולטת בקצב של 250 קה"צ בכל ערוץ. המערכת נבנתה מחומרה ייעודית ונכתב קוד חדש להפעלתה. בוצעו ניסויים לאיסוף ההדים מאשכולות במעבדה ובמטע. במטע בוצע איסוף של מאות הדי חנטיים לפני ואחרי דילול בעונת הדילול.

בשנה הראשונה פותחה מערכת רכישת הדים חדשה ומשוכללת הכוללת ארבעה משדרים ושמונה מיקרופונים. המערכת משדרת וקולטת בקצב של 250 קה"צ בכל ערוץ. המערכת נבנתה מחומרה ייעודית ונכתב קוד חדש להפעלתה. ריבוי ערוצי השידור-קליטה מאפשר איסוף הדים מהיר מתחום רחב של זוויות. בוצעו הקלטות הדים במעבדה וכן סימולציות מחשב של הדים המוחזרים מסנסן עם ובלי חנטיים. בחנו גם סנסן אמיתי במעבדה בזוויות שונות וגם סימלצנו הדים באמצעות שחזור סריקת CT תלת מימדית של סנסן. הניסויים הראו הבדלים בין ההדים של סנסנים עם ובלי חנטיים ואיפשרו לנו להעריך את הזווית הטובה ביותר להקלטה של הדים כדי להבחין בין השניים. נמצא כי הזווית המיטבית היא בין 45 – 60 מעלות לאורך ציר האשכול. בוצעו נסיונות ראשונים לאמן מודל מכונה לומדת (Machine Learning) בעזרת הדים מסומלצים שמדמים אשכול עם צפיפות חנטיים שונה העידו על יכולות להבחין בין השניים על פי ההדים שלהם. באמצעות סימולציה יצרנו אלפי הדים משתי קטגוריות המדמות הדים של סנסנים עם חנטיים ובלי חנטיים. המערכת למדה לסווג את ההדים (איור 10).

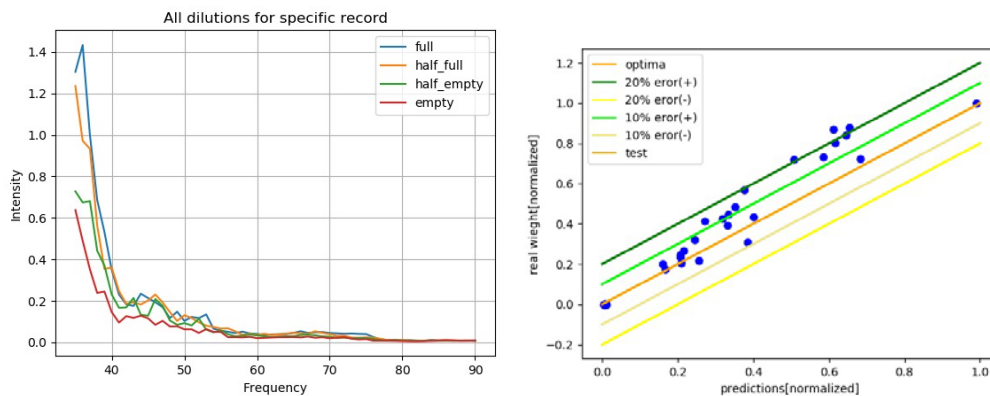
בניסוי מעבדה בוצעה הקלטת הדי סונר מבוקרת משמונה אשכולות שונים אשר דוללו לכדי ארבע רמות של חנטיים (מאשכול מלא לאשכול ריק). המערכת הופעלה באופן אוטומטי כאשר מערכת הסונר מוצבת על זרוע רובוטית מול האשכול ומקליטה הדים ב-56 תדרים שונים מזוויות שונות (איור 29). ההדים שנקלטו עברו עיבוד אות קלאסי והספקטרום שלהם חושב (האנרגיה בתדרים השונים). התוצאה מראה בבירור (איור 30) כיצד הדילול של האשכול משנה את הספקטרום של ההר החוזר. בנוסף, פיתחנו אלגוריתם להערכת כמות החנטיים בהתבסס על ההדים המבוסס על רגרסיה פשוטה. האלגוריתם הציג יכולות טובות עם שגיאה ממוצעת של 11% ממשקל החנטיים (איור 30).

פיתוח אלגוריתם לומד לשחזור תלת-מימדי של עצמים: בשנה האחרונה שיפרנו את יכולת שחזור העצמים מבוסס הדים. באמצעות מודלים תלת מימדיים וסימולציות אקוסטיות (Finite Element Model) יצרנו בסיס-נתונים רחב של הדים שיאפשר שימוש ברשתות נוירונים מלאכותיות. יצרנו בסיס מידע

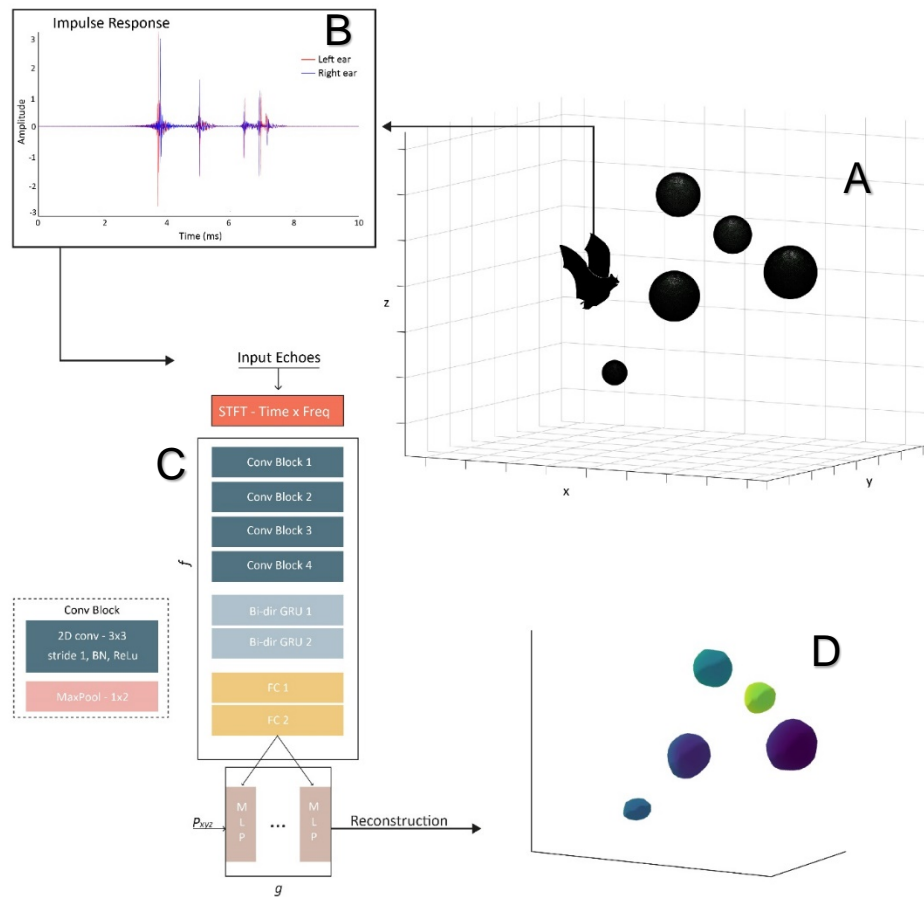
עם כמליון הדים – הגדול מסוגו בעולם – של עצמים במגוון צורות שמדמים עצים נושאי פירות (איור 31). בהמשך, אימנו רשת נירונים (הכוללת שכבות RNN+CNN), שמקבלת את ההד כאינפוט ומשחזרת את הצורה שלו בתלת-מימד על בסיס הנתונים הנ"ל. בנוסף, יצרנו גם בסיס נתונים (קטן) של הדים אמיתיים. הגישה הוכיחה את יכולתה לשחזר צורת עצם תלת מימדי על בסיס ההד שלו (איור 32). בעתיד, השיטה תוכל לשמש לשחזור תלת מימד של ענף נושא פירות מה שיאפשר לספור את מספר העצמים (פירות / חנטים) על הענף.



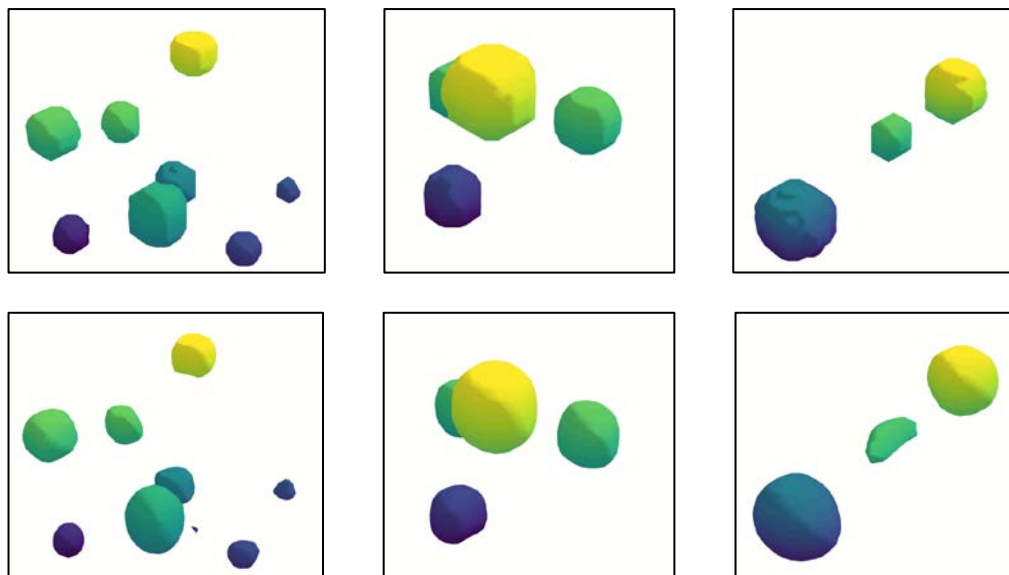
איור 29 ימין – האשכול. שמאל - המערכת הרובוטית הכוללת את הפלטפורמה הרובוטית והזרוע הרובוטית עליה הורכב אב הטיפוס המשופר של הסונר.



איור 30: שמאל – ספקטרום ממוצע של ארבע רמות הדילול מראה הבדלים ברורים בין רמות הדילול. ימין – סיווג הספקטרא באמצעות רגרסיה לינארית השיג תוצאות טובות עם שגיאה ממוצעת של כ-11% בהערכת משקל.



איור 31: האלגוריתם לשחזור תלת מימד מבוסס הד אקוסטי. (A) יצירה של סצנה תלת מימדית – יצרנו כ-50 אלף סצנות כאלה. (B) סימולציה של ההד האקוסטי המוחזר מהסצנה המוצגת. (C) תאור רשת הניורונים שבה השתמשנו לשחזור. (D) הסצנה המשוחזרת.



איור 32: שחזורים תלת מימדיים של שלושה עצמים (שמורכבים מכמה עצמים). כל טור מייצג עצם אקוסטי (רב-מחזירי) אחר. שורה תחתונה – עצם מקורי, שורה עליונה – עצם משוחזר. שמאל - עצם 8 מחזירי ספרי, מרכז - עצם 4 מחזירי ספרי, ימין - עצם 3 מחזירי שמורכב ממחזירים מצורות שונות.

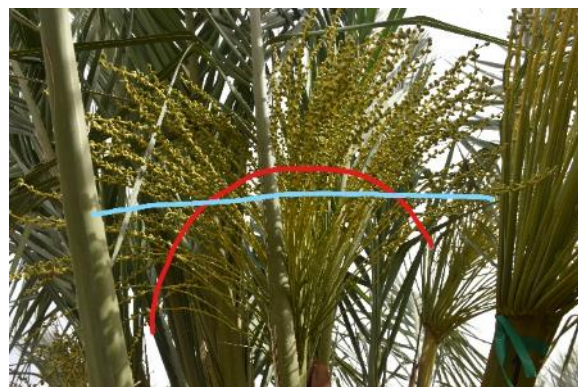
3.4 מערכת תומכת החלטה וממשק אדם-מערכת דילול אוטומטית (בהובלת דר' יעל זלצר)

3.4.1 פיתוח מודל כולל לשילוב אדם במערכת האוטונומית וניתוח השלכות על ממשק

עתידי ויישום בשטח

3.4.1.1 ראיונות מגדלים בערבה הדרומית – אפריל 2019

בשנה הראשונה בוצעו שני ראיונות רוחב מובנים עם מגדלי תמרים בערבה הדרומית, ושני ראיונות לא-מובנים בשטח המטע. לראיונות המובנים היו שתי מטרות מרכזיות. האחת, להבין מה הם הגורמים המשפיעים היום על תהליך קבלת ההחלטות בדבר נוסחת הדילול המיושמת בעונה נתונה. השנייה, ללמוד מהחקלאי/ית כיצד הוא/היא מבינים את השפעת מערכת הדילול המתוכננת במסגרת המיזם על תהליך קבלת ההחלטה בדבר נוסחת הדילול ברמת העונה, המטע והעץ הבודד. הראיונות המובנים התחילו במספר שאלות קבועות והתרחבו לכדי שיחה שארכה עד כדי שעתיים. בהמשך, המראיינים התבקשו להתייחס לסדרה של צילומי אשכולות ולסמן היכן היו מקבלים החלטה לדלל בהינתן מערכת חיתוך רובוטית בה משתמשים (סימון בצבע כחול) והיכן היו מקבלים החלטה לדלל בהינתן מערכת חיתוך רובוטית (סימון בצבע אדום, איור 33). מסיכום הראיונות עולה כי המגדלים נבדלים זה מזה מהותית באופן בו מתמללים את פרוטוקול הדילול כמו גם במשקל שהם נותנים לגורמים המשפיעים לדעתם על היבול. כדרך ההתנהלות לאורך השנים, נוסחאות הדילול של המגדלים אינן מתועדות במסד נתונים מוסדר. לשם כך מתבצע בימים אלו תהליך יזום של איסוף תוכניות הדילול של המגדלים המוכנים לשתף פעולה מהשנים האחרונות ככל הניתן, בד בבד עם חילוץ נתוני יבול וספירת פרי ממאגר הנתונים "תמריקה".



איור 33: הסימונים של מראיין 1, אשר התבקש להתייחס לסדרה של צילומי אשכולות ולסמן היה מדלל בשיטתו הוא (סימון בצבע כחול) והיכן לו הייתה עומדת לרשותו מערכת חיתוך רובוטית (סימון בצבע אדום).

3.4.1.2 ראיונות מגדלים – 2020

מטרת הראיונות בשלב זה הייתה למפות את מירב הגורמים החשובים בתהליך הדילול. במחצית הראשונה של 2020 נערכו שישה ראיונות עם מגדלים, כמו גם שני ראיונות עם מומחי גידול תמרים. הראיונות היו חצי מובנים וכללו שאלות מנחות, אשר נבחרו בהתייעצות עם ד"ר יובל כהן, כגון 'כמה סנסנים אתה משאיר בכל אחד מהדורים, ומדוע?' או 'כיצד אתה מדלל בסבב ראשון לעומת השני?'. הראיונות הוקלטו ושוקלטו. לאחר מכן בוצע ניתוח איכותני של הגורמים המשמעותיים עבור ההחלטות הקשורות בדילול. מהראיונות עלו מספר נושאים מרכזיים. ראשית, זמינות כלי גובה, כוח אדם ואיכותו, וכפועל יוצא, היכולת לבצע סבבי דילול, הייתה גורם חשוב לבעל מטע גדול (15,000 עצים מניבים),

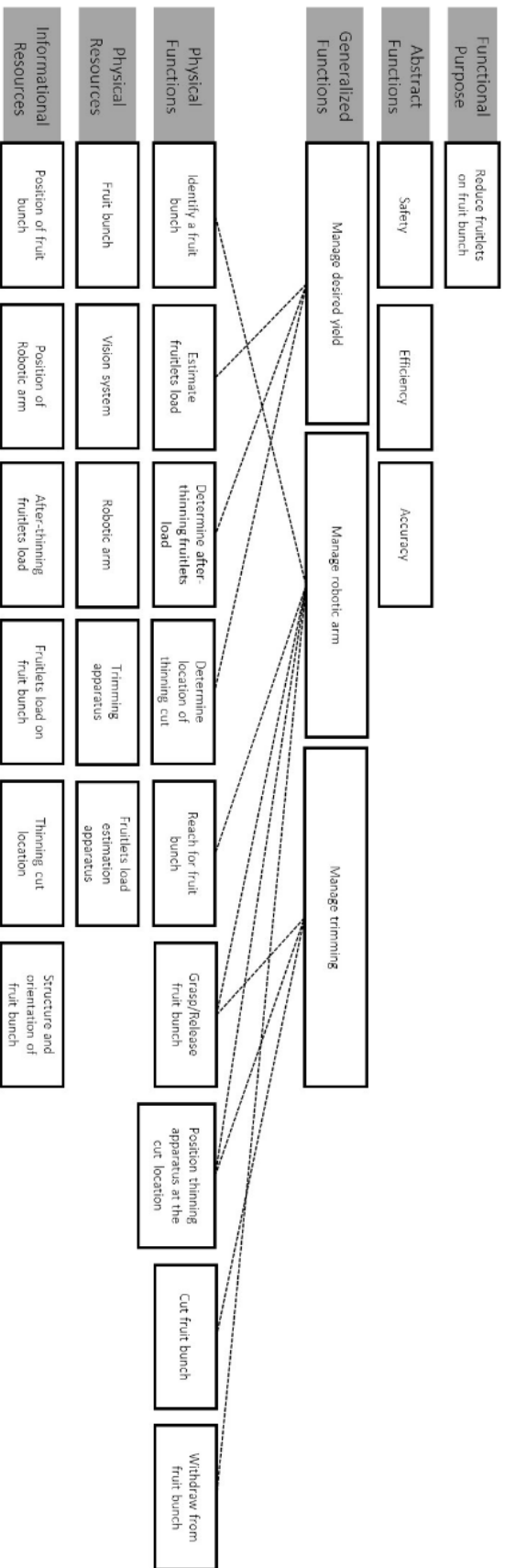
לעומת המגדלים הקטנים, המסוגלים לבצע אף שלושה סבבי דילול. חשיבות סבבי הדילול הוסברה ע"י פוטנציאל הניבה; אין להם עניין שהצמח ישקיע משאבים בסנסנים שידוללו, אלא רק בפרות שיישאו ויהיו רווחיים. מאחר והדורים מבשילים בהפרש של כמה שבועות, לא ניתן לדלל את כל האשכולות בצורה מיטבית בסבב בודד. רוב המגדלים בעלי המטעים הגדולים הצליחו להתגבר על המחסור היחסי בכלי גובה באמצעות שימוש בכללי החלטה ממושטים (יוריסטיקה או כללי אצבע) אשר אפשרו להם לצמצם את הזמן הנדרש לדילול עץ בודד, ואף להעסיק פחות עובדים. לדוגמא, במפגש שהתקיים ביולי 2020 אחד המגדלים דיווח כי זמן העבודה לעץ ירד ל-כשעה, כאשר במטעים אחרים זמן העבודה לעץ הינו בממוצע שעתיים וחצי. נושא נוסף שעלה בקרב כל המגדלים הינו אחוז נשירה, אשר הינו מבחינת נעלם עבורם, זאת מכיוון שלאורך השנים התנודתיות בו רבה ולא ניתנת לחיזוי - בין 20% עד כ-50% נשירה. מבחינת המגדלים, לנשירה השפעה ישירה על גודל וכמות הפרי הסופי. נשירה גבוהה תניב מעט פירות גדולים (21 גרם), לעומתה ונשירה נמוכה תשאיר פירות רבים וקטנים (17 גרם ומטה) בעלי פיריון נמוך מאוד. המשך המחקר מתמקד בהבנת ומידול היוריסטיקות אשר מאפשרות למגדלים לחסוך בכוח אדם בתקופת הדילול, כאשר לחץ העבודה גדול.

3.4.2 מודל כולל לשילוב אדם במערכת האוטונומית וניתוח השלכות על ממשק עיתידי ויישום בשטח

שיטות הלקוחות מהנדסת מערכות קוגניטיבית cognitive system engineering מאפשרות לדון בטכנולוגיות המאפשרות את היישום והממשקים הנדרשים לתפעול. בשנה הקודמת בוצע תהליך רוחבי של ניתוח יעדים, משימות ומשאבים למערכת הכוללת על פי שיטת הפשטה היררכית (hierarchical abstraction). לאחר מכן בוצע ניתוח הקצאת פונקציות על רמות אוטומציה משתנות למשימה (function allocation). כעת, לאחר שנבחנו הטכנולוגיות המאפשרות הוגדרה רמת האוטומציה המיועדת למערכת המפותחת בפרוייקט זה. על בסיס רמת האוטומציה הרב-מימדית בוצע פיתוח מודל Operational Event Sequence Diagrams (OESD). פיתוח מודל OESD מאפשר לכלל השותפים במחקר לבחון את הקשרים בין חלקי המערכת. כמו כן, ניתוח מעמיק של המודל מציב תמונה של דרישות ממשק האדם-מערכת ההכרחיות לשימושת בשטח. בעקבות הניתוח הועלו היבטים תכנוניים שיש לתת עליהם את הדעת בשלבי תכנון האינטגרציה ושילוב האדם במערכת.

Hierarchical Abstraction 3.4.2.1

הפשטה היררכית מאפשרת לנתח באופן מובנה את הדרישות של המערכת בעלת מטרה מוגדרת. בתחילה מוגדרת מטרת העל, לאחר מכן זו מפורקת לתת מטרות. בשלב הבא מוגדרים התפקידים והמשאבים בעזרתם ניתן להשיג את המטרות הללו (איור 34). חשוב להדגיש בשלב הזה אין התייחסות לאופן היישום/ביצוע של כל תפקיד או לבעל התפקיד.



איור 34: הפשטה היררכית Hierarchical abstraction למערכת רובוטית לדילול חנטי תמרים.

Function Allocation 3.4.2.2

הגדרת וניתוח הקצאת תפקידים מתבססים על התפקידים שהוגדרו בשלב הקודם. בשלב הזה נושאי התפקיד הם שניים, האדם המפעיל או המערכת הרובוטית (robotic Medjool date thinning system RDTs - מבחינת השלב הזה, ההתייחסות הינה ל RDTs כיחידה אחת שלמה מתפקדת, תוך התעלמות (זמנית) מהחלקים המרכיבים אותה (Salzer et al., under review). בתהליך הוצעו שבעה מודלים אפשריים להקצאת תפקידים בטבלה (טבלה 2).

טבלה 2. הקצאת תפקידים בין מפעיל (Operator) ומערכת דילול רובוטית (RDTs) N/A=not applicable

	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FA7
Identify a fruit bunch	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Estimate fruitlets load	Op.	Op.	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs
Determine the desired after-thinning fruitlets load	Op.	Op.	Op.	Op.	Op.	Op.	RDTs
Determine the location of the thinning cut	Op.	Op.	Op.	Op.	Op.	RDTs	RDTs
Reach for fruit bunch	Op.	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Grasp/Release a fruit bunch	Op.	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Move to trim location	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Cut fruit bunch	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Withdraw from fruit bunch	Op.	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Physical Resources							
Fruit bunch	Op.	Op./RD TS	Op./RD TS	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Means of vision	Op.	Op./RD TS	Op./RD TS	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Robotic arm	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Trimming apparatus	Op.	Op.	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs	RDTs
Fruitlets load estimation apparatus	N/A	N/A	N/A	N/A	RDTs	RDTs	RDTs
Informational Resources							
Position of fruit bunch	Op.	Op./RD TS	Op./RD TS	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Position of the robotic arm	Op.	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
After-thinning fruitlets load	Op.	Op.	Op.	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S
Fruitlets load on a fruit bunch	Op.	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Thinning cut location	Op.	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S
Structure and orientation of fruit bunch	Op.	Op.	Op.	Op.	Op./RDT S	Op./RDT S	Op./RDT S

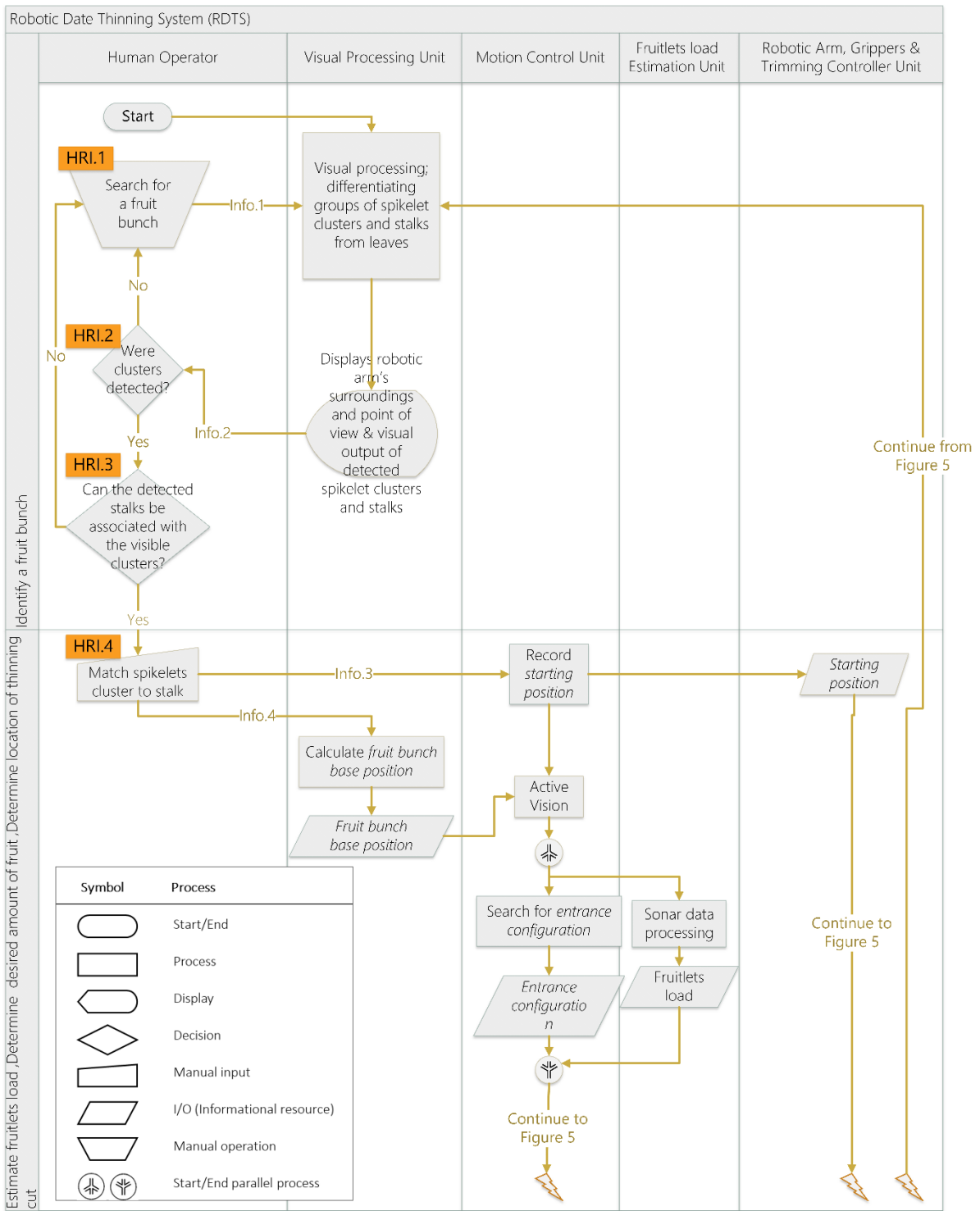
טכנולוגיות מאפשרות 3.4.2.3

החזון של ה RDTs הוא מערכת אוטומטית מלאה, כפי שמוצג ב-FA7. עם זאת, ההחלטה כמה פירות יש להשאיר על צרור הפירות לאחר הדילול נגזרת מהמומחיות של האדם, וגורמים סביבתיים נוספים והערכות שווי שוק בעונה. לכן, ההחלטה, שמתורגמת ישירות לפונקציית מיקום חיתוך, מוקצת למפעיל. כלומר, נכון לעכשיו FA7 אינו בר ביצוע; החקלאי יקבע את היבול הרצוי לכל עץ או אשכול ויספק את המידע למערכת. כדי לעמוד ביעדי התכנון של המערכת הרצויה, כמתואר ב-FA6, הצוותים הטכניים חיפשו טכנולוגיות מאפשרות קיימות או חדשות. עבור כל אחת משבע ההקצאות המוצגות כאן,

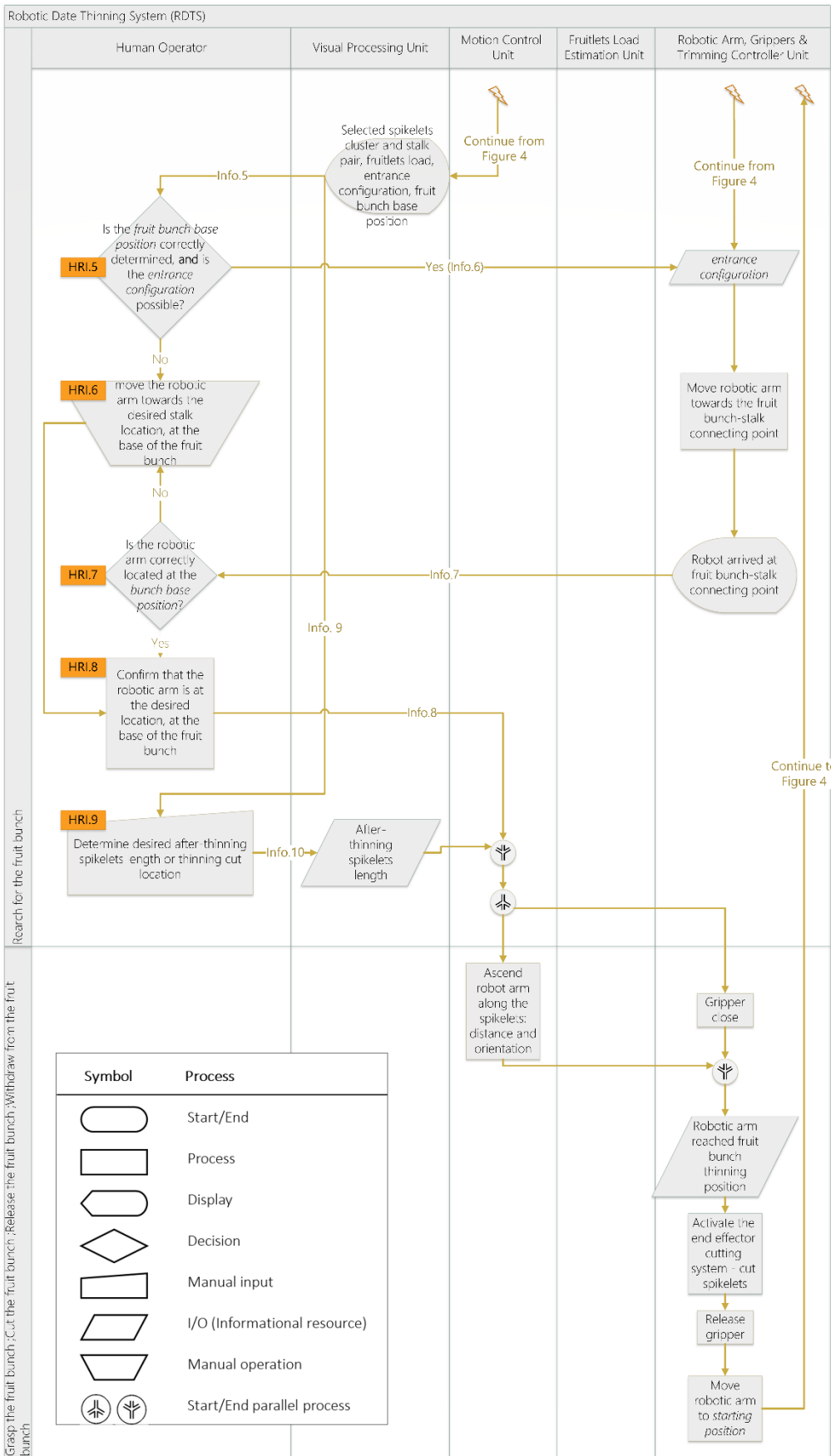
נתנה התייחסות לדרישות המערכת ודרישות הממשק אשר יאפשרו את יישומה. שלושה נושאים אשר עלו בתהליך ויש מקום לתת להם מענה בהמשך תהליך הפיתוח. הראשון הינו יישום חיפוש האשכול. בחזון הפיתוח האדם המפעיל נמצא על הקרקע ומערכת הרובוטית ברום העץ. על כן, יש לאפשר לאדם אמצעי לחיפוש ואיתור האשכול כמו גם היכולת להניע את המערכת כולה לקרבת האשכול על מנת שניתן יהיה לזרוע הרובוטית להגיע אל האשכול. תפקיד זה לא הוגדר כחלק כתפקיד המיועד למערכת האוטומטית, ועל כן יהיה צורך לתכנן מערכת שליטה ובקרה למפעיל האנושי לביצוע התפקיד הזה. השני הינו הסטת העלווה עומדת בדרכו של המדלל האנושי היא פעולה טבעית לאדם. מתוך הנחה שהמפעיל אינו ממוקם בסמיכות לרובוט, יש לתת מענה לאתגר הסטת העלווה בתכנון תנועת הרובוט אל כיוון האשכול המועד לטיפול. הנושא השלישי אשר דורש תיאום בין קבוצות הפיתוח הינו הגדרת המיקום המרחבי ממנו יאספו נתוני הסונר ונתוני תמונה המיטביים לאיסוף מידע אוטומטי אודות האשכול (נפח חנטים, מבנה האשכול).

Operational Event Sequence Diagrams 3.4.2.4

מודל Operational Event Sequence Diagrams (OESD) הינו מודל סדרתי, אשר פורש על ציר הזמן זרימת מידע-פעולות-והחלטות בתוך המערכת. המודל מאפשר להתייחס למערכת ולמרכיביה על פי חלוקת התפקידים הרצוייה למתכנן. סדרת הפעולות והחלטות של כל רכיב מתוארת ב"מסלול שחייה" (swim lane) משלה. מעבר המידע או מעבר תפקידים מתואר בעזרת חיצים המובלים בתוך או בין המסלולים. בפיתוח הנוכחי פרקנו את המערכת לחמישה מרכיבים: האדם-המשתמש; Visual Processing Unit (VPU) – המערכת האחראית על עיבוד התמונה וזיהוי מבנה האשכול; Motion Control Unit (MCU) – המערכת האחראית על תנועת הרובוט הניגש לאשכול כדי לבצע חיתוך; Robotic Arm & Trimming Controller Unit (RDU) – המערכת הכוללת את הזרוע הרובוטית, המסור והתופסנים; Fruit Load Estimation Unit (FEU) – המערכת האחראית על אומדן הערכת כמות הפרי. איורים 35 ו-36 פורסים את כלל המודל עבור המערכת המפותחת. מתוך ניתוח הסכימה המופיעה באיורים 35 ו-36 נגזרת רשימת דרישות המכתיבה את ממשקי-אדם מערכת שיש להמשיך ולפתח בצד פיתוח היכולות הטכנולוגיות (טבלה 3). כמו כן, הניתוח ממפה את ההתממשקות של רכיבי המערכת המפותחים על ידי הצוותים השונים – זה עם זה.



איור 35: Operational Event Sequence Diagram (OESD) for the Robotic Date Thinning System (RDTS). Numbered orange boxes are associated with Table 3 (OESD required interfaces).



Operational Event Sequence Diagram (OESD) for the Robotic Date Thinning System: איור 36 (RDTS). Numbered orange boxes are associated with Table 3 (OESD required interfaces).

Human-robot interface and information requirements. The numbered labels are : 3 טבלה associated with Figures 35 and 36.

Label on Figures 4 & 5	Requirement (requirement category)
HRI.1	<p>The operator should be able to select the source of visual feed (<i>control</i>)</p> <p>The operator needs to view visual data of the tree crown parts – leaves, fruit bunches (<i>information representation</i>)</p> <p>The operator needs to be able to move, zoom and manipulate the visual source (<i>control</i>)</p>
Info.1	The VPU needs to know that the current position of the visual feed is valid for activating the visual processing procedure (<i>information flow</i>)
Info. 2	The VPU needs to provide the operator with a visual output of its processing procedure.
HRI.2	The visual processing system will feature the detected fruit stalks and fruit bunch to allow the operator to interpret whether the VPU has successfully detected fruit bunches and stalks (<i>information representation</i>)
HRI.3	(Further to HRI.2) The system will allow the operator to determine whether the displayed fruit bunch and fruit stalks can be associated in pairs (<i>information representation</i>)
HRI.4	The system will allow the operator to associate the fruit bunch with its fruit stalk.
Info.3	The MCU unit needs confirmation that a fruit bunch and its fruit stalk were successfully matched (<i>information flow</i>)
Info.4	The VCU unit needs confirmation that the multiple fruit bunch and fruit stalks detected by the VPU are the two that match (<i>information flow</i>)
Info.5	The system units will provide the operator with <i>entrance configuration</i> and <i>fruit bunch base position</i> associated with the selected fruit bunch, i.e., the selected fruit bunch-stalk pair (<i>information flow</i>)
HRI.5	<p>The visual display needs to support the operator in grasping the location of the <i>fruit bunch base position</i> concerning the selected fruit bunch, i.e., fruit bunch-stalk pair (<i>information representation</i>)</p> <p>The visual display needs to support the operator in judging the practicability of the suggested <i>entrance configuration</i> in relation to the selected fruit bunch, i.e., fruit bunch-stalk pair (<i>information representation</i>)</p> <p>The operator needs to inform the system that the base position and entrance configuration are acceptable (<i>input data</i>)</p>
HRI.6	<p>The operator should be able to select the source of visual feed (<i>control</i>)</p> <p>The operator needs to view the selected fruit bunch and its surroundings—other leaves and fruit bunches (<i>information representation</i>)</p> <p>The operator needs to have a view of the robotic arm’s gripper and end effector trimming system (<i>information representation</i>)</p> <p>The operator needs to be able to move, zoom and manipulate the visual source (<i>control</i>)</p> <p>The operator needs to be able to move and manipulate the robotic arm (<i>control</i>)</p>

	The operator needs to understand where the robotic arm is located in relation to the location of the selected fruit bunch (<i>information representation</i>)
Info.7	The system should inform the operator that the robotic arm arrived at the fruit bunch base position (<i>information flow</i>).
HRI.7	The operator should be able to select the source of visual feed (<i>control</i>) The operator needs to view the selected fruit bunch and its surroundings—such as other leaves and fruit bunches (<i>information representation</i>) The operator needs to have a view of the robotic arm's gripper and cutting device (<i>information representation</i>) The system needs to provide the operator with the ability to evaluate whether the robotic arm is correctly located at the base of the selected fruit bunch (<i>information representation</i>)
HRI.8	The operator needs to be able to inform the system that the robotic arm is correctly located at the base of the selected fruit bunch (<i>input data</i>)
Info.8	The system needs to be able to be informed that the robotic arm is correctly located at the base of the selected fruit bunch (<i>information flow</i>)
Info.9	The system units will provide the operator with the <i>estimated fruitlet load</i> number associated with the selected fruit bunch (<i>information flow</i>)
HRI.9	The human needs to be able to read the estimated fruitlet load. The operator needs to view the selected fruit bunch (<i>information representation</i>) The system needs to provide the operator with the means to decide, with regards to the selected fruit bunch, where the thinning cut should take place (<i>input data</i>)
Info.10	The system needs to process the human decision to extract the length of the after-thinning spikelets (<i>no owner</i>) The system needs to forward the length of the after-thinning spikelet to the MCU (<i>information flow</i>)

3.4.3 פיתוח ממשקי משתמש

3.4.3.1 תפיסת מצב והערכת מיקום וכמות אשכולות דרך מצלמה אחת או צמד מצלמות

לשם בחינת תפיסת מצב והערכת מיקום כמות אשכולות, כדי לתת מענה לצורך Human needs Identify a fruit (בטבלה זה מופיע כ: to be able actively search for a bunch 2), (בטבלה זה מופיע כ: Identify a fruit bunch) בחודשי הדילול 2021 בוצעו ארבע גיחות צילומים למטעי אלמוג. על גבי רובוט הולבשו שלוש מצלמות, שתי מצלמות (זווית רחבה וזווית צרה) קדמיות על גבי הזרוע הרובוטית, ומצלמה שלישית על גבי תורן המכוון לכלול את הזרוע הרובוטית בטווח הצילום (זווית רחבה, איור 37). צולמו כ-30 סרטים משלוש מצלמות במקביל (סך הכל 90 קבצי צילום). בסדרת צילומים ראשונה (כ-24 צילומים) הרובוט נסע על הקרקע והקיף את העצים הצעירים תוך צילום רציף של אשכולות העץ. בסדרת הצילומים השניה (כ-6 צילומים) הרובוט הועמס על במת גובה אל רום העץ (כ-16 מטר). בוצעו צילומים בזמן נסיעה סביב העץ על גבי הבמה, כמו גם צילומים בהם נעשה שינוי כיוון התבוננות זרוע רובוט לא בנסיעה. תוצרי הסרטים ישמשו לניסוי בחינת תצורת הצגה מועדפת בקרב הנבדקים.

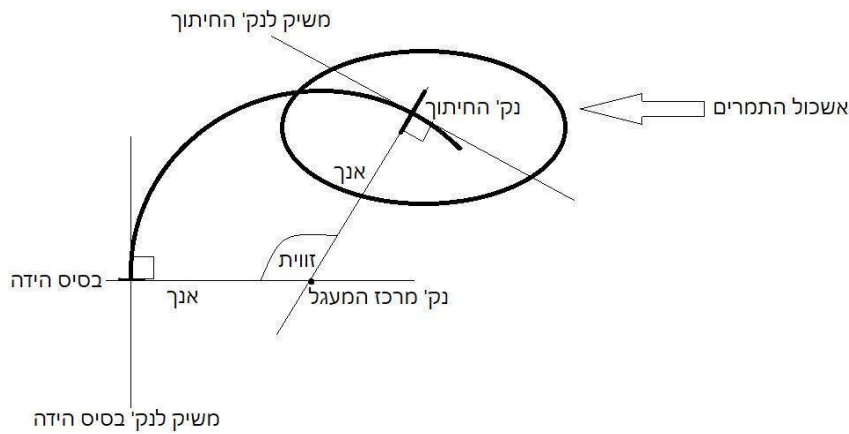


איור 37: מערכת זרוע רובוטית ושלוש מצלמות. שתיים על גבי הזרוע הרובוטית (עיגול שמאלי) ואחת על גבי תורן (עיגול ימני). התמונות מטה מציגות זוויות צילום במצלמות עדשה רחבה (GoPro).

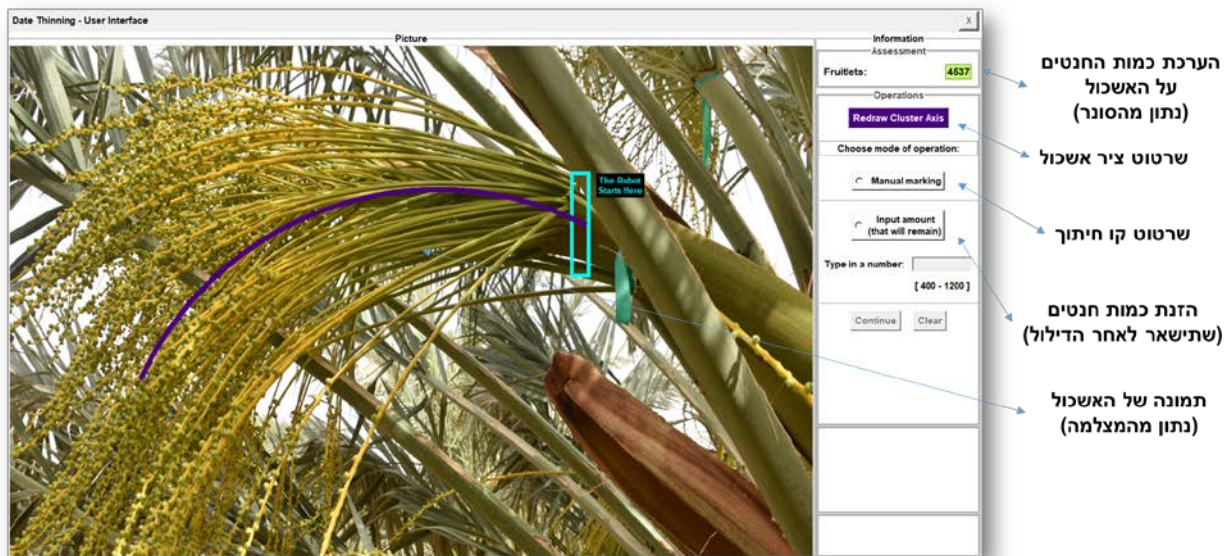
3.4.3.2 אפיון ופיתוח ממשק משתמש לשיתוף פעולה אדם-רובוט לדילול חנטי תמרים שלב הפיתוח הנוכחי מתמקד בממשק אדם מכונה, מרגע תפיסת בסיס הידה ועד לשלב חיתוך האשכול וביצוע פעולת הדילול. הממשק, יסייע בהעברת המידע מהמפעיל האנושי למערכת RDTS ויקבל הערכה ממערכת הסונאר לגבי מספר החנטים לאחר פעולת החיתוך. במסגרת המחקר יבחנו שתי אפשרויות ממשק אשר יקבעו את נקודת החיתוך הרצויה: באחת, המפעיל יידרש להכניס את מספר החנטים אותו הוא מעוניין להשאיר באשכול הקיים ואילו בשנייה, המפעיל יתבקש לסמן את נק' החיתוך הרצויה על גבי מסך תצוגה. הממשק יעבד את המידע, שהתקבל באחד משני האופנים הנבדקים, ויעביר למערכת המנהלת את הזרוע המכנית את המרחק שעליו לעבור לאורך ציר האשכול עד לנקודת החיתוך הרצויה שנבחרה על ידי המפעיל. הפעולה ממנה מתחיל הרובוט את התנועה שלו היא כאשר הזרוע תופסת את הענף. הפלט מן הממשק יספק ל-RDTS את מיקום חיתוך האשכול, כמרחק מבסיס הידה (L) עד לנקודת החיתוך על ידי המערכת, לפי הנחיית האדם. חישוב (L) מתואר באיור 38.

הממשק (איור 39) תוכנן כדי להציג את הנתונים הנדרשים לקבלת החלטה ומאפשר למשתמש לקבל החלטה אודות עוצמת הדילול.

לאחר פיתוח הממשק בוצע ניסוי שימושיות על 8 משתתפים ממכון וולקני (4 מומחים ו 4 שאינם מומחים). מבחן השימושיות העלה נקודות מרכזיות לשיפור, אשר חלקם יושמו באיור המוצג לעיל וחלקם יועדו לשלבי הפיתוח הבאים.



איור 38: לאחר הזנת נקודת החיתוך ע"י המפעיל, ניתן להעברי שני משיקים. הראשון בבסיס הידה והשני בנקודת החיתוך אשר נמצאת על הקשת. מכל משיק עובר אנך אשר יצא מנקודת החיתוך ונקודת בסיס הידה. נקודת המפגש של שני האנכים מהווה את מרכז המעגל של הקשת. כעת, ניתן לחשב את רדיוס המעגל והזווית שנוצרה כתוצאה ממפגש האנכים. לבסוף, בעזרת נוסחה ניתן לחשב את אורך הקשת (L), כאשר R רדיוס המעגל, θ זוויות המעגל, L אורך הקשת הרצויה.



- הערכת כמות חנטים על האשכול (נתון מהסונר)
- שרטוט ציר אשכול
- שרטוט קו חיתוך
- הזנת כמות חנטים (שתישאר לאחר הדילול)
- תמונה של האשכול (נתון מהמצלמה)

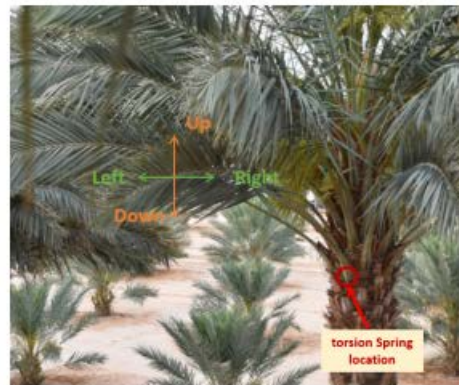
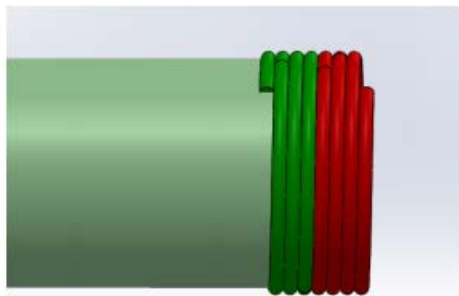
איור 39: ממשק אדם-רובוט לקביעת אורך הסנסנים לאחר חיתוך.

3.5 אופטימיזציה של זרוע רובוטית לדילול (בהובלת פרופ' אביטל בכר ודר' אבישי סינטוב)

3.5.1 ניסוי ומידול התכונות הפיסיקליות של מכשולים גמישים בתמר

בהסתכלות על העלה ניתן לראות כי העלה מקובע בנקודת ריתום אחת לגזע העץ, כל התנועות של העלה הינן ביחס לנקודה זו. כמו כן קיימים שישה כיווני תנועה אפשריים לעלה לאורך שלושת הצירים אשר סופרפוזיציה ביניהם מספקת את מגוון התנועות האפשריות לעלה: למעלה, מטה, ימינה, שמאלה משיכה ודחיפה של העלה לכיוון גזע העץ אשר גורמת למתיחה וכפיפה של העלה. אחרי תצפיות במטע והסתכלות על פעולת העובדים בביצוע פעולת הדילול נמצא כי התנועות העיקריות הדרושות על מנת לאפיין את המכשול הן בכיוון ימינה/שמאלה מעלה/מטה (איור 40). בוצעו שני ניסויים להערכת התזוזות

והכוחות שיפעילו העלים על הרובוט בזמן תנועתו בצמרת העץ. תוצאות הניסויים ישמשו להגדרת המנועים האופטימלים לזרוע הרובוטית.

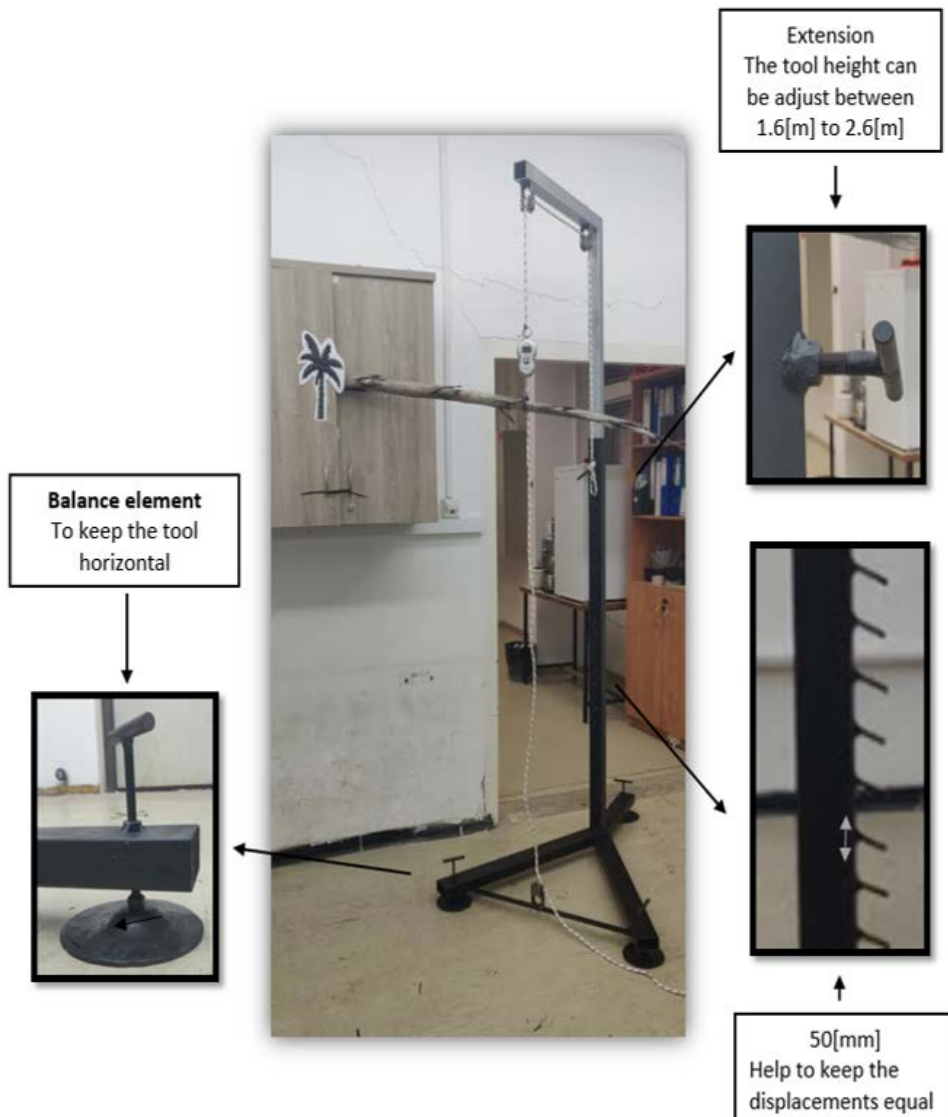


איור 40: הדגמת מודל הפיסיקאלי הנבדק לעלה עץ דקל

מכשיר דמוי מנוף נבנה כדי למדוד את נתוני הכוח והתזוזה הנדרשים (איור 41). כדי להתגבר על אי אחידות פני השטח ולשמור על השוויון תנועות בכל מדידה, וכדי לוודא שהמערכת מפולסת, חוברו כפות רגלי פילוס למערכת. המכשיר היה מצויד בוויס במרחקים של 50 מ"מ זה מזה שאיפשרו להזיז את העלה בתזוזות קבועות. על ידי שינוי תצורת החבל, העלה הוזז לכל הכיוונים הרצויים - למעלה, למטה, ימינה ושמאלה על ידי שימוש בגלגליות, מד הכוח חובר לחבל ומדד את הכח הפועל על העלה בהינתן הזזה ידועה של העלה.

ניסוי 1 כלל 6 עלים מ-6 עצים שונים במטע של קיבוץ אלמוג. גובה העצים היה כ- 3-4 מ' ואורך העלים היה כ- 2.5 מ'. כל עלה נמדד לתזוזות ב- 4 כיוונים: מעלה, מטה, ימין ושמאל. למדידת הכח, העלה נירתם למתקן ב-4 מקומות שונים לאורכו. במרחק של 50, 100, 150 ו-200 ס"מ מנקודת החיבור של העלה לגזע שהיוו את האחוזון ה-20, 40, 60 ו-80% בערך מאורך העלה (איור 42 למעלה). בכל נקודת ריתום ולכל כיוון העלה הוזז בטווח תנועה של 5 – 60 ס"מ בקפיצות של 5 ס"מ ובכל תזוזה נירשם הכח הפועל על העלה בעזרת מד הכח (איור 42 שמאל). בטבלה 4 מוצגות תוצאות מדידות התזוזה לעלה מספר 1. כמו כן נמדד קוטר שדרת העלה ומשקל העלה בכל אחת מנקודות הריתום.

ניסוי 2 כלל 3 עלים מ-3 עצים שונים במטע של קיבוץ אלמוג. גובה העצים היה כ- 18 מ' ואורך העלים היה כ- 4 מ' (איור 42 ימין). כל עלה נמדד לתזוזות ב- 4 כיוונים: מעלה, מטה, ימין ושמאל. בכל נקודת ריתום ולכל כיוון העלה הוזז בטווח תנועה של 5 – 60 ס"מ בקפיצות של 5 ס"מ ובכל תזוזה נירשם הכח הפועל על העלה בעזרת מד הכח. כמו כן נמדד קוטר שדרת העלה ומשקל העלה בכל אחת מנקודות הריתום.



איור 41: מכשיר מדידת הכוחות והתזוזות בעלי תמר.

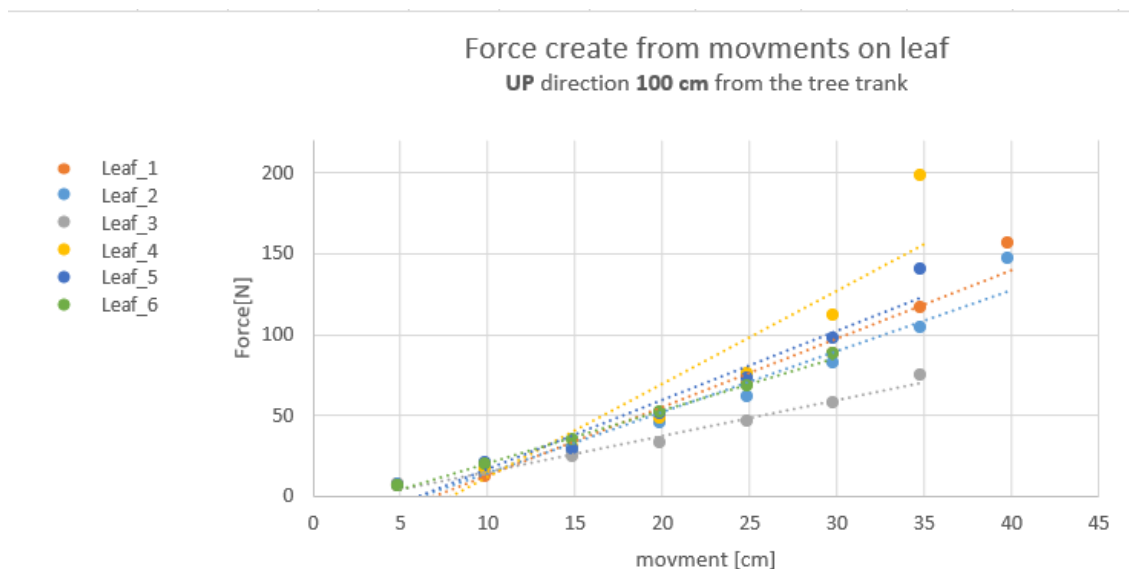


איור 42: נקודות עיגון העלה למדידת כוחות ומערכת הניסוי במטע.

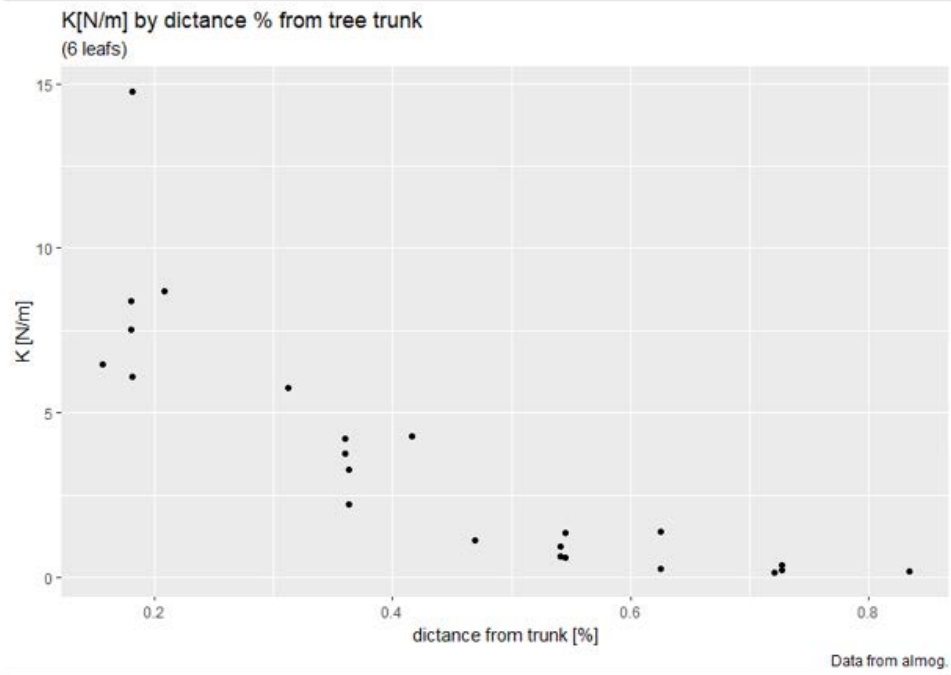
טבלה 4: תוצאות ניסוי עבור עלה מספר 1.

leaf length	45	40	35	30	25	20	15	10	5	trunk distance	direction number	#
277.5				5.39	3.92	3.43	2.94	2.45	1.47	200	UP	1
277.5			22.54	17.64	16.66	12.25	9.31	6.37	2.94	150	UP	1
277.5		156.8	117.11	87.71	69.58	47.53	28.42	12.25	7.8	100	UP	1
277.5				196		102.9		28.42		50	UP	1
277.5		14.7	9.31	7.35	5.88	4.9	3.92	2.94	0.98	200	DOWN	1
277.5		15.19	13.23	9.8	8.33	6.37	4.41	2.94		150	DOWN	1
277.5		34.3	29.89	23.03	18.62	15.19	10.29	8.82	2.94	100	DOWN	1
277.5		110.25	97.02	77.42	71.54	58.31	40.18	19.11	7.84	50	DOWN	1
277.5		5.5		4.9						200	RIGHT	1
277.5	13.72						9.8	6.37	5.88	150	RIGHT	1
277.5	71.54	47.04	37.24	27.44	23.03	15.19			9.31	100	RIGHT	1
277.5						106.33	78.4		40.18	50	RIGHT	1
277.5		7.5		6.2		4.9				200	LEFT	1
277.5		20.58	17.15	16.66	14.21	12.74	9.8	8.33	6.37	150	LEFT	1
277.5		68.6	57.82	49	42.14	29.89	21.07	13.72		100	LEFT	1
277.5				177.38	154.35	97.51		44.1		50	LEFT	1

בהתחשב בנקודת החיבור של העלה לעץ וכיווני התנועה של העלה, נבחר מודל המפשט את התנהגות העלה מבחינה דינאמית והינו מודל של קורה הרתומה באמצעות קפיצים אל גזע העץ. גישה זו מאפשרת הסתכלות מנקודת מבט פיסיקלית על התכונות הביולוגיות של העלה. הצגת הנתונים בגרף כח תזוזה (איור 43) מציגה את הקשר באופן ששיפוע הקו הינו פרופורציונאלי לקבוע הקפיץ. באופן זה, בכל אחת מנקודות הריתום, בכל כיוון ולכל אחד מהעלים חושב קבוע הקפיץ. קבוע הקפיץ המחושב לכל העלים כפונקציה של נקודת הריתום המנורמלת באורך העלה מופיע באיור 44.



איור 43: גרף תזוזה-כח עבור כל העלים במרחק ריתום של 100 ס"מ מגזע העץ ובהזזת העלה למעלה.



איור 44: קבוע הקפיץ הפרופורציונאלי עבור ששת העלים בניסוי בתלות במרחק המנורמל מהגזע. ככל שנקודת הריתום לעלה יותר קרובה לגזע, קבוע הקפיץ האקוויולנטי יותר גבוה והתנגדות העלה יותר גבוהה. דהיינו, קבוע הקפיץ האקוויולנטי של העלה משתנה לאורכו באופן האקספוננציאלי כפי שמופיע במשוואות. על פי משוואות אלו נוכל לחשב את הכח הדרוש במגע עם עלה בכל נקודת מגע עימו ולכל כיוון.

$$Up : K = 3.34 \times e^{-6.68 \times x}$$

$$Down : K = 1.52 \times e^{-3.35 \times x}$$

$$Right : K = 2.76 \times e^{-6.14 \times x}$$

$$Left : K = 2.19 \times e^{-0.02 \times x}$$

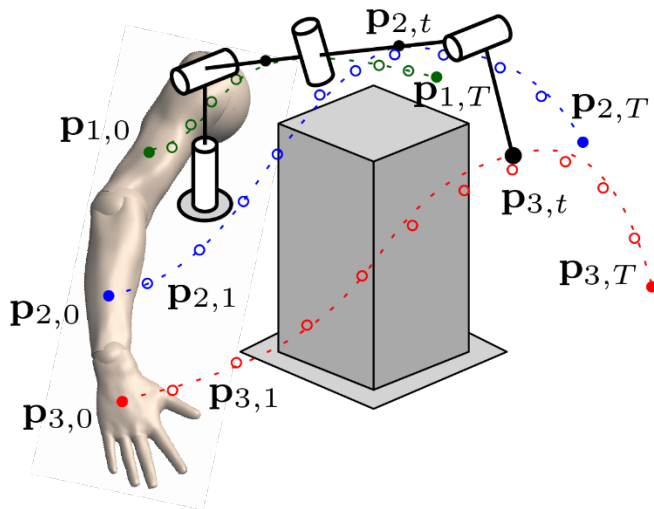
בוצע ניתוח סטטיסטי לבדיקת מודל קבוע הקפיץ האקוויולנטי של עלה כתלות במיקום המנורמל (באורך העלה), מסת העלה וקוטר שדרת העלה. הניתוח הסטטיסטי בוצע לכל כיוון תזוזה בניפרד. תוצאות הניתוח מראות קורלציה גבוהה בין קבוע הקפיץ למיקום בעלה ומובהקות סטטיסטית גבוהה (טבלה 5).

טבלה 5 : תוצאות ניסוי לבדיקת מודל הקפיץ המשתנה על עלי עץ הדקל

	% distance		mass		diameter	
	R	P-value	R	P-value	R	P-value
Down	0.896	2.575e-12	0.4966	0.002302	0.7655	9.177e-06
Up	0.903	1.151e-12	0.6832	7.898e-05	0.8526	3.388e-07
Right	0.913	3.813e-13	0.5823	0.0005848	0.8458	4.662e-07
Left	0.905	9.365e-13	0.6483	0.0001678	0.8241	1.189e-06
MEAN	0.90425	1.26095E-12	0.6026	0.000783395	0.822	2.792E-06

3.5.2 פיתוח קונספט לתיכנון זרוע אופטימלית

המשימה עוסקת בתנועה של זרוע רובוטית בסביבה עם מכשולים. המאפיינים לזרוע רובוטית אופטימלית הינן יכולת לבצע את המשימה, מספר המינימלי של DOF ורגישות נמוכה לשגיאות מיקום. מאחר והמשימה הינה חזרתית בסביבה סטטית יחסית, נגדיר זרוע רובוטית עם מספר מינימלי של DOF שיכול לעקוב במדויק אחר מסלול קרוב למיטבי. המסלול הקרוב למיטבי הוגדר על ידי ניסוי שכלל צילום תנועת יד אדם. אנו מניחים כי המסלול שנרשם על ידי מומחה אנושי הינו קרוב לאופטימלי במובן זה שהוא הקצר ביותר תוך שמירת מרחק ממכשולים. מכאן שרובוט מיטבי יוכל לעקוב אחר הנתיב במדויק ויהיה פחות רגיש לשגיאות מיקום ולסיכויי התנגשויות. על זרוע המומחה האנושי שביצעה את התנועה הוגדרו 3 נקודות (איור 45) כאשר בסימולציה, זרוע רובוטית בעלת N דרגות חופש נידרשה לערוך אחר מסלול קצה זרוע האדם תוך שמירה על מרחק מינימלי ממסלולי שאר הנקודות שהוגדרו.



איור 45: תיאור של קינמטיקת רובוט העוקבת אחר מסלול של יד מומחה אנושי. הזרוע הרובוטית עוקבת אחר התנועה של נקודה P3 כאשר שומרת מרחק מינימלי מנקודות P1 ו-P2 בכדי להתחמק ממכשולים.

המשימה מורכבת מרצף של מסגרות זמן. עבור כל מסגרת בודדת, אנו מבקשים להעריך את התאמתה של זרועה רובוטית נתונה לנקודות המתועדות המתאימות. מדד ההתאמה בזמן נתון t מוגדר כשגיאת שורש-מוצע-ריבוע משוקלל (wRMSE) בין שלוש הנקודות והרובוט.

$$g_{\Phi}(t, \mathbf{q}) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i \|s_{\Phi}(\sigma_i, \mathbf{q}) - p_{i,t}\|^2}$$

כאשר m הוא מספר הנקודות, p – מיקום הנקודה על זרוע המומחה האנושי, W – המשקל של

ההפרש לכל נקודה i – $s_{\Phi}(\sigma_i, \mathbf{q})$ מיקום המקום הקרוב ביותר לנקודה P על הזרוע הרובוטית

הנתונה. מדד ההתאמה המינימלי בכל רגע נתון בביצוע התנועה הינו:

$$G_{\Phi,t} = \min_{\mathbf{v}, \mathbf{q}_t} g_{\Phi}(t, \mathbf{q}_t)$$

הציון הכולל לזרוע רובוטית נתונה הינו סכום מדדי ההתאמה המינימליים לאורך המסלול ומבוטא

$$f(\Phi) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T G_{\Phi,t}$$

בנוסחה:

פונקציית המטרה של הזרוע הרובוטית האופטימלית מתייחסת לציון הכולל (f), אורך הזרוע (L), והמרחק הממוצע בין הזרוע לנקודות (E):

$$\Phi^* = \arg \min_{\Phi} \lambda_f f(\Phi) + \lambda_L L(\Phi) + \lambda_E E(\Phi)$$

בפיתוח אלגוריתם האופטימיזציה למציאת הזרוע הרובוטית המיטבית נלקח בחשבון שאלגוריתמים מטא-יוריסטים קלאסיים כגון PSO ו-ABC נתקלים בקשיים בהתכנסות בשל התנהגות לא לינארית במרחב החיפוש. בשרשרת הקינטית שמגדירה זרוע רובוטית, שינוי קטן במשתני הרובוט מביא להשפעה רבה במבנה הרובוט וההתנהגות הקינטית שלו ולכן יכולים להיות שינויים גדולים בפתרונות בין איטרציה אחת לשניה ואף התבדרות. בשל כך פיתחנו שיטה מטא יוריסטית חדשה המבוססת על PSO המתאימה למרחב חיפוש לא לינארי. בשיטה המוצעת, מיושמת שיטת PSO אך במידה ונמצא פיתרון ישים (זרוע רובוטית העונה על התנאים) מבוצעים שינויים קטנים במשתני הזרוע הרובוטית בכדי שהאלגוריתם יחפש פיתרון משופר בקרבת הפיתרון הקודם. במידה ובפיתרון אינו ישים מתבצע שינוי גדול במשתני הזרוע הרובוטית בכדי לחפש פיתרון ישים רחוק מהפיתרון הלא ישים שנמצא.

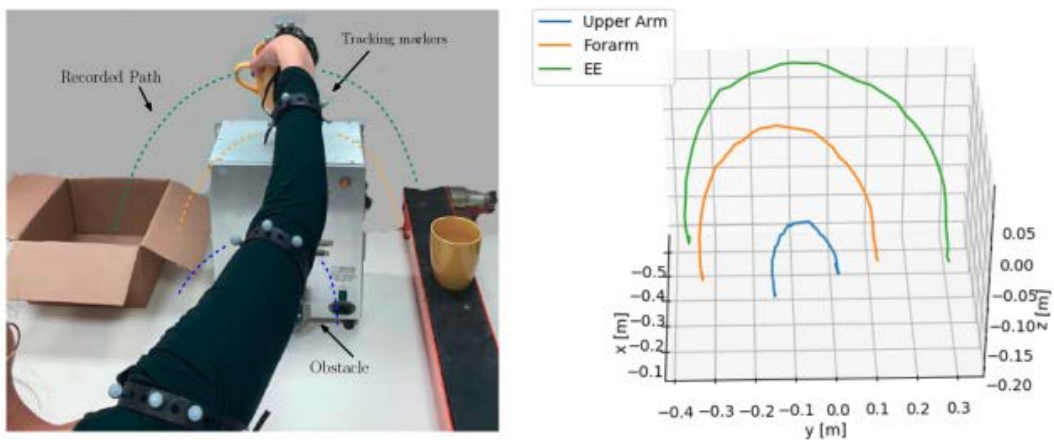
3.5.3 ניסויים ופיתוח אלגוריתם אופטימיזציה

בוצע ניסוי למדידת תנועת זרוע מומחה אנושי במספר מטלות פשוטות של תנועה במרחב. הקלטת תנועת זרוע המומחה האנושי בוצעה בעזרת מערכת OptiTrack הכוללת 8 מצלמות בהיקף המעבדה. על זרוע המומחה האנושי הוצמדו מרקרים אשר נקלטים על ידי המצלמות ומאפשרים את חישוב תנועת היד על ידי המצלמות (איור 46). נבנה מודל של צמרת עץ תמר לניסויי גישה לאשכולות (איור 47).

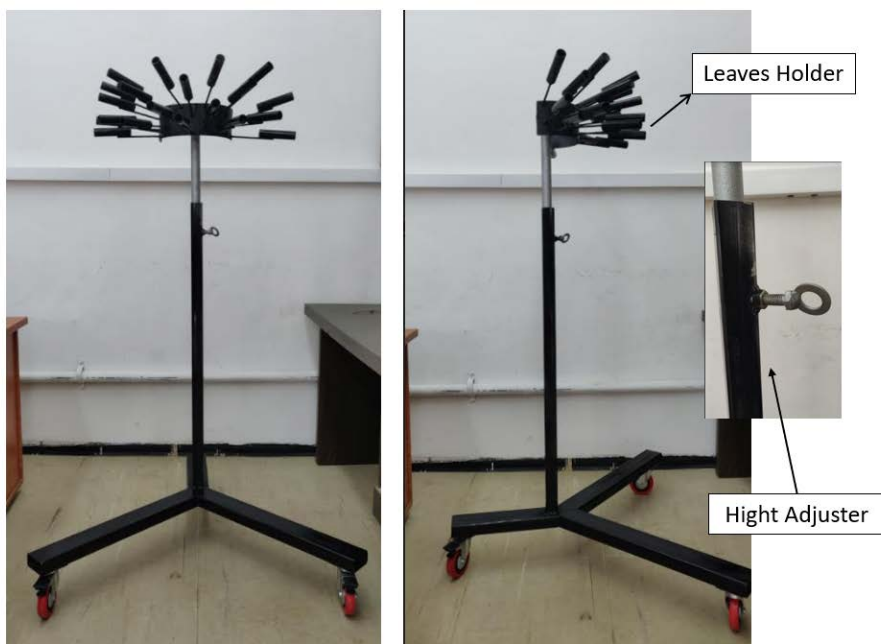
משתני האופטימיזציה לניסוי הם האורך L של 0.7 מ', האורך הכולל של הזרוע הרובוטית המיטבית 1.5 מ', בצעדים של 0.1 מ', משקלות המרקרים הם 1/6, 1/3 ו- 1/2 עבור הכתף, המרפק וכך היד בהתאמה.

כדי להגדיר את האלגוריתמים המיטביים לאופטימיזציה, נבחנו בתחילה 7 אלגוריתמים שונים (PSO, ABC, ES, WOA, GA, SA, SLSQP), כל אלגוריתם הריץ 10 קונפיגורציות רובוטיות שונות ב- 3 זמנים לאורך מסלול ביצוע המשימה. האלגוריתמים פותחו וניבדקו על HPC של המרכז לבינה מלאכותית בחקלאות שבולקני. תוצאות ההרצה מובאות בטבלה 6. נמצא כי סטיות התקן בשיטת SLSQP גבוהות ושיטה זו אינה מתאימה למשימה. שיטת ABC הגיע לתוצאות טובות אך זמן החישוב היה הגבוה ביותר. שיטת PSO נבחרה בשל תוצאות הרצה טובות וזמן חישוב נמוך יחסית. באיור 48

מובאות תוצאות איכות המודלים לכל אחת מדרגות החופש שניבדקו במדדי זמן התכנסות וציון המשימה המבטא את איכות האופטימיזציה (Meir et al., under review).



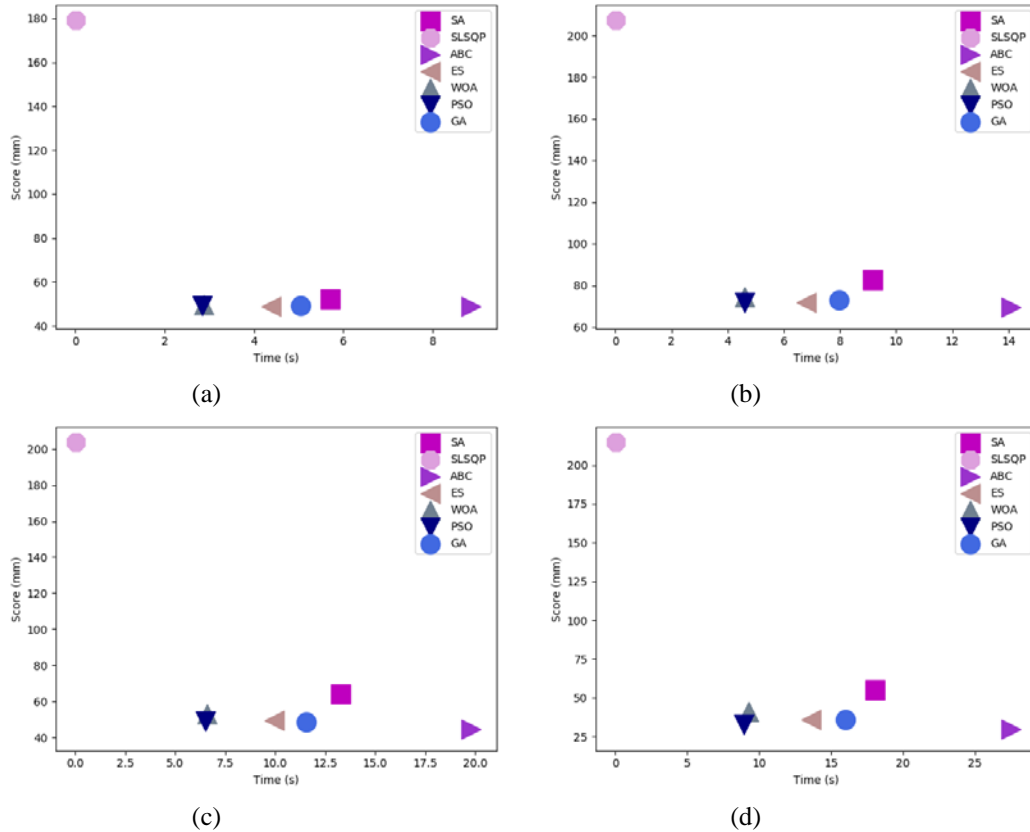
איור 46: הקלטת מסלול תנועת היד באמצעות המרקרים.



איור 47: מודל צמרת עץ תמר לניסוי מעבדה

טבלה 6: השוואת אלגוריתמי אופטימיזציה שונים

n	Mean $G_{\Phi, t}$ (mm)				Median $G_{\Phi, t}$ (mm)				Mean $G_{\Phi, t}$ computation time (s)			
	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
GA	49.04 ±25.10	72.90±50.88	48.50±41.7	36.12±17.62	39.90	51.62	28.33	30.36	5.05	7.96	11.56	15.99
PSO	49.35 ±25.02	71.97 ±52.07	48.76±42.88	32.70 ±17.97	40.11	49.31	26.21	23.60	2.84	4.59	6.51	8.95
WOA	53.13±42.80	74.69±50.98	71.80±9.92	40.96 ±19.49	40.78	55.43	32.22	34.18	2.87	4.59	6.58	9.25
ES	48.96 ±25.10	71.93±51.83	49.42±42.87	35.91 ±18.40	39.97	50.56	27.81	28.55	4.37	6.78	9.94	13.62
ABC	48.67 ±25.25	69.51 ±53.22	44.40±43.66	29.52 ±18.46	39.61	49.03	30.67	19.92	8.86	14.09	19.79	27.50
SLSQP	179.25±33.51	207.39 ±34.32	203.92±40.67	214.84±30.97	174.75	206.36	215.00	213.89	7e-3	15e-3	25e-3	39e-3
SA	51.98 ±24.58	82.44±51.74	63.99±45.32	54.97±19.58	41.71	61.18	41.77	45.51	5.70	9.16	13.25	18.05



איור 48: ציון המשימה וזמן ההתכנסות עבור אלגוריתמי אופטימיזציה שונים לארבע דרגות חופש: a - 3, b - 4, c - 5, d - 6.

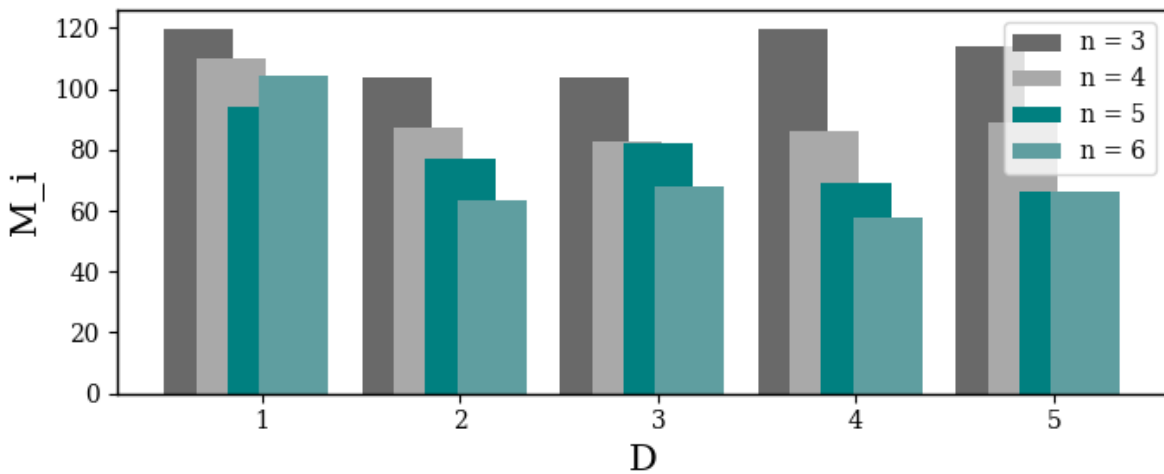
פותח אלגוריתם ייחודי המבוסס על אופטימיזציית PSO ומותאם לבעיית הקינמטיקה של זרועות רובוטיות (RA-PSO) ובוצעה השוואה בינו לבין אלגוריתם PSO (Meir et al., under review). אלגוריתם PSO רגיל משנה בכל איטרציה את ערכי הפרקים והמפרקים (Joints and links) בעוד שבאלגוריתם המשופר (RA-PSO) הוא משנה באופן שונה את ערכי הפרקים והמפרקים. בתחילה האלגוריתם משנה את ערכי ה-joints ובאיטרציות הבאות רק את ערכי ה-links כך שהאלגוריתם מחפש תוצאות טובות יותר מבחינת ה-links באותו אזור במרחק ה-joints. יחס הפעמים בהם משנים את ערכי ה-links לערכי ה-joints הוגדר בסימן D. אלגוריתם PSO רגיל מוגדר כ-D=1. כאשר לדוגמה D=3, על כל שינוי של ערכי ה-joints האלגוריתם משנה עוד פעמיים את ערכי ה-links.

טבלה 7 מציגה את ערכי השיפור של אלגוריתם RA-PSO עבור ערכי D שונים בהשוואה לאלגוריתם PSO (D=1). ערכים שליליים מציינים שיפור במדדי ביצוע המשימה.

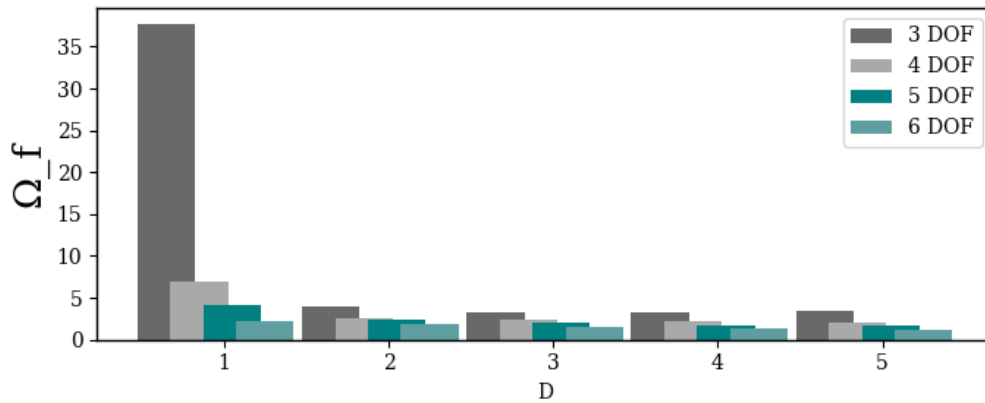
טבלה 7: אחוזי שיפור אלגוריתם RA-PSO עבור ערכי D שונים ביחס לאלגוריתם PSO. כל תרחיש מתאר משימה שונה. א: משימת pick and place; ב: משימת ריתוך; ג: משימת דילול חנטים. n מתאר את מספר דרגות החופש.

n	scenario	Φ^*				$f(\Phi)$				$E(\Phi)$			
		D				D				D			
		2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
3	I	-10.54	-15.64	-5.92	-7.4	-3.99	-9.19	3.22	-0.39	-20.07	-25.04	-19.24	-17.61
	II	3.03	9.84	0.86	5.04	12.08	14.11	7.65	12.74	-12.16	2.66	-10.51	-7.87
	III	-7.64	-2.95	-2.17	-2.69	-2.76	3.49	4.16	2.44	-17.59	-16.08	-15.08	-13.14
	Mean Improvement(%)	-5.05	-2.92	-2.41	-1.68	1.78	2.80	5.01	4.93	-16.61	-12.82	-14.94	-12.87
4	I	1.41	0.95	-0.38	-7.05	5.75	5.46	2.04	-3.51	-5.44	-6.21	-4.26	-12.68
	II	2.92	8.73	9.06	7.69	5.15	11.59	10.83	10.87	-18.2	2.63	5.27	0.91
	III	-3.9	0.15	-2.17	-1.83	-1.39	3.21	2.19	-0.47	-9.32	-6.18	-11.18	-4.62
	Mean Improvement(%)	0.14	3.28	2.17	-0.40	3.17	6.75	5.02	2.30	-10.99	-3.25	-3.39	-5.46
5	I	0.73	-1.06	5.47	12	1.93	0.05	6.99	12.96	-1.31	-2.96	2.89	10.36
	II	-0.18	4.24	9.21	8.13	0.54	5.54	10.04	7.54	-1.8	1.34	7.34	9.45
	III	-6.52	-4.3	-1.74	-3.95	-3.57	-1.7	1.96	1.18	-12.48	-9.54	-9.24	-14.3
	Mean Improvement(%)	-1.99	-0.37	4.31	5.39	-0.37	1.30	6.33	7.23	-5.20	-3.72	0.33	1.84
6	I	-2.31	-3.07	3.83	-2.31	-2.54	-4.65	4.25	-0.9	-1.91	-0.34	3.1	-4.73
	II	3.59	7.25	7.13	6.78	7.54	12.18	10.93	8.76	-4.55	-2.93	-0.69	2.67
	III	0.05	-0.09	2.03	3.55	1.36	-0.94	0.98	4.12	-2.58	1.59	4.14	2.41
	Mean Improvement(%)	0.44	1.36	4.33	2.67	2.12	2.20	5.39	3.99	-3.01	-0.56	2.18	0.12

הטבלה מראה כי ברוב המקרים אלגוריתם RA-PSO השיג תוצאות יותר מאלגוריתם PSO וכי במקרים בהם לא הושג שיפור ההבדלים אינם גדולים. בהשוואה של מספר האיטרציות הנדרשות להתנסות (Mi), נמצא כי נדרשות פחות איטרציות להתנסות באלגוריתם RA-PSO מאשר באלגוריתם PSO עבור זרוע רובוטית עם 4 דרגות חופש ומעלה (איור 49). כמו כן, גם מספר "הסוכנים התקפים" (valid agents) קטן באלגוריתם RA-PSO אשר מצביע על זמן הרצה קטן יותר של כל איטרציה (איור 50).

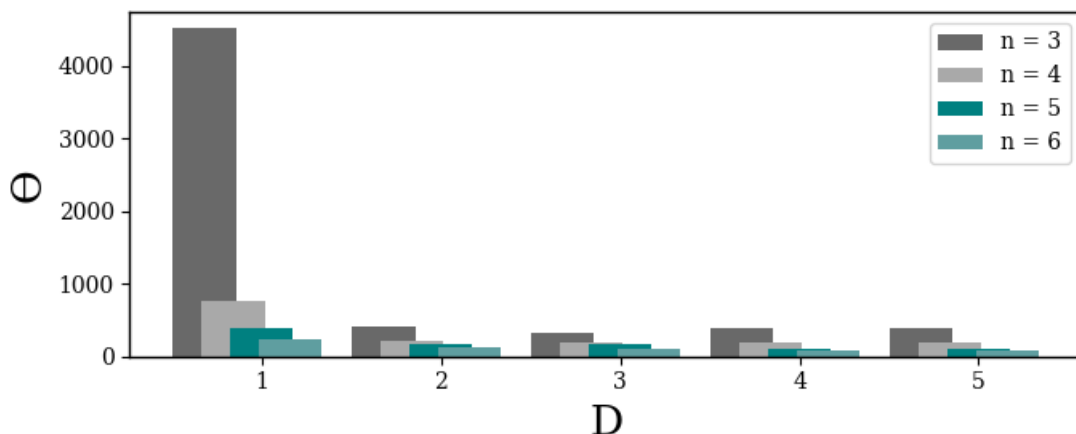


איור 49: מספר האיטרציות הנדרשות להתנסות בערכי D שונים ועבור מספר דרגות חופש שונה.



איור 50: מספר "סוכנים תקפים" עבור ערכי D שונים ובדרגות חופש שונות.

סכימה של מספר הסוכנים התקפים על פני כל האיטרציות הינו מדד הפרופורציונאלי לזמן חישוב דרוש או כח מיחשוב נידרש לביצוע האופטימיזציה ומסומן באות θ . איור 51 מראה כי θ הינו קטן משמעותית עבור הרצה של אלגוריתם מסוג RA-PSO לעומת PSO. בניתוח כל התוצאות המשוות בין אופטימיזציית RA-PSO ל-PSO נמצא כי אופטימיזציית RA-PSO עדיפה עבור $D=2$.



איור 51: אקוויולנט כח החישוב הדרוש עבור ערכי D שונים ובדרגות חופש שונות.

3.5.4 זרוע אופטימלית

ביצוע אופטימיזציה עם מודל RA-PSO שפותח במחקר זה ו- $D=2$ למשימת דילול חנטי תמר (תרחיש III) מצא כי ההבדל בין זרוע בעלת 6 דרגות חופש ל-5 דרגות חופש הינו 2% (לטובת 6 דרגות חופש) ו-9% בין 6 ל-4 דרגות חופש. במכלול המדדים כולל הקטנת הסיבוכיות נבחרה זרוע רובוטית עם 5 דרגות חופש המתוארת בטבלה 8.

טבלה 8: תיאור המאפיינים הקינמטיים וביצועי הזרוע הרובוטית הנבחרת.

Sc.	n	ϕ^*	$f(\Phi)$	$E(\Phi)$	i	a_i	a_i	d_i
III	5	1.63 m	72.91 mm	53.79 mm	0	0	0	0
					1	-1.57	0.27	0
					2	-1.10	0	0
					3	00.49	0.33	0
					4	1.51	0	0
					EE	1.57	0	0.1

היות והזרוע האופטימלית לא קיימת, בוצעה התאמה של מסלולי התנועה לזרועה מסוג Kinova
(איור 52).



איור 52: בחינת מסלולי התנועה עם זרוע רובוטית מסוג Kinova.

3.6 אינטגרציה

פיתוח מערכת דילול מכני אוטונומית משולבת אדם מחייב מחקר אנטרדיסיפלינרי הנדסי-ביולוגי ואינטגרציה של מכלולי המערכת והתכליכים השונים. בכדי שניתן יהיה לדלל חנטים באופן מכני יש לפתח את שיטת הדילול הרצויה מההיבטים הביולוגיים / האגרוטכניים בשילוב עם המחקר ההנדסי. המחקר עוסק בכל שלושת השלבים של משימת הדילול ומחייבת שילוב של מחקר הנדסי ומחקר ביולוגי/אגרונומי. המערכת הכוללת מבוססת על מערכת לזיהוי האשכול והערכת רמת החנטים ואמצעי לחיתוך הסנסנים אשר יהיה מורכב על זרוע או מערכת אוטומציה רובוטית ומערכת בקרה משולבת אדם ומערכת קבלת החלטות.

פיתוח כל אחת מתתי המערכות והמכלולים התייחסה בשלב ההמחקר והפיתוח לממשק עם המערכות האחרות והאינטגרציה עימן, לדוגמה, מערכת הדילול ומערכת החישה התייחסו למערכת הנושאת (הזרוע הרובוטית) ומגבלותיה (כגון יכולת נשיאה, יכולת תמרון וכדומה). תיכנון המערכת הרובוטית ומסלולי הגישה התייחסה לצידוד והמערכים אשר הזרוע נושאת. באופן דומה מערכת קבלת ההחלטות מושפעת מאופן הדילול, מגישת הדילול, מאמצעי הדילול ואופן פעולתו וכן מאפשרויות המערכת הרובוטית. בנוסף, פיתוח כל המכלולים במקביל מאפשר מתן מענה כולל ושלם. בוצעו ניסויים שכלו אינטגרציה בין 2-3 מכלולים כגון ניסוי דילול עם מתקן הדילול שהותקן על ידי זרוע רובוטית מסחרית (איור 8) וניסוי חישה של אשכולות החנטים באמצעות הסונר וזרוע רובוטית (איור 29). מערכת תומכת החלטה וממשק אדם-מערכת שנמצאת בלב המערכת הכוללת (RTDS) פותחה באופן שיאפשר אינטגרציה בין כל המערכות והמכלולים בתהליכים השונים הנדרשים לביצוע משימת דילול החנטים (טבלה 2, איור 35, איור 36). לא ניתן היה לבצע אינטגרציה מלאה מאחר והזרועות

הרובוטיות המסחריות לא יכלו לשאת את כל תתי המערכות והמכלולים. בסיום פיתוח הזרוע הרובוטית הייעודית לדילול תבוצע אינטגרציה מלאה של המערכת.

4. דיון ומסקנות

פיתוח מערכת דילול מכני אוטונומית משולבת אדם מחייב מחקר אינטרדיסציפלינרי הנדסי-ביולוגי. בכדי שניתן יהיה לדלל חנטים באופן מכני יש לפתח את שיטת הדילול הרצויה מההיבטים הביולוגיים / האגרוטכניים בשילוב עם המחקר ההנדסי. פיתוח מערכת הדילול ומערכת החישה חייבות להתייחס למערכת הנושאת (הזרוע הרובוטית) ומגבלותיה (כגון יכולת נשיאה, יכולת תמרון וכדומה). תיכנון המערכת הרובוטית ומסלולי הגישה מחייבת התייחסות לציוד והמערכים אשר הזרוע נושאת. באופן דומה מערכת קבלת ההחלטות מושפעת מאופן הדילול, מגישת הדילול, מאמצעי הדילול ואופן פעולתו וכן מאפשרויות המערכת הרובוטית. בנוסף, פיתוח כל המכלולים במקביל מאפשר מתן מענה כולל ושלם.

במהלך מספר עונות דילול פיתחנו מערכת קצה ליישום הדילול, המערכת הנוכחית מבוססת בעיקרה על מצבט חובק ומסור דיסק עגול. המערכת נבחנה ביכולתה לבצע חיתוך סנסנים עם חנטים במידות שונות ועל עצים במטעים שונים. בניסויים לאורך הפיתוח נמצא תמיד שבשיטה הזו הקצב של ביצוע משימת הגיזום של סנסנים לצורכי דילול הוא מהיר עד פי 10 מהגיזום הידני המקובל. ממצא זה מעודד מבחינת הכדאיות הכלכלית של יישום שיטה זו כתחליף לעבודה הידנית. עבודת הדילול היא כיום רבע מהעבודה הידנית המושקעת במטעי מג'הול. הוכחה היכולת לקבל בגישת הדילול שפותחה אשכול המדולל כיאות מחד ומאידך ההתאמה להרכבה על זרוע רובוטית כחלק מרובוט לדילול בתמרים כולל בתפעול על מתקן עבודה בגובה. במקביל, נמצא כי נדרש לפתח זרוע רובוטית ייעודית המתאימה למשימה זו ובעלויות שיש סיכוי שמגדלים יוכלו לעמוד בהן והנושא נמצא בשלבי בנייה מתקדמים. בוצע תכן של זרוע רובוטית ייעודית לדילול חנטי תמר מגהול על פי המאפיינים שחושבו. המערכת שאופיינה ומפותחת תכיל המערכות הנדרשות להפעלת הרובוט כגון: אנקודרים מובנים, דרייברים ובקרים המיועדים לתקשורת עם מחשב בכדי לבנות מערכת רובוטית לניסוי במטע אשר תכיל את כל המכלולים בפריקט כגון יחידת חיתוך הסנסנים וחיישנים. המערכת הרובוטית כוללת 5 מנועי סרוו ושתי בוכנות סרוו לינאריות. בנוסף, הוגדרו מאפייני דיוק של 10 מ"מ, ושימוש בתימסורות להפחתת מהירות התנועה והגדלת הכוחות והמומנטים הנדרשים. בוצע ניסוי בדיקת כוחות כיפוף על המוט אשר התבסס על העמדת הדורגל במחצית המוט. בדיקת כוחות העלתה שמדובר בכ- 280 ניוטון.

בוצע פיתוח של אשכולות וירטואליים לצורך אימון אלגוריתמים להערכת גודל האשכול ומציאת מישור הדילול. הוקמו מאגרי תמונות לצורך זיהוי פרמטרי האשכול לתיכנון תנועת הזרוע לדילול. פותחו מספר אלגוריתמים מבוסס צבע ומאפיינים גאומטריים של האשכול לזיהוי נקודת מרכז קצה הידה, זווית הידה ואורך ורוחב האשכול. כמו כן פותח אלגוריתם של זיהוי כיוון האשכול במרחב על פי זיהוי כיוון המסגרת של הסנסנים. רובוט UR5 מודל בסביבת תכנת UNITY ובעזרת חבילת למידת המכונה ML- Agents בוצעה למידה של מסלולי תנועה. הסביבה שמודלה בשלב הראשון הינה הגעה לנקודה (כהכנה להגעה למנח אחיזת הידה מתחת לסנסנים). הלמידה נעשית באמצעות למידת חיזוקים עמוקה

עם אלגוריתם Proximal Policy Optimization (PPO) וברשת נוירונים שכוללת 2 שכבות שבכל אחת מהן יש 128 נוירונים.

פותחה מערכת סונר רב ערוצית הכוללת ארבעה משדרים ושמונה מיקרופונים להקלטת הדי חנטיים. המערכת משדרת וקולטת בקצב של 250 קה"צ בכל ערוץ. המערכת נבנתה מחומרה ייעודית ונכתב קוד חדש להפעלתה. בוצעו ניסויים לאיסוף ההדים מאשכולות במעבדה ובמטע. במטע בוצע איסוף של מאות הדי חנטיים לפני ואחרי דילול בעונת הדילול. פותח אלגוריתם להערכת כמות החנטיים בהתבסס על ההדים המבוסס על רגרסיה פשוטה. האלגוריתם הציג יכולות טובות עם שגיאה ממוצעת של 11% ממשקל החנטיים. פותח אלגוריתם לומד לשחזור תלת-מימדי של עצמים, יוצר מאגר מדע של הדים של עצמים תלת מימדיים המדמים פירות ואומנה רשת נוירונים (הכוללת שכבות RNN+CNN), שמקבלת את ההד כאינפוט ומשחזרת את צורתו בתלת-מימד על בסיס הנתונים. הגישה הוכיחה את יכולתה לשחזר צורת עצם תלת מימדי על בסיס ההד שלו. בעתיד, השיטה תוכל לשמש לשחזור תלת מימד של ענף נושא פירות אשר שיאפשר לספור את מספר העצמים (פירות / חנטיים).

בתחום ממשקי אדם-מערכת, על בסיס רמת האוטומציה הרב-מימדית בוצע פיתוח מודל Operational Event Sequence Diagrams (OESD) והוגדרו 5 מרכיבי מערכת ורשימת דרישות המכתיבה את ממשקי-אדם מערכת. כמו כן, הניתוח ממפה את ההתממשקות של רכיבי המערכת המפותחים על ידי הצוותים השונים והאינטראקציה ביניהם. בוצעו צילומים במטעי תמר. על גבי רובוט נייד שפותח במעבדה לרובוטיקה חקלאית במכון וולקני הותקנו שלוש מצלמות, צולמו כ-30 סרטים משלוש מצלמות במקביל (סך הכל 90 קבצי צילום). בסדרת צילומים ראשונה (כ-24 צילומים) הרובוט נסע על הקרקע והקיף את העצים הצעירים תוך צילום רציף של אשכולות העץ. בסדרת הצילומים השנייה (כ-6 צילומים) הרובוט הועמס על במת גובה אל רום העץ (כ-16 מטר). בוצעו צילומים בזמן נסיעה סביב העץ על גבי הבמה, כמו גם צילומים בהם נעשה שינוי כיוון התבוננות זרוע הרובוט לא בנטיעה. על סמך נתונים אלו פותח ממשק משתמש לשיתוף פעולה אדם-רובוט למשימת דילול חנטי תמרים. בוצע ניסוי שימושיות אשר העלה נקודות מרכזיות לשיפור, אשר חלקם יושמו וחלקם יועדו לשלבי הפיתוח הבאים.

בוצע ניסוי ופיתוח מודל לתיאור התכונות הפיסיקליות של עלה תמר הרתום לגזע. המודל מדמה קורה רתומה באמצעות מערכת קפיצים אל גזע העץ. פותח קונספט לתנועה של זרוע רובוטית בסביבה עם מכשולים. בוצע ניסוי למדידת תנועת זרוע מומחה אנושי בשלוש משימות רובוטיות: pick and place, ריתוך ודילול חנטיים. פותח קונספט לתיכנון זרוע אופטימלית למשימת דילול חנטיים. נבחנו 7 אלגוריתמי אופטימיזציה שונים למציאת הזרוע הרובוטית המיטבית לביצוע המשימה. פותח אלגוריתם אופטימיזציה חדש (RA-PSO) המבוסס על מודל PSO אשר הראה ביצועים משופרים בקצב ההתכנסות, זמן החישוב וכח המיחשוב הנידרש. באמצעות מודל האופטימיזציה נמצאה הקונפיגורציה הרובוטית המיטבית ונבחנה בסימולציה. נערך ניסוי מעבדה עם זרוע מסוג kinova תוך התאמה של מסלולי התנועה מהזרוע המיטבית שנמצאה.

5. רשימת ספרות מצוטטת ובתחום

- סדובסקי א., טיקוצ'ינסקי ת. 2011. יבול דילול וגודל פרי בתמר "מג'הול" (2008 - 2010). עלון הנוטע ס"ד דצמבר 2010- ינואר 2011, 26 - 30 .
- סדובסקי א., סטרומ מ., בבאי א., גרינברג א., בכר א., דר א., לוי מ., פינקלשטיין ר., כהן א., איגנט ט., 2015. גדיד מכני מול גדיד ידני בתמר 'מג'הול' עסיסי. עלון הנוטע ס"ט, פברואר 2015, 38-42.
- סדובסקי א., טיקוצ'ינסקי ת., קצמן ע., 2017. סרוגיות הנבה במג'הול. 'עלון הנוטע' שנה ע"א, פברואר 2017, 30 - 32.
- Afgin, N. Sagi, I. Nisky, T. Ganel, S. Berman, 2017, Visuomotor resolution in telerobotic grasping with transmission delays, *Frontiers in Robotics and AI-Bionics and Biomimetics*, <https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00054>.
- Bac, T. Roorda, R. Reshef, S. Berman, J. Hemming, E.J. van Henten, 2015, Analysis of a motion planning problem for sweet-pepper harvesting in a dense obstacle environment, *Biosystems Engineering*, 145, 86:97.
- Bar-Shira, O., Y. Cohen, T. Shaubi, A. Bechar, A. Sadovskiy, Y. Cohen, S. Berman, Medjoul date fruit-bunch 3D model for learning thinning length. *Journal of the ASABE (Previously Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineering) Special Collection Artificial Intelligence Applied to Agricultural and Food Systems*.
- Bar-Shira, O., Y. Cohen, T. Shaubi, A. Sadowky, Y. Cohen, A. Bechar, S. Berman, 2019. Learning motion parameters for a Mejdool-date thinning robot, XXXVIII CIOSTA & CIGR Section V Conference, Rhodes, Greece, June 24-26.
- Bechar, A., and C. Vigneault. (2016). *Agricultural Robots for Field Operations: Concepts and Components*. *Biosystems Engineering* 149: 94-111.
- Bechar, A., and C. Vigneault. (2017). *Agricultural Robots for Field Operations: Operations and Systems*. *Biosystems Engineering* 153:110-128.
- 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.
- Berman, Y. Edan and M. Jamshidi, 2003. Navigation of decentralized autonomous automatic guided vehicles in material handling, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(4):743-749
- Bloch, V., A. Degani and A. Bechar (2018). A Methodology of Orchard Architecture Design for an Optimal Harvesting Robot. *Biosystems Engineering* 166: 126-137.
- Blumrosen G, Fishman B, J, Yovel Y, (2013) Non-contact Wideband Sonar for Human Activity Detection and Classification, *Sensors Journal, IEEE* Vol. PP, Issue: 99, p.p. 1-1
- Boonman A, Fenton B, Yovel Y (2019) The benefits of insect-swarm hunting to echolocating bats, and its influence on the evolution of bat echolocation signals. *PLOS Computational Biology* 15(12): e1006873.
- Cohen, O. Bar-Shira, S. Berman, 2020. Motion Adaptation Based on Learning the Manifold of Task and Dynamic Movement Primitive Parameters, *Robotica*, 1-17
- Eizicovits and S. Berman, 2018. Primitive based Graspability map generation, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 110:1-11
- Eizicovits, B. Van Tuijl, S. Berman and Y. Edan, 2016, Integration of perception capabilities in gripper design using graspability maps, *Biosystems Engineering*, 146:98-113.
- Eizicovits, S. Berman, 2014. Efficient sensory-grounded grasp pose quality mapping for gripper design and online grasp planning, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 62(8): 1208-1219.
- Eliakim I, Cohen Z, Kosa G, Yovel Y (2018) A fully autonomous terrestrial bat-like acoustic robot. *PLOS Computational Biology* 14(9): e1006406.

- Finkelshtain, R., A. Bechar, Y. Yovel and G. Kosa (2016) Investigation and Analysis of an Ultrasonic Sensor for Specific Yield Assessment and Greenhouse Features Identification. *Precision Agriculture*. Precision Agriculture
- Finkelstein, R., A. Bechar, Y. Yovel and G. Kosa (2017). Investigation and Analysis of an Ultrasonic Sensor for Specific Yield Assessment and Greenhouse Features Identification. *Precision Agriculture* 18(6): 916-931.
- Finkelstein, R., A. Bechar, Y. Yovel and G. Kosa (2017). Investigation and Analysis of an Ultrasonic Sensor for Specific Yield Assessment and Greenhouse Features Identification. *Precision Agriculture* 18(6): 916-931 1-16.
- Jiménez, A.R., R. Ceres, and J.L. Pons, A vision system based on a laser range-finder applied to robotic fruit harvesting. *Machine Vision and Applications*, 2000. 11(6): p. 321-329.
- Lati, R.N., Rosenfeld, I. Ben David and A. Bechar (2021). Power on! Low Energy Electro-Physical Treatment Is an Effective New Weed Control Approach. *Pest Management Science* (Accepted)
- Linker, R., O. Cohen, and A. Naor. 2012. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture* 81:45-57.
- Meir, I., A. Bechar and A. Sintov. Kinematics Optimization of a Robotic Arm for Automation Tasks with Human Demonstration. *RAL*. Under review.
- Milstein, T. Ganel, S. Berman, I. Nisky, 2018. Transparency of grasping via a robot-assisted minimally invasive surgery system *IEEE Trans Human Machine Systems*, 48(4): 349 - 358 .
- Regev, M., S. Berman 2022, Medjool dates images with two synchronized cameras, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/2vrnwk3p4r.1
- Salzer Y., N. Saraf, A. Bechar, Y. Cohen, Z. Schmilovitch, S. Berman, Y. Yovel, A. Szdowsky and E.J. Bass. Combining function allocation and operational sequence diagrams to elicit human-robot collaboration requirements in a robotic dates thinning system. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. Under review
- Schor, A. Bechar, T. Ignat, A. Dombrovsky, Y. Elad and S. Berman, 2016, Robotic disease detection in greenhouses: combined detection of Powdery Mildew and Tomato Spotted Wilt Virus, *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)* (and *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*), 1(1):354-360.
- Schor, N., A. Bechar, T. Ignat, A. Dombrovsky, Y. Elad, and S. Berman (2016). Robotic Disease Detection in Greenhouses: Combined Detection of Powdery Mildew and Tomato Spotted Wilt Virus. *The IEEE Robotics and Automation Letters* 1(1): 354-360.
- Schor, N., S. Berman, T. Ignat, A. Dombrovsky, Y. Elad, and A. Bechar (2017). Development of a robotic detection system for greenhouse pepper plants diseases. *Precision Agriculture* 18(3): 394-409.
- Schor, S. Berman, A. Dombrovsky, Y. Elad, T. Ignat and A. Bechar, 2016. Development of a robotic detection system for greenhouse pepper plant diseases, *Precision Agriculture*, 18(3):394–409).
- Shoshan, T., A. Bechar, Y. Cohen, A. Sadowsky and S. Berman, 2022. Segmentation and motion parameter estimation for robotic Medjoul-date thinning. *Precision Agriculture*, 23(2):514-537.
- Shoshan, T., S. Berman, 2021. Medjoul-date images—Annotated, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/k7xk2 nwgrh.1
- Singh, S. Berman, I. Nisky, 2017, Stochastic optimal control for modeling reaching movements in the presence of obstacles: theory and simulation, *arXiv preprint arXiv:1701.01547*.
- Stajanko, D., M. Lakota, and M. Hoever. 2004. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 42(1):31-42.
- Wachs, J. P., H. I. Stern, T. Burks, and V. Alchanatis. 2010. Low and high-level visual feature-based apple detection from multi-modal images. *Precision Agriculture* 11(6):717-735.

- Wang, D., R. Vinson, M. Holmes, G. Seibel, A. Bechar, S. Nof and Y. Tao (2019). Early Detection of Tomato Spotted Wilt Virus by Hyperspectral Imaging and Outlier Removal Auxiliary Classifier Generative Adversarial Nets (OR-AC-GAN). *Scientific Reports* 9(1).
- Yehezkel, S. Berman, D. Zarouk, 2020. Overcoming Obstacles with a Reconfigurable Robot Using Reinforcement Learning, *IEEE Access*, 8:217541-217553
- Yovel, M. Franz, P. Stilz, H-U. Schnitzler, (2011) Complex echo classification by echo-locating bats: a review, *J. Comp. Physiol.* 197: 475-490;
- Yovel, M. O. Franz, P. Stilz, H-U. Schnitzler (2008) Plant Classification from Bat-Like Echolocation Signals. *PLoS Comput Biol* 4(3): e1000032.
- Yovel, P. Stilz, M.O. Franz, A. Boonman, H-U Schnitzler, (2009) What a plant sounds like: the statistics of vegetation echoes as received by echolocating bats. *PLoS Comput Biol* 5(7): e1000429. (Open article)
- Zhong, S.Y. Nof, S. Berman, 2014. Asynchronous Cooperation Requirement Planning with Reconfigurable End-Effectors, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 34:95-104.