

מערכת רובוטית להאבקה וריסוס אוטומטיים בצמרות עצים

Robotic system for automatic pollination and spraying on tree tops

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

שמואל גן-מור	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
יצחק שמולביץ'	המרכז למחקר בהנדסה חקלאית, הנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון, חיפה
רפי לינקר	המרכז למחקר בהנדסה חקלאית, הנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון, חיפה
יוסף גרינשפון	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
בני רונן	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
לביא רוזנפלד	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
ירון גליק	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
דן איזיקוביץ'	המחלקה לבוטניקה, אוני' תל אביב, רמת אביב

Samuel Gan-Mor, The Institute of agr. Eng. ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250. E-mail ganmor@agri.gov.il

Itzhak Shmulevitch, Civil and Environmental Engineering, Technion, Haifa 32000

Rafi Linker, Civil and Environmental Engineering, Technion, Haifa 32000

Yosef Greenshpon, The Institute of agr. Eng. ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250.

Beni Ronen, The Institute of agr. Eng. ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250.

Lavi Rosenfeld, The Institute of agr. Eng. ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250.

Yaron Glik, The Institute of agr. Eng. ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250.

Dan Eisikowitch, Dept. of Plant Sciences, Tel Aviv Univ. Ramat Aviv

אפריל 2011

סיוון תשע"א

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

חתימת החוקר

1. תקציר

הצגת הבעיה – מטעים בישראל ובפרט מטעי תמרים מתנשאים לגובה רב המחייב שימוש במתקני גובה כדי ליעל את העבודה. אבל, גם מתקנים יקרים שעלותם כמה מאות אלפי ₪ ואף יותר ממיליון שקלים, משיגים הספקי עבודה נמוכים ובטיחות נמוכה בפעולות מסוימות. מערכת אוטומטית/רובוטית לריסוס והאבקה בעצי תמר גבוהים פותחה כדי לשפר את בטיחות העובד, יעילות העבודה ועלותה.

מטרת המחקר הנוכחי הינה לפתח מערכת אוטומטית לביצוע פעולות בצמרות עצים מעל גבי זרוע מיוצבת המשמשת כפלטפורמה למערכות האבקה, ריסוס ופעולות נוספות.

שיטות העבודה ותוצאות עיקריות – בשנה הראשונה בוצע פיתוח משלים של מערכת זרוע מיוצבת לנשיאת מערכת להאבקה ולריסוס ושופרו אמצעי החישה והבקרה של מערכת ייצוב הזרוע שנבנתה במחקר מקדים. פותחה מערכת לסימולציה דינאמית רבת גופים שמטרתה לשפר את הבקרה והייצוב של הזרוע המיוצבת. הודגמה התאמה בין הסימולציה לניסויים בשדה. בחינת ביצועי הייצוב על פי פונקציית בקרה פשוטה, בסימולציה מחשב ובניסויים, הראתה שייצוב אקטיבי עדיף על ייצוב פסיבי. ניסויי ההאבקה באמצעות המערכת הראתה תוצאות טובות. ניסויי הריסוס הראו צורך בהגברה של מהירות אוויר באזור המטרה וצורך בתכנון והתקנה של מפוח ייעודי. בשנה השנייה שופרה הבקרה של ייצוב הזרוע ופותחה מערכת אוטומטית לכוון הצידוד של הפיה ומערכת כוונן ידנית לקביעת גובה הפיה. כמוכן תוכנן והותקן מפוח בעל ספציפיקציות העונות במדויק לצרכי ריסוס האשכולות וכן משאבה ומנוע הידראוליים ומערכת הידראולית להפעלת המפוח באמצעות מעביר הכוח של הטרקטור. תוכננה ונרכשה מערכת ריסוס המאפשרת פעולה עצמאית של הכלי. תוכננה והותקנה כוונת, המבוססת על מצלמת וידאו ומסך, המאפשרת כוונן ראשוני ידני והמשך אוטומטי של הפעולה. תוכננה והותקנה מערכת אוטומטית להפעלה, מעקב והפסקה של פעולת ההאבקה או הריסוס. באמצעות תוכנת הסימולציה נבחנו פונקציות שונות לשיפור היציבות ולהקטנת הסטיות של התורן המרכזי ונמצאו הגורמים המשפיעים מהותית או שולית על היציבות. בשנה השלישית בוצעו ניסויי ריסוס והאבקה במטע מסחרי ולאחר שיפורים בפעולת הכוונן וחלוקת האוויר בפיה הושגו תוצאות טובות הן בריסוס והן בהאבקה.

מסקנות והמלצות – המערכת שפותחה נבנתה ונבחנה בתנאים שונים. ייצוב הזרוע האנכית משיג רמות דיוק גבוהות עבור ייצוב אקטיבי לפי פונקציות בקרה פשוטות. המערכת מבצעת ריסוס והאבקה מדויקים במטע מסחרי של עצי תמר גבוהים שצמרתם מגיעה ל- 15 מטר, כאשר המפעיל נוסע בגובה בטוח ע"ג טרקטור סטנדרטי.

2. מבוא

רקע מדעי - עלות של כלים לטיפול גובה במטע ועלות שעת העבודה של כל כלי גבוהים יחסית לכלים חקלאיים נפוצים. כלים אלה בנויים לעבודה סטטית ומעבר במצב נמוך מעץ לעץ כדי להמנע מהתהפכות. פעולות בהן הטיפול בעץ קצר והמעבר מעץ לעץ הוא תכוף, כמו בהאבקה ובריסוס תמרים, מנוגדות לתכנון הבסיסי/ראשוני של הכלים, בפרט במטעים ותיקים שגובהם כ- 15 מטר, כי הן מכתיבות תנועה במצב מוגבה. כדי לבצע פעולה בגובה רב, תוך כדי נסיעה לא

איטית בשטח לא מיושר, נדרשת התקנה של מנגנון לייצוב המערכת. ניתן להזיל את עלות הפעולות על ידי הפעלה של כלי שמחירו נמוך משמעותית מכלי גובה וניתן לשפר את בטיחות העובד אם הוא ממוקם על טרקטור סטנדרטי ולא על כלי הגובה.

במחקר מקדים, פותחה מערכת להאבקה אשר הופעלה מכלי גובה והוגדרו הפרמטרים האופטימאליים לביצוע המשימה מכלי גובה. על פי ממצאי המחקר המקדים נקבע כי יש לחלוף עם מוצא סילון הנושא אבקה בקרבת התפרחת. בהתאם לגאומטריה של נוף התמר מרחק זה הוא בין 2.5 ל- 3 מטר וכיוון המוצא הינו בזווית של 60 מעלות יחסית לקרקע. יישום אבקה על פי הנחיות אלה משיג גם חיסכון רב בכמות האבקה המורבצת וגם כיסוי גבוה של צלקת העלי. המלצות אלה מתאימות לביצוע גם ע"י זרוע אוטומטית. העבודה הנוכחית מסתמכת גם על מחקר אחר בו נמצא שכיסוי טוב בריסוס אשכולות מושג כאשר התריסס נישא בסילוני אויר מהירים (קרוב ל- 20 מ/ש) באזור המטרה. במחקר מקדים נוסף תוכנן ונבנה אבטיפוס ראשוני של זרוע אוטומטית הכוללת ייצוב פשוט של הזרוע בעת שהמסגרת עליה מוצבת הזרוע נעה במהירות של כ- 4 קמ"ש על שטח משובש. היציבות בעבודה המקדימה היתה גבולית.

שיפור הייצוב בצורה אקטיבית של הזרוע או התורן לרמה טובה צפוי להקנות למערכת יכולת תנועה במהירות פי 3 לעומת המערכת החדשה ביותר הקיימת בשוק. לכן, המערכת המוצעת תוכל לפי ההערכה לחסוך כ- 70% בשעות העבודה, בנוסף לכך המערכת המתוכננת אמורה להעסיק שני עובדים בתנאים נוחים לעומת 3 עובדים בתנאים קשים כיום.

המטרה הכללית של המחקר הנוכחי - לפתח מערכת אוטומטית לביצוע פעולות בצמרות עצים מעל גבי זרוע מיוצבת המשמשת כפלטפורמה למערכות האבקה, ריסוס ופעולות נוספות. המטרות לשנה א' – שיפור הייצוב של הזרוע הרובוטית באמצעות ניסויים וסימולציה דינאמית רבת גופים של הזרוע והמסגרת, שיפור של מערכת הבקרה וכן פיתוח של מערכת לזיהוי מדויק של מיקום צמרת התמר. ביצוע ניסויים ראשוניים בתנאים חצי מסחריים של ריסוס והאבקה וניתוח תוצאות.

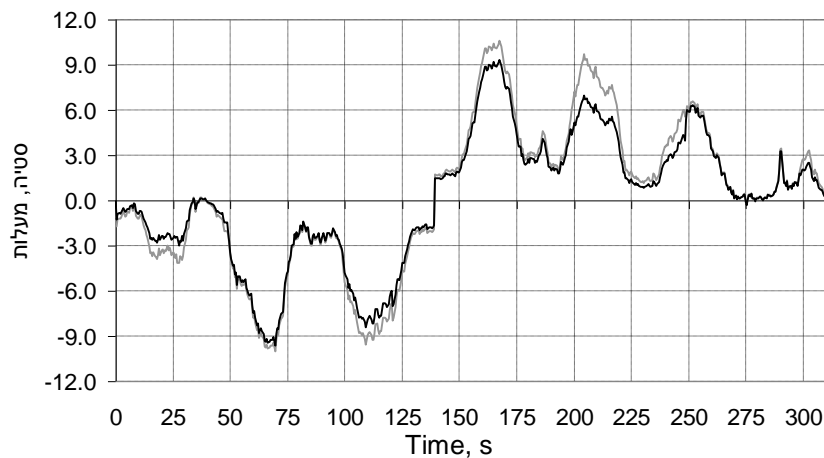
המטרות לשנה ב' – התקנת מערכת ריסוס ומפוח עצמאיים על הכלי על פי פרמטרים שנקבעים לפי תוצאות הניסויים בשנה הראשונה כדי להשיג שיפור של ביצועי הכלי. שופרו פרמטרים כמו עוצמת המפוח, ייצוב הזרוע, הפעלה אוטומטית של הריסוס, ההאבקה וציוד הפיה. כמוכך התקנת מערכת ידנית לסיוע בכוונון הפיה.

המטרות לשנה ג' - ביצוע ניסויי ריסוס והאבקה במטע מסחרי וביצוע שיפורים נוספים, כמו, שיפור פעולת פית האוויר, שיפור פעולת הכוונון, שיפור הייצוב בהתאם ללימוד נוסף שמקנה הסימולציה והתאמת המערכת לנתוני מטע כמו נטיית העץ בתוך השורה או בניצב לה.

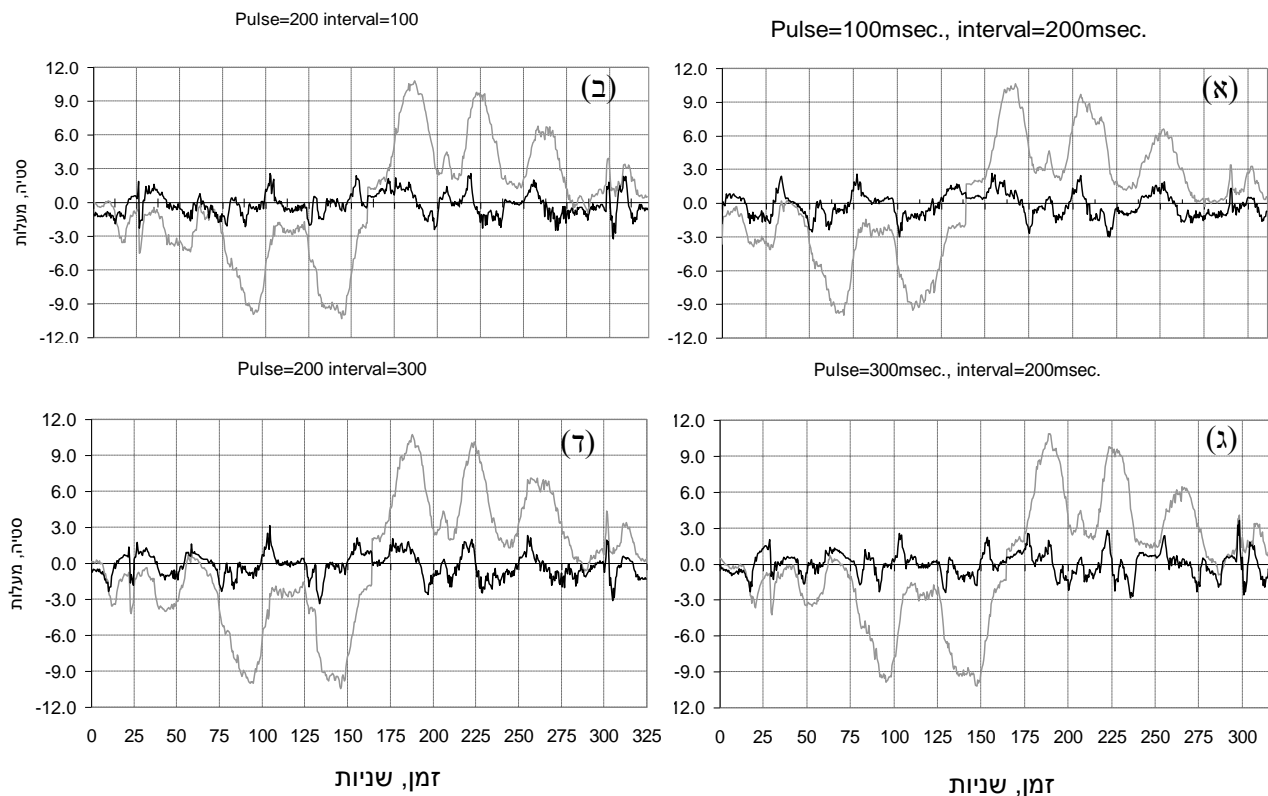
3. פירוט עיקרי הניסויים

תכן, בניה וניסוי הכלי - ניסויי היציבות של הזרוע האנכית בוצעו בשנה הראשונה על ידי הסעת הכלי במהירות של 3 קמ"ש בשטח משובש. תוצאות ניסויי היציבות ללא תיקון אקטיבי מוצגות בציר 1. ציור זה מראה כי ללא התיקון נגרמות הטיות המגיעות לזווית של 9 מעלות. תיקונים אקטיביים מוצגים בציר 2 המראה התנהגות אופינית של הזרוע כאשר מערכת התיקון פועלת בארבעה צרופים שונים של משכי פקודת התיקון והשהיה בין פקודה לפקודה. טבלה 1 מראה את השפעת משכי פקודות התיקון על זווית ההטיה של הזרוע המיוצבת בהשוואה לזווית ההטיה של

המסגרת שנגרמת מהשקעים בשטח. בטבלה מפורטים גם ערכים כמו הסטיות הסטנדרטיות והסטיות המקסימליות.



ציור 1 - הסטיות של המסגרת לאורך מסלול הניסוי (בקו אפור דק) והסטיות של הזרוע באותם מקומות ללא תיקון אקטיבי (בקו שחור עבה).



ציור 2 - הסטיות של המסגרת לאורך מסלול הניסוי (קו בהיר) והסטיות של הזרוע באותם מקומות (קו כהה) בעת הפעלת תיקון אקטיבי: א. משך הפעלת תיקון של 0.1 שניות ורווח של 0.2 בין הפעולות, ב. משך הפעלת תיקון של 0.2 שניות ורווח של 0.1 בין הפעולות, ג. משך הפעלת תיקון של 0.3 שניות ורווח של 0.2 בין הפעולות, ד. משך הפעלת תיקון של 0.2 שניות ורווח של 0.3 בין הפעולות.

טבלה 1 - השפעת משכי פקודות התיקון והמרווחים ביניהן על זווית הסטייה (במעלות) של הזרוע בהשוואה לזווית הסטייה של המסגרת.

ללא תיקון	100	200	300	200	200	משך הפולס	
	200	200	200	100	300	מרווח בין פולסים	
	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	סטייה מקסימלית של המסגרת	
	9.35	2.6	2.826	3.6	2.574	3.096	סטייה מקסימלית של הזרוע

זווית הסטייה שנמדדה עבור המסגרת הגיעה ל-10 מעלות ואף עברה ערך זה. ללא תיקון אקטיבי הגיעה השגיאה המקסימלית בנטיית הזרוע בכיוון הסטייה ל-9 מעלות. לפי ערכי הסטיות מקסימליות התוצאה הטובה ביותר התקבלה עבור משך הפעלת תיקון של 0.1 שניות ורווח של 0.2 שניות בין הפעולות וכן עבור משך הפעלת תיקון של 0.2 שניות ורווח של 0.1 שניות בין הפעולות. מאידך התוצאות הגרועות היו עבור משך הפעלת תיקון של 0.2 שניות ורווח של 0.3 שניות בין הפעולות וכן עבור משך הפעלת תיקון של 0.3 שניות ורווח של 0.1 שניות בין הפעולות. נראה שניתן לכוונן את המערכת כך שתמנע שגיאות גדולות מ-2.6 מעלות. עבור זווית סטייה של 10 מעלות שנמדדה עבור המסגרת והמפתח בין הגלגלים של 3.5 מטר הרי השקעים הם בעומק של למעלה מ-60 ס"מ. המצב בו קיים מרחק מינימלי בין זרוע הצד לגזע מתקבל כאשר הזרוע נמצא בנקודה התחתונה שלה וגודלו כאשר העץ והכלי זקופים הוא 120 ס"מ. המהמורות בשטח קטנות מ-20 ס"מ ולכן ההסטה הזוויתית בגובה ציר האיזון תגרום להסטה של פחות מ-9 ס"מ בניצב לכיוון הנסיעה. הטיה של פחות מ-2.6 מעלות בזרוע הראשית גורמת לסטייה הצידה של פחות מ-32 ס"מ. הסטייה הכוללת תהיה פחות מ-41 ס"מ. מכאן שכל עוד השגיאה במסלול נסיעת הטרקטור אינה עוברת ערך של 79 ס"מ אין הפרעות בפעולת הכלי. ציור 3 מראה את תמונת הכלי תוך כדי נסיעה במטע תמרים וכוונון המוצא אל המטרה.



ציור 3 - תנועת הכלי וכוונון המוצאים אל המטרה בצמרת העץ. בתמונה מימין מותקן על זרוע ימין ראש להאבקה ובצד שמאל ראש לריסוס. לפלס האלקטרוני עדיין לא מוקנית יכולת פיצוי על נטית העצים ימינה כמוצג בתמונה. מערכת להספקת סילון אויר ונוזל ריסוס נגררת לפני הכלי (משמאל).

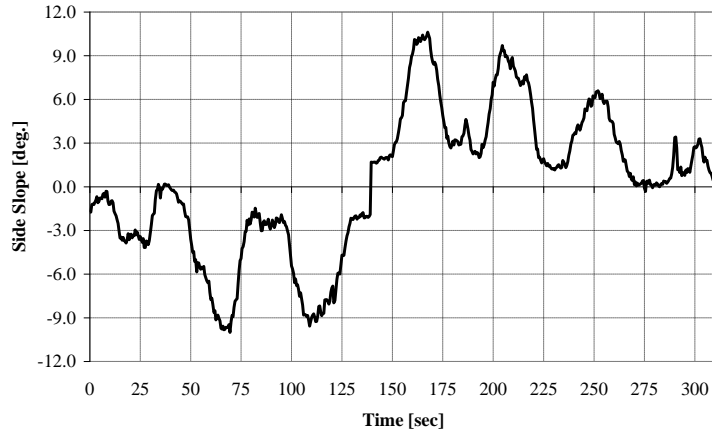
ניסויים ראשוניים שבוצעו לבחינת הריסוס וההאבקה הראו אפשרות לחיסכון באבקה בעת האבקת תמרים. ניסויי הריסוס הבהירו כי יש לשפר את מערכת הכוונון ואת מוצאי האוויר המותקנים בקצה הזרוע וכן להגביר את עוצמת סילון האויר.

מודל דינמי וסימולציה - במהלך שנת המחקר הראשונה פותח ע"י המרכז למחקר בהנדסה חקלאית, בטכניון, חיפה, מודל סימולציה של תורן מיוצב המשמש לנשיאת מערכת לריסוס תמרים. המודל נועד לבחון פעולה של מערכת בקרה פשוטה לייצוב תורן המרסס ולסייע בתכנון מערכת בקרה פשוטה אך יעילה יותר. מודל הסימולציה נבנה באמצעות תוכנת Virtual.Lab של חברת LMS. התוכנה הינה תוכנת Multi-Body Dynamics המיועדת לבחון באופן סימולטיבי ביצועי מכוונת שדה באמצעות מודל דינמי של מערכות מרובות גופים. מודל המרסס, המובא בציור 4, נבנה באופן מדויק על פי שרטוטי התכנון של המרסס שתוכנן ופותח במכון להנדסה חקלאית במרכז וולקני. המודל נבנה מ-30 גופים (כל גוף מכיל מסי רב של חלקים בהתאם לשרטוטי התכנון), עבור כל חלק מחלקי המכונה נמצאו הנתונים הבאים : מסה, מרכז מסה ומומנט אינרציה.



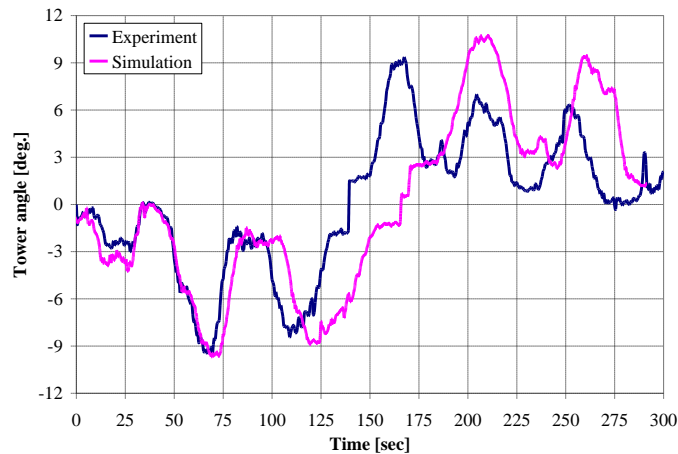
ציור 4 : מודל של התורן המיוצב הנושא מערכת ריסוס לתמרים.

לצורך אימות המודל הדינמי, נבדקו ביצועי המרסס בניסוי שדה (סטיית התורן במעלות יחסית למערכת עולם), כמו כן תועד פרופיל הדרך בשדה באמצעות מדידת שיפוע העגלה על ידי פלס דיגיטלי. פרופיל הדרך כפי שנמדד באמצעות הפלס הדיגיטלי מובא בציור 5.



ציור 5 : רישום שיפועי הצד של העגלה בתגובה לפרופיל הקרקע כפי שנמדדו בשדה.

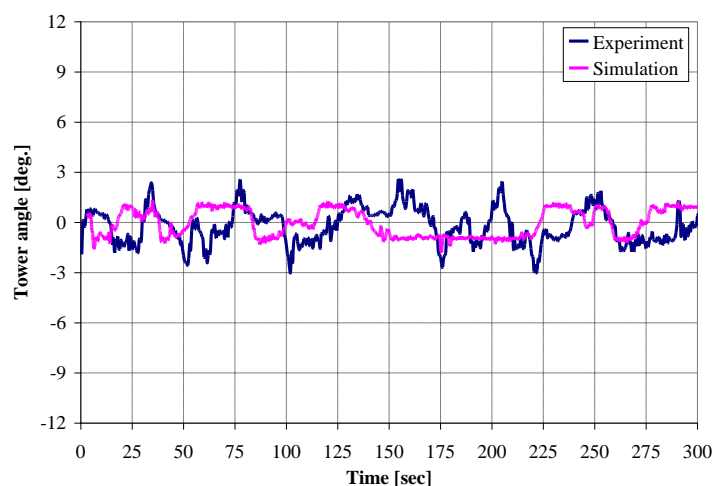
רישום שיפועי הצד על קרקע משובשת שעליה נעה המכונה בניסוי הוכנס כאילוץ למודל הדינמי. בציור 6 מוצגות זוויות התורן שהתקבלו מסימולציית המודל הדינמי של תורן המרסס ללא בקרה ותיקון אקטיבי (עקום ורוד בציור 6) מול זוויות שנמדדו בניסויי השדה ללא בקרה ותיקון אקטיבי (עקום כחול בציור 6). מהירות הנסיעה בסימולציה הינה 1 m/sec בדומה לניסוי שדה שנעשה על הכלי. ניתן לראות כי הסטייה המקסימלית המתקבלת הינה של כ- 10° . תוצאות ניסוי שדה מראות תוצאות דומות מאוד לתוצאות הסימולציה. יש בעיה מסוימת עם מהירות הנסיעה - יתכן שהיא לא נשמרה בצורה אחידה וקיימת האטה או האצה של הטרקטור בניסוי לאחר כ-75 שניות. אבל, באופן כללי ניתן ללמוד מהתוצאה המוצגת בציור 3 כי המודל הדינמי חוזה באופן מדויק את תגובת תורן המכונה.



איור 6 : זווית הסטייה של התורן ללא תיקון אקטיבי שהתקבלה : מהסימולציה (בצבע ורוד) ומניסוי שדה (בצבע כחול).

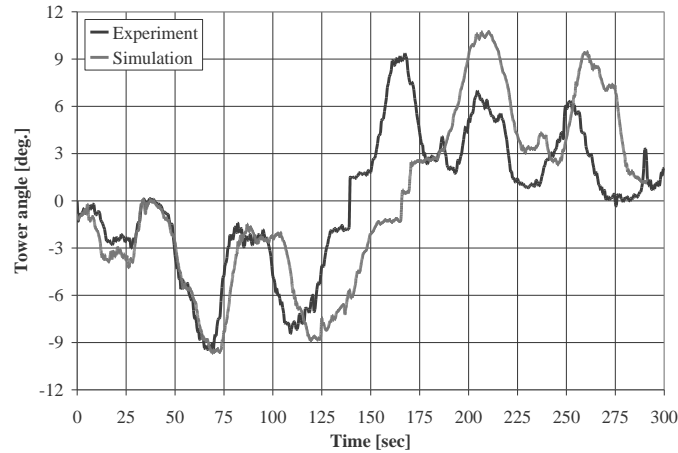
מודל הבקרה לייצוב התורן מבוסס על הפעלת כוח מחזיר של 3104 N הפועל בפולסים של 100 msec ובאורך גל של 200 msec . הכוח מחושב לפי בוכנה הידראולית בעלת קוטר פנימי של 40 מ"מ , ציר עובר של 25 מ"מ ולחץ עבודה של 40 אטמ" .

הכוח פועל כאשר התורן יוצא מחלון סטיה של $\pm 1^\circ$. בנוסף קיימת התנגדות לתנועת התורן בשיעור של 3259 N. התנגדות זו מופעלת על ידי אותה בוכנה, אשר מחוברת לשסתום המכוון לפרוק לחץ ב-42 אטמ' והיא פועלת כאשר מערכת הבקרה לא מפעילה כוח אקטיבי. מודל הבקרה אשר תואר לעיל שולב במודל הדינמי. תוצאות הסימולציה, כלומר, תגובת סטיות תורן המרסס עם מערכת בקרה מוצגות בציור 7 (עקום ורוד). נראה בברור כי מערכת הבקרה מקטינה את הסטייה המכסימלית (בתנאי הדרך הדומים לתנאי הדרך בניסוי השדה) לכ- 1.8° . תוצאות הסימולציה עם מערכת הבקרה הושוו לתוצאות ניסוי עם מערכת בקרה דומה (ציור 7 עקום כחול). ניתן לראות כי ביצועי מערכת הבקרה במודל טובים יותר מביצועי מערכת הבקרה שהודגמו בניסוי. ניתן לשער כי השהיות בתגובות המערכת ההידראולית (שלא הוכנסו למודל) גרעו מביצועי מערכת הבקרה בניסוי. לכן, יש צורך בהמשך עידון מידול המערכת בכלל והמערכת ההידראולית בפרט.



איור 7: זווית הסטייה של התורן כולל תיקון אקטיבי שהתקבלה: ממודל הסימולציה (בצבע ורוד) ומניסוי שדה (בצבע כחול).

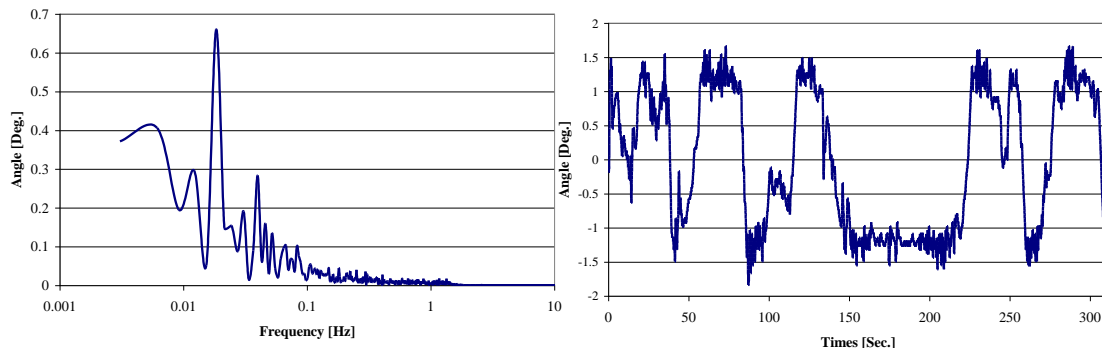
שיפור הסימולציה (בשנה השניה) של ייצוב הזרוע הראשית - מאחר והרצות הסימולציה שבוצעו והושוו לניסויי היציבות של הזרוע הראשית הצביעו על בעיה בהשוואה: בעוד שמהירות הנסיעה בסימולציה (3 קמ"ש בממוצע) היתה אחידה, בניסוי מהירות הנסיעה של הטרקטור והכלי בשטח המשובש השתנתה עד כדי 15%, במשך 311 השניות בממוצע של הניסוי. בציור 8 מוצגות תוצאות של נסיעה אופינית בניסוי ובסימולציה וניתן לראות את השתנות המהירות במשך הניסוי.



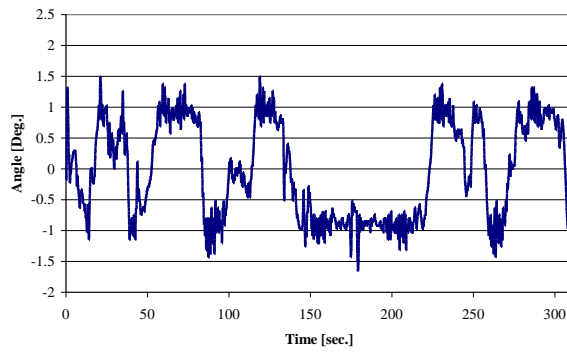
ציור 8 : זווית הסטייה של התורן ללא תיקון אקטיבי שהתקבלה : מהסימולציה (בהיר) ומניסוי שדה (כהה). ניתן לראות את השתנות מהירות הנסיעה לפי השתנות המרווח על ציר הזמן של ערכי הקיצון של העקום הנמדד לעומת זה המחושב.

כדי להתגבר על בעיה זו בוצע נסיון להציג את הסטיות לפי ציר התדר במקום ציר הזמן, לאחר טרנספורמציה פוריה כמוצג בציור 9. ציור 9 מראה גם את השפעת השינוי של החלון הדיפרנציאלי בבקרה של התורן לערכים של 1.25 מעלות לכל צד. נראה שהצגה במישור התדר לאחר טרנספורמציה פוריה אינה מראה בצורה בהירה את הסטיות המקסימליות של התורן אלא סטיות RMS – כאן מוצגת סטייה של 0.67 מעלות. לפיכך הוחלט להשאיר את הצגת הסימולציה במישור הזמן.

בציור 10 מוצגות תוצאות הסימולציה לחלון של 1.0 מעלה בכל כוון. בטבלה 2 ובציורים האחרונים הסטייה המקסימלית בחלון של 1.5, 1.25 ו-1.0 מעלות היתה 2.23, 1.83 ו-1.66 מעלות בהתאמה. סטיות אלה הן עבור פונקציה תיקון של 200 אלפיות שניה לפולס ולרווח בין פולסים. ההפרש בין הניסוי לסימולציה הוא כ-0.5 מעלה. לפי הסימולציות המוצגות כאן הקטנת החלון מקטינה את הסטייה המקסימלית. להגברת הלחץ מ-40 ל-60 אטמ' נמצאה השפעה חלשה על הזווית המקסימלית של סטית הזרוע הראשית. יציבות הזרוע הראשית מקטינה כעת את סטיית הקצה העליון בזרוע לערך RMS של 22 ס"מ.



ציור 9 - סימולציה של סטיות התורן והשפעת ההקטנה של החלון הדיפרנציאלי בבקרת התורן לערכים של 1.25 מעלות לכל צד – במישור הזמן (מימין) ובמישור התדר (משמאל).



ציור 10 - סימולציה של זווית הסטייה של התורן ע"י תיקון אקטיבי המתקבל כשגודל החלון 1.0 מעלות לכל צד.

טבלה 2 – השפעת גודל "החלון הדפרנציאלי" על הזווית המקסימלית לפי הסימולציה

זווית מקסימלית	פולסים [msec]	לחץ [atm.]	חלון [deg.]	מס'
1.66	200 on/200 off	40	1	1
1.32	200 on/100 off	40	1	2
1.83	200 on/200 off	40	1.25	3
1.66	200 on/100 off	40	1.25	4
2.23	200 on/200 off	40	1.5	5
1.83	200 on/100 off	40	1.5	6

בחינת האפשרות להתקנת מצלמה חכמה ובדיקת ביצועיה - בשנה השניה תוכננה, פותחה ונוסחה מערכת לזיהוי אזור הצמרת ולכוונון אוטומטי של גובה הפיה המסתמכת על "מצלמה חכמה" מתוצרת National Instruments. ההחלטה להשתמש במערכת שפותחה על ידי חברה גדולה ליישומים תעשייתיים ואשר הפתוח שלה הסתיים בהצלחה, לפי דווחי החברה, הסתמכה על נסיון מחקרי בעבר – לפי נסיון זה מכשיר תעשייתי שנמכר על ידי חברה בעלת מוניטין מתפקד בדרך כל באמינות טובה מזו המפותח במסגרת מחקר קצר מועד, כמו במקרה הנוכחי. לכן הופסק הפיתוח של המערכת היעודית לזיהוי אזור הצמרת במסגרת המחקר הנוכחי. המערכת התעשייתית השיגה מהירות זיהוי ודיוק קואורדינטות טובים של עצמים בגדלים התואמים לסרט לבן שרוחבו 10 ס"מ הקשור לעץ במטע. תנאי התאורה היו אור יום. בניסויים נמצאו שתי בעיות שמנעו את המשך התאמת המצלמה למשימה: השפעה חזקה של תנאי התאורה על יכולת ומהירות הזיהוי של "המצלמה החכמה" ובעיות של רציפות בפעולת המצלמה שחייבו חיבור קבוע למחשב נייד וצורך באתחול המערכת מדי כמה דקות. בהסתמך על תוצאות הפיתוח הללו הוחלט לא להפעיל מערכת אוטומטית לזיהוי גובה הצמרת כשיגרה בניסויי הריסוס וההאבקה במטע המסחרי בעונה הקרובה.

תכנון ושילוב מערכות עצמאיות לריסוס והאבקה - מראה כללי של המערכות המכניות

שפותחו בשנה השניה מוצג בציור 11.

- תוכנן מפוח עם ספציפיקציות העונות במדויק לצרכי ריסוס האשכולות – מהירות של 65 מ/שניה במוצא, עומד סטטי המתאים למעברי האויר במערכת וספיקה המתאימה לשני מוצאים של 40X8 ס"מ. כך ניתן לקבל מהירות של כ- 20 מ/שניה באזור המטרה, כלומר, במרחק 2.5 מ' מהמוצא. ההספק המחושב הנדרש מהמפוח כ- 50 כ"ס – ניסוי הראה צריכת הספק דומה. המפוח נבנה ע"י חברת שבח מפוחים הנחשבת למומחית בתחום והותקן בתחתית הזרוע המאוזנת כדי לאפשר הפחתה של כמחצית ממשקולות האיזון. נרכשה משאבה ומנוע הידראוליים וכן מערכת הידראולית המחברת ביניהם, כדי להפעיל את המפוח באמצעות מעביר הכוח של הטרקטור. ניסויים של המפוח הראו תוצאות כפי שהוכתבו במפרט של המערכת.
- תוכננה, נרכשה, הותקנה ובוצעו ניסויים של מערכת ריסוס הכוללת – מיכל נוזל בנפח 200 ליטר, משאבה ומנוע המתאימים להפעלת 10 פומיות, בהתאם לספיקה הנדרשת עבור הכלי. בשלב הנוכחי מופעלת פיה אחת עם 5 פומיות. משך העבודה המחושב למיכל זה הוא כ- 1.5 שעות בנפח ריסוס אופטימלי למשימה הנוכחית. ניתן לשלש את גודל המיכל בהשקעה נמוכה יחסית.
- תוכננה, נבנתה ונוסתה בהצלחה מערכת אוטומטית להפעלה והפסקה של מערכת הריסוס וכן למעקב אוטומטי אחרי התפרחות או האשכולות, כולל אפשרות להתאים את מהירות המעקב אחר האשכולות או התפרחות למהירות נסיעת הכלי.
- תוכננה נבנתה ונוסתה בהצלחה כוונת המבוססת על מצלמה ומסך וידאו, המאפשרת כוונן ידני של גובה הפיה עוד לפני התחלת פעולת הריסוס, התחלת הריסוס מבוצעת באופן אוטומטי ועם התחלת הריסוס מבוצע הצידוד והמעקב של הפיה באופן אוטומטי ללא כל התערבות ידנית.



ציור 11 – מראה כללי של המערכות המכניות שפותחו – מפוח המותקן בחלק התחתון של הזרוע, מיכל שמן הידראולי, מיכל ריסוס עם מנוע ומשאבה, רדיאטור לשמן הידראולי, ופיה סובבת. ניתן לראות בעיה בהטית העצים לעומת הקרקע והזרוע האנכית.

לקראת הניסויים בעונת 2010-2011 הותקנה מערכת המזהה את נטיית השורה ונטיית כל עץ באופן אוטומטי. הניסויים הראו שלהטיית הזרוע האנכית במקביל לעץ, כלומר בהתאם לנטיית העץ בניצב לשורה, חשיבות רבה ביותר להשגת כוונון מדויק. למערכת הייצוב האוטומטית הוקנתה יכולת לייצוב זרוע ושמירה על הטיה קבועה גם בתנאי שטח משובשים. ניסויים הראו שהטיית הזרוע ע"י המפעיל בתחילת כל שורה, במקביל להטיה הממוצעת של השורה, משיגה תוצאות טובות.

ניסויים לריסוס והאבקה בוצעו בעונת 2010-2011 במטע דקל-נור בקיבוץ סמר, שגובהו 15 מטר. כבר בעונות קודמות ניסויי הרבצת ההאבקה הראו תוצאות טובות. בניסויי הריסוס אפשרה מערכת הכוונון האוטומטי והסטת הפיה במעקב אחר המטרה, הפעלה נוחה וכוונון מדויק של הפייה ע"י מפעיל אחד בלבד שביצע זאת תוך כדי נהיגת הטרקטור. ציור 12 מראה את הטיית הזרוע המיוצבת בתנועה לאורך שורה הנוטה באופן אחיד עקב הרוחות.



ציור 12 - הטיית הזרוע המיוצבת בתנועה לאורך שורה הנוטה באופן אחיד עקב הרוחות וביצוע ריסוס ע"י המערכת באופן מדויק (מימין). מערכת הסתת הפיה במעקב אחר המטרה (משמאל).

4. דיון ומסקנות

זרוע אנכית מיוצבת באופן אקטיבי תוכננה, נבנתה, הותקנה על מסגרת ניידת ונבחנה בניסוי בשדה על קרקע משובשת. יציבות הזרוע נבחנה במהירות נסיעה של 3 קמ"ש בקטע עם שקעים בעומק של עד 60 ס"מ. התוצאות הראו שעבור מסלול זה ניתן לקבל תנודה הקטנה מ- 2.6 מעלות בזרוע. במטע בו עומק השקעים וגובה הבליטות נמוך משמעותית צפויה הטיה קטנה יותר. מודל סימולציה רב גופית נבנה בהתאם למבנה המערכת והראה תוצאות דומות לניסויי השדה. ההסטה הכוללת היתה תחילה קטנה מ- 0.5 מטר וצומצמה משמעותית בהמשך המחקר עקב שיפור פעולת מערכת הבקרה. הסטיה בזרועות הקרובות לעץ תותיר מרחב תמרון נוח למפעיל הטרקטור. מרחק קצר בין הפייה למטרה חשוב בריסוס כדי להקטין את כמות התריסוס והספק המפוח ובהאבקה כדי להגדיל את צפיפות ענן גרגרי האבקה. ניסויי האבקה וריסוס ראשוניים הראו צורך בשיפור

היציבות ולאחר שיפור תוך הסתמכות על מודל הסימולציה הושגה יציבות ברמה המאפשרת כוונן מדויק.

גם מודל הסימולציה הרב גופית וגם ניסויי השדה הראו כי ריסון אקטיבי מקטין את זווית הסטייה המקסימלית בלמעלה מ-35%. למסקנה זו חשיבות עקב ממצאים נוגדים בייצוב זרועות אופקיות במרססי מוט ושרוול. הרצות סימולציה לבחינת השפעת גורמים שונים על יציבות הזרוע הראשית הראו שלגודל חלון הבקרה השפעה חלשה כשהוא בתחום שבין 1.5 ל-1.0 מעלות לכל צד. הרצות אלה הראו כי להגברת הלחץ מ-40 ל-60 אטמ' השפעה מזערית על שיפור ייצוב המערכת. השיפורים המכאניים והתוספות כמו יחידת ריסוס והמפוח האינטגרליים הפכו את המערכת שפותחה ליחידה עצמאית נגררת, בעלת כושר תמרון נוח במטע. ניסויי ריסוס והאבקה באופן מסחרי בעונת 2010-2011 במטע דקל-נור שגובהו 15 מטר הראו יכולת עבודה טובה למערכת עם מפעיל אחד בלבד.

יכולת הטייה במקביל לנטיית השורה, שהוקנתה לזרוע המיוצבת, חשובה מאד להשגה של כוונן מדויק ושל הסטה מדויקת של הפייה לעבר המטרה בהתאם למהירות הנסיעה.

פרוט מלא של הפרסומים המדעיים -

Gan-Mor, S., Y. Grinshpon, Y. Glik, B. Ronen, L. Rosenfeld, (2008). Automatic stabilized system for precision tasks at heights. US Patent Application No. 61/064,104.

Gan-Mor, S., Y. Grinshpon, Y. Glik, B. Ronen, L. Rozenfeld, 2008. Stabilization of a mobile robotic arm for precise spraying and pollinating in tall trees. 2008 CIGR - International Conference of Agricultural Engineering, Iguassu, Brazil.

גן-מור, ש., ב. רוני, י. גרינשפון, ל. רוזנפלד, ג. ניסים, י. גליק (ינואר 2008). זרוע רובוטית מיוצבת להאבקה וריסוס אוטומטיים בתמרים עיון למגדלי התמרים בערבה, המועצה האזורית אילת.

גן-מור, ש. (מרץ 2008). בחינת מנשא מיוצב לריסוס והאבקה אוטומטיים לעצי תמר גבוהים. יום עיון למגדלי התמרים בישראל, אולם המתנ"ס, המועצה האזורית בקעת הירדן.

גן-מור, ש., ב. רוני, י. גרינשפון, י. גליק, ל. רוזנפלד (2009). פיתוח מייצב ועוקב אוטומטיים כדי להחליף עבודת אדם בגבהים בריסוס ובהאבקה של עצי תמר. כנס הפעולה המונעת והמחקר בבריאות ובבטיחות בעבודה של משרד התמי"ת, מעלה החמישה, ישראל.

גן-מור, ש., י. שמולביץ, י. גרינשפון, ב. רוני, ל. רוזנפלד, (2009). מערכת לייצוב זרוע רובוטית ניידת להאבקה וריסוס בעצים גבוהים. קרקע – אקולוגיה וחקלאות – כנס משותף של ISSS and ISAE, הטכניון, חיפה.

5. סיכום עם שאלות מנחות

<p>מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה :</p> <p>לפתח מערכת אוטומטית לביצוע פעולות בצמרות עצים גבוהים מעל גבי זרוע מיוצבת המשמשת כפלטפורמה למערכות האבקה, ריסוס ופעולות נוספות. מטרת המשנה הינן :</p> <p>פתוח ושיפור ייצוב מבוקר מדויק של הזרוע האנכית, תוך העזרות בסימולציה דינמית רבת גופים, כדי לאפשר תנועה מהירה יחסית בשטח משובש ודיוק בביצוע הפעולות.</p> <p>פתוח זיהוי אוטומטי של המרחק והגובה אל צמרת התמר כדי לאפשר הפעלת המערכת על ידי מפעיל אחד. בחינת המערכת בניסויי ריסוס והאבקה כדי לבדוק את דיוק הכוונון והפעולה במטע תמרים מסחרי גבוה.</p>
<p>עיקרי הניסויים והתוצאות :</p> <p>הניסויים והשיפורים הגבירו את יציבות הזרוע הראשית וסטיית הקצה הגבוה שופרה ועומדת כעת על ערך RMS של 22 ס"מ.</p> <p>שיפורים ותוספות שהותקנו במערכת, כמו יחידת ריסוס ומפוח אינטגרטיביים הקנו למערכת עצמאות פעולה וכושר תמרון גבוה במטע.</p> <p>ניסויי ריסוס והאבקה במטע מסחרי בגובה 15 מטר הראו יכולת דיוק ועבודה טובה של המערכת עם מפעיל אחד בלבד.</p> <p>יכולת הטייה במקביל לנטיית השורה, שהוקנתה לזרוע המיוצבת, חשובה מאד להשגה של כוונון מדויק ושל הסטה מדויקת של הפייה לעבר המטרה בהתאם למהירות הנסיעה.</p>
<p>מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?</p> <p>ייצוב אקטיבי משיג ייצוב טוב עם סטיות RMS קטנות בהרבה מאלו המושגים באמצעות הייצוב הפסיבי. הדבר הודגם הן בסימולציה והן בניסויי שדה.</p> <p>יכולת מעקב טובה אחר המטרה מחייבת הטייה של הזרוע האנכית במקביל להטיית העצים.</p> <p>מטרות המחקר הושגו באופן כללי – פותחה מערכת אוטומטית לביצוע פעולות בצמרות עצים גבוהים מעל גבי זרוע מיוצבת המשמשת כפלטפורמה למערכות האבקה, ריסוס ופעולות נוספות. מטרת המשנה שהושגו :</p> <p>פתוח ושיפור ייצוב מבוקר מדויק של הזרוע האנכית, תוך העזרות בסימולציה דינמית רבת גופים, כדי לאפשר תנועה מהירה יחסית בשטח משובש ודיוק בביצוע הפעולות.</p> <p>נדרש שילוב אדם במעגל הבקרה לצורך פיקוח על הגובה אך עקב השיפור שהושג בהטיית הזרוע והאוטומציה של הפעלת והסטת הפייה אופשר שילוב פעולת הכוונון בפעולת ניהוג הטרקטור.</p>
<p>בעיות שונות לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה ; התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר?</p> <p>במהלך המחקר שונתה ההתייחסות לאוטומציה של מערכות המשנה – האוטומציה של הפעלת הפייה והייצוב במקביל לעצים התווספו מעבר להגדרה במטרות ואילו כוונון אוטומטי של הגובה לא הושג במלואו, אולם עקב התקנות כוונת וידאו והשיפורים הנ"ל, הפעולות הנדרשות מהמפעיל מוזערו וניתן לבצען תוך כדי ניהוג הטרקטור. בטווח הארוך - הגדרת כתובת לכל עץ המבוצעת במחקרים אחרים תאפשר אוטומציה נוספת וכן כוונון לגובה העץ על פי כתובתו.</p>

הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח (פרסומים):

Gan-Mor, S., Y. Grinshpon, Y. Glik, B. Ronen, L. Rosenfeld, (2008). Automatic stabilized system for precision tasks at heights. US Patent Application No. 61/064,104.

Gan-Mor, S. , Y. Grinshpon, Y. Glik, B. Ronen, L. Rozenfeld, 2008. Stabilization of a mobile robotic arm for precise spraying and pollinating in tall trees. 2008 CIGR - International Conference of Agricultural Engineering, Iguassu, Brazil.

גן-מור, ש., ב. רונן, י. גרינשפון, ל. רוזנפלד, ג. ניסים, י. גליק (ינואר 2008). זרוע רובוטית מיוצבת להאבקה וריסוס אוטומטיים בתמרים עיון למגדלי התמרים בערבה, המועצה האזורית אילות.

גן-מור, ש. (מרץ 2008). בחינת מנשא מיוצב לריסוס והאבקה אוטומטיים לעצי תמר גבוהים. יום עיון למגדלי התמרים בישראל, אולם המתנ"ס, המועצה האזורית בקעת הירדן.

גן-מור, ש., ב. רונן, י. גרינשפון, י. גליק, ל. רוזנפלד. (2009). פיתוח מייצב ועוקב אוטומטיים כדי להחליף עבודת אדם בגבהים בריסוס ובהאבקה של עצי תמר. כנס הפעולה המונעת והמחקר בבריאות ובבטיחות בעבודה של משרד התמ"ת, מעלה החמישה, ישראל.

גן-מור, ש., י. שמולביץ, י. גרינשפון, ב. רונן, ל. רוזנפלד, (2009). מערכת לייצוב זרוע רובוטית ניידת להאבקה וריסוס בעצים גבוהים. קרקע – אקולוגיה וחקלאות – כנס משותף של ISSS and ISAE, הטכניון, חיפה.

פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)

רק בספריות V <

האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? לא