

ניסויים להדברה של חדקונית הדקל האדומה בתמרים

ויקי סורוקר, גלינה גינדן, שלומית לבסקי, סעדיה רנה, מרים אליהו (המחלקה לאנטומולוגיה ונפטולוגיה, מנהל המחקר החקלאי), משה קוסטיוקובסקי, (המחלקה למדעי מזון), אמוץ חצרוני, עמוס מזרח (המכון להנדסה חקלאית), יעקוב נקש, (חוות עדן).

חדקונית הדקל האדומה, *Rhynchophorus ferrugineus* (RPW) מהווה מזיק קשה של מיני דקלים, כולל תמרים (Giblin-Davis, 2001). החדקונית בעלת תפוצה עולמית נרחבת נתגלתה לראשונה בארץ ב-1999. מאז נתגלו החיפושיות ועצי תמר נגועים במיוחד בבקעת הירדן ובאזור קליי"ה-אלמוג, בהמשך נלכדו חיפושיות במטעי טירת צבי ובשנה אחרונה במיוחד באזור אילת. מאז חדירתו לארץ ועד היום ננקטו כנגד המזיק שלל שיטות מימשק. אכן חלה ירידה משמעותית בלכידות של בוגרי החדקונית. מאז 2002 לא נתגלו עצים נגועים (Soroker et al., 2005). אחת הבעיות שלנו היא קרבת מטעי התמר בארץ לאלו של מדינות שכנות. המזיק נמצא במצריים, בירדן ויתכן שגם בשטחי הרשות. נוכחות המזיק ברמה גבוהה באזורים אלו עשויה לשמש מקור אילוח בלתי צפוי ומיידי לעצי התמר בארץ. כמו כן, לכידות אקראיות בשטחינו מצביעות על האפשרות שקיימת נגיעות אם כי נמוכה גם בשטחינו. ניסויים שערכנו בשנים האחרונות קידמו רבות את הידע שלנו לגבי הפנולוגיה של המזיק בארץ וכן את שיטות המימשק נגדו. המחקר הצביע על יעילות שימוש בקונפיודור בהגמעה גם כשיטת הדברה וגם כשיטת מניעה במיוחד במשתלות. במקביל לפיתוח ממשק הדברה ידידותי חשוב לפתח ממשק הסגר נאות לשינוע חוטרים בין איזורי הגידול השונים, מאחר וידוע שזו הדרך העיקרית של העברת המזיק בשטח. את ממשק ההסגר של החוטרים ניתן לחלק לכמה רמות: חיטוי גזע החוטרים לקטילת ביצים או גלמים המצויים כרגיל קרוב לפני השטח, זיהוי אקוסטי של פעילות הזחל בתוך הגזע. שיטת חיטוי החוטרים טרם פותחה. ניסויים ראשוניים באיוד קנה סוכר מאולח בזחלי החדקונית היה יעיל מאד. חשוב ולהמשיך לפתח פרוטוקול חיטוי שמצד אחד יבטיח קטילת כל דרגות החדקונית מצד אחד ללא פגיעה בחיוניות החוטר מצד שני.

אנו מפתחים שיטה וכלים לזיהוי זחל החדקונית ע"פ הפעילות הקולית של הזחל בזמן ההתפתחותו בגזע החוטר. זיהוי הפעילות באמצעים אלו אינה משימה פשוטה מאחר והזחל מחד אינו פעיל באופן רציף ומאידך, הצמח עצמו יוצר פעילות קולית כאשר קיים דמיון רב בין הקולות שמשמיע הזחל ובין קולות שנובעים מהסביבה הצמחית הטיבעית (Soroker et al., 2004).

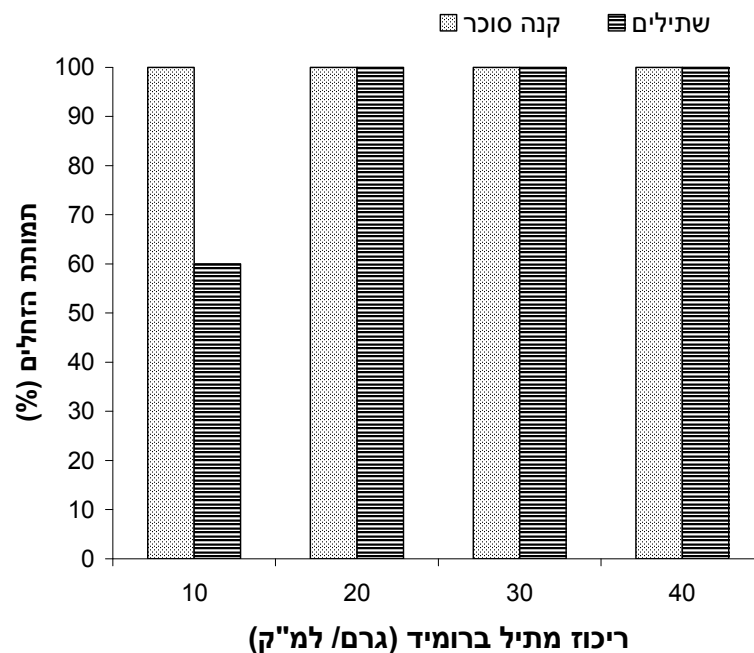
מטרות המחקר העיקריות הן: א. פיתוח שיטה לחיטוי חוטרים. ב. בניית מודלים לחתימה ספקטראלית של קולות הנבירה של זחלי החדקונית. ג. קביעת מועדים אופטימליים לניטור אקוסטי של זחלי החדקונית ומשכן.

מהלך המחקר:

א. פיתוח שיטת חיטוי במתיל ברומיד.

נבחנו מספר מינונים של מתיל ברומיד: 10, 20, 30 ו-40 גרמ"ק. בניסויים אלו השתמשנו בשתילים של זריעי תמר בקוטר גזע ממוצע של 7.5 ס"מ הגדלים בתערובת קרקע בדליים של 10 ליטר. עשרים וחמישה שתילים אולחו בזחל צעיר יחיד או בשני זחלים שמשקלם הממוצע 32 ± 5 מ"ג. סה"כ אוכלסו 25 שתילים. בנוסף, נבחנה יעילות מינונים אלה של מתיל ברומיד כנגד זחלים המתפתחים ב-24 קטעי קנה סוכרבקוטר של 2.8 מ"מ ובאורך של 15 מ"מ. החיטוי נתבצע בתקופה של שבועיים עד שלוש לאחר איכלוס השתילים, בתא איוד

בנפח של 0.5 מ"ק במשך 4 שעות. האיוד בוצע בטמפרטורה 24-25 מ.צ. בדיקת חיות הזחלים נעשתה 48 שעות לאחר טיפול על ידי ניתוח החומר הצמחי הנגוע. במקביל, נבחנה פעילות הזחל בניטור אקוסטי (יפורט בסעיף ב). מאחר והשתמשנו בזחלים קטנים יחסית בניתוח השתילים נמצאו זחלים ב- 18 שתילים בלבד מתוך 25. כפי שניתן לראות באיור 1, הטיפולים במינונים של 20-40 גרם מתיל ברומיד למ"ק גרמו לקטילה מלאה של הזחלים. הקטילה במינון של 10 גרם/מ"ק היתה חלקית בחוטרים אך מלאה בקנה סוכר. הסיבה לכך נעוצה בכך שהזחלים בקנה סוכר היו כנראה חשופים יותר לאוירת המתיל ברומיד במידה שאינה בהכרח משקפת את המצב האמיתי. בחינת משקל הזחלים לאחר מותם הראתה שבמהלך שהייתם בעצים (כשבועיים-שלוש) הזחלים התפתחו היטב ועלו פי 42 על המשקל הראשיתי, בממוצע. יחד עם זאת נצפתה שונות רבה בגודל הזחלים בעת הקטילה 1347 ± 1116 מ"ג (ממוצעת וסטיית תקן) אין לנו בשלב זה הסבר לתופעה זאת. אך במקרה זה השונות הינה לטובה מאחר והיא מאפשרת להראות שבטווח הגודל הזה, ניתן לקטול זחלים במינונים שנבדקו.



איור 1: השפעת חיטוי במתיל ברומיד חומר צמחי נגוע בחדקונית במשך 4 שעות. 5 חזרות לכל מינון (למעט ב- 30 גרם/מ"ק בו נערכו 3 חזרות).

ב. ניטור אקוסטי.

במערכת האזנה לקולות הזחלים אשר פותחה לצורך מחקר זה (איור 2) הוקלטו פעילויות הזחלים מ-26 עצים. תוצאות ההקלטה רוכזו ב- 432 קבצי קול שמשכם כ-60 שניות. 377 מקבצי הקול הם של עצים שאוכלסו באופן מכוון בחדקונית (כפי שפורט קודם לכן) ו-55 מהקבצים הם מעצים שלא אוכלסו בזחל החדקונית (קבוצת ביקורת). ההקלטות בוצעו באופן מכוון שבו נעשה מאמץ להקליט את הזחל בעת פעילותו. ההקלטות נותחו באמצעות אלגוריתם מתמטי שפותח במסגרת מחקר זה על ידי יואל פנחס כחלק מעבודת גמר לתואר שני.

אלגוריתם הזיהוי

במהלך העבודה השתמשנו בוריאציות של אלגוריתם Vector Quantization. אלגוריתם זה נפוץ בתחום של זיהוי דובר (Bimbot et al., 2004). כתיבת האלגוריתם והרצתו נעשו בסביבת עבודה של תוכנת Matlab. התהליך הנו מעגלי כלומר, לאחר שמקבלים את תוצאות הזיהוי חוזרים לשפר את האלגוריתם עד אשר מגיעים לתוצאות זיהוי מספקת. במהלך העבודה שינינו מגוון פרמטרים באלגוריתם על מנת להגיע לתוצאות המוצגות בהמשך. לאלגוריתם הזה פרמטרים רבים שניתן לכוון על מנת לקבל תוצאות זיהוי טובות יותר.

שלבם עיקריים בפיתוח מערכת הזיהוי הממוחשבת

א. שלב הקדם עיבוד :

1. בניית מאגר מידע מסווג וחלוקתו לקבוצת למידה וקבוצת מבחן ופיתוח אלגוריתם ראשוני.
 2. חילוף מאפיינים מהמאגר המסווג.
- ב. שלב הלמידה :

1. אימון האלגוריתם ע"פ פעילות זחל.
 2. אימון האלגוריתם ע"פ פעילות צמחית.
- ג. שלב המבחן :

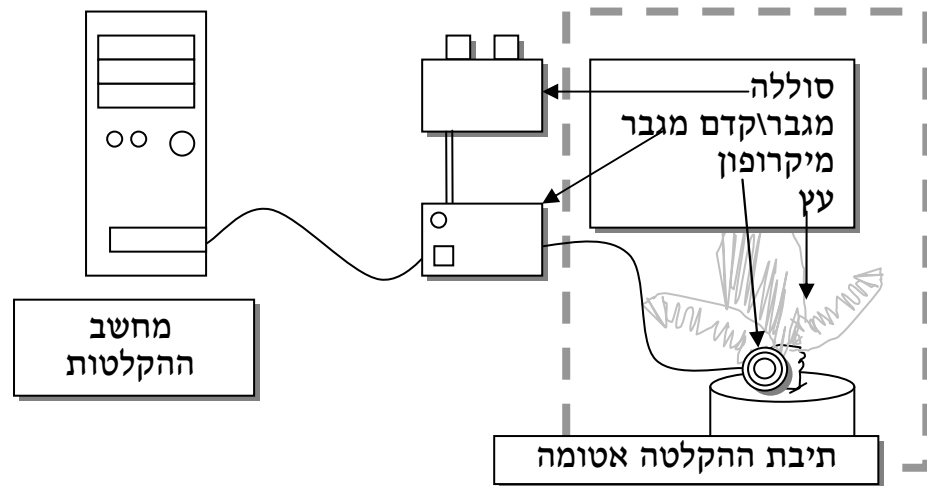
בחינה של האלגוריתם מול קבוצה חדשה של דוגמאות והערכת דיוק פעולתו.

שלב הקדם עיבוד

כל הקלטה חולקה לחלונות נתונים באורך שווה של 512 קטעים קצרים כך שיהיה ניתן להניח אות קבוע. (512 דגימות הוא תוצאת חזקה של 2, נבחר מטעמי האופטימאליות של מימוש אלגוריתם FFT מהיר). קצב הדגימה היה 96 kHz שפרושו הוא כי כל חלון הוא קטע קול באורך 5.33 מילישניות (במקרה של חלונות ארוכים יותר הנחת קביעות באות לא מתקיימת). בין החלונות יש חפיפה של 50%. נבחנו חלונות שיש בהם עוצמת קול גבוהה יותר מערך סף שניקבע מראש באופן ניסיוני ולרוב זהה לכל החלונות. עבור 512 דגימות ניתוח ספקטראלי של האות נעשה ע"י פונקציית periodogram של Matlab. מכל חלון חילצנו את המאפיינים הספקטראליים. כל וקטור מאפיינים שנתקבל נורמל ע"י עוצמת האות בתחום תדרים כזה שאינו מושפע מהפעילות הקולית של החרק או הרעש הסביבתי אלא רק מעוצמת ההגברה של האותות (Bimbot et al., 2004). מניתוח כלל ההקלטות נתקבל מאגר נתונים מאפיינים. נימצא כי פעילות זחל החדקונית מאופיינת על ידי ארבע קבוצות עיקריות של קולות: א. רעשי לעיסה- נשמעים כאשר הזחל נובר או ניזון מרקמת הצמח. ב. רעשי תזוזה (חיכוך) - נגרמים כניראה כתוצאה מתזוזת הזחל והתחככותו בסיבים. ג. רעשים הנשמעים כקשורים בפעילות ההפרשה של נוזלים. ד. רעשי קריעת מיתרים הקשורים כניראה לקריעת הסיבים.

קולות הלעיסה מלווים בתזוזה של הזחל, כך שקשה להפריד בין רעשי החיכוך לבין רעשי הלעיסה. מלאכת הסיווג (Labeling) בין קולות החיכוך לקולות הלעיסה במקרה זה מסובכת ועדיין לא ניסינו להפרידן. לצורכי העבודה נבחרו קטעי קול שאין בהם פעילות קולית מעורבת. קבוצת ה-"רעש" היא קבוצת אותות של כל הפעילות הקולית שאינה פעילות קולית של זחלים. קבוצה זו מורכבת משני חלקים: א. הקלטות שנעשו במעבדה פעילה. ב. הקלטות של עצי דקל בהם אין נוכחות זחלים.

עצי דקל משמיעים שני סוגים של רעשים: א. רעשים טיבעיים הנשמעים כמו רשרוש. רעשים אלו מתמשכים ועוצמתם גבוהה בדומה לעוצמת הקולות שמשמיע הזחל. ב. קולות נפץ קצרים מאוד הנשמעים כמו מיתר שנקרע.



איור 2 : סכמה של מערכת ההקלטה.

שלב הלמידה

לצורך הלמידה נבחרו שתי קבוצות למידה מתוך כלל הקבצים שאופינו בשלב הקודם, קבוצת קבצים עם פעילות זחל וקבצים עם פעילות צמחית. כל קבוצה מונה 10,000 וקטורים אופייניים אשר קובצו למודל למידה של האלגוריתם הכולל 10 וקטורים אופייניים. מכל קבוצה נלמד מודל זיהוי בן 10 וקטורים.

שלב המבחן

בשלב זה המבחן מבוצע ע"י הרצת האלגוריתם על קיטעי הקלטה בני 5 שניות וכל סווג על ידי המחשב. במידה וקטע אחד מסווג כפעילות זחל, ככלל הקובץ סומן כ-'יש זחל', אחרת סומן 'אין זחל'. תהליך זה הופעל על 432 קבצים עם מספר רב מאוד של הרצות רציפות. בכל הרצה נבחרה קבוצת למידה חדשה. התהליך המבחן נערך מספר רב של פעמים וממצאי המחשב הושוו לסיווג הקבצים כפי שנתקבל על ידי חבר מומחים. או ששונו פרמטרים במנגנון הלמידה. התוצאות המוצגות בטבלה הנם הממצאים של האלגוריתם האחרון והיעיל ביותר שהתקבל. בכדי להיות בטוחים שהאלגוריתם שבידינו אכן יעיל, האלגוריתם נבדק חמש פעמים ובכל פעם נבחרה קבוצת למידה שונה. בכל ההרצות התקבלו אותן תוצאות.

סיווג ע"י מומחים וניתוח הסיווג.

ארבעה מאזינים מנוסים האזינו ל-404 ההקלטות מאוכסנות במחשב בצורה עיוורת ללא ידיעת נתוני הקובץ (מספר העץ או גיל הזחל). המאזינים סיווגו כל קטע לאחד משלוש קטגוריות: יש זחל (2), לא ברור (1), ואין זחל (0). ארבעת המומחים הסכימו על 125 מתוך 404 הקבצים (31%) (סיווג זהה ע"י כל אחד מהמומחים 0,0,0,0 או 2,2,2,2). סיווג של מומחה אחד חרג באופן בולט משאר המומחים ברוב המקרים ולכן הוחלט לא להתחשב בסיווג שלו בבחינת האלגוריתם. שלושת המומחים הנותרים הסכימו על 193 מתוך 404 הקבצים (48%). מתוך ה- 52% הקבצים שלא היתה עליהם הסכמה מלאה, קיימים קבצים בהם היתה הסכמה של 2

מתוך השלושה. יחד עם זאת ישנם גם קבצים ששני מומחים סיווגו אותם באופן זהה והמומחה השלישי סיווגם כ-לא ידוע'.

על מנת שניתן יהיה לנתח את מידת ההסכמה והאי הסכמה בין המומחים בצורה מוצלחת, נחלקו החלטות המומחים לחמש קבוצות: 1. הסכמה מלאה אפקטיבית (0,0,0 או 2,2,2); 2. הסכמה מלאה לא אפקטיבית (1,1,1); 3. הסכמה חלקית אפקטיבית (0,0,1 או 2,2,1); 4. הסכמה חלקית לא אפקטיבית (0,1,1 או 2,1,1); 5. אי-הסכמה (כל השאר). ממצאי ההשוואה מוצגים בטבלה 1. מהטבלה נראה כי במידה מסוימת שיעור ההסכמה היה גבוה יותר במיקרים בהם השתילים הכילו זחלים גדולים יותר.

טבלה 1: פילוח ההקלטות לפי ההסכמת המומחים והגיל המומצע של הזחל בכל קבוצה

סך הכל	אי הסכמה	הסכמה חלקית לא אפקטיבית	הסכמה חלקית אפקטיבית	הסכמה מלאה לא אפקטיבית	הסכמה מלאה אפקטיבית	
404	74	46	85	4	193	מספר הקבצים
100	18	12	21	1	48	אחוז הקבצים
8.1	8.8	6.0	8.8	3.8	9.7	גיל ממוצע של הזחל* בימים

* גיל הזחל מחושב כמספר ימים לאחר איכלוס הגזע.

אנו מעוניינים בהכרעה לגבי מספר רב של קבצים על מנת שנכל להערך את ביצועי האלגוריתם טוב יותר. לשם כך חשוב למצע את החלטת המומחים. קיימת אפשרות לנצל להסכמה גם קבצים מקבוצה 3.

טבלה 2: השוואת סיווג האלגוריתם מול החלטת מומחים.

קבוצת ההשוואה	קבצים עם פעילות זחל	קבצים עם פעילות צמחית	סה"כ שגיאה	טעות מסוג ראשון*	טעות מסוג שני**
קבוצה 1. (הסכמה מלאה אפקטיבית)	143	78	7.24%	2%	16.5%
קבוצה 1. ו-3. (הסכמה מלאה אפקטיבית וחלקית אפקטיבית)	185	121	6.2%	2.7%	11.5%

* אי זיהוי במיקרה של פעילות זחל

** זיהוי זחל במיקרה של העדר זחל

בטבלה 2 ניתן להבחין כי סיווג האלגוריתם הנוכחי תואם היטב את החלטת המומחים כאשר מדובר בקבצים שיש בהם פעילות זחל. טעות המחשב בזיהוי הזחל עמדה על 3%-2% בלבד (טעות מסוג ראשון). יחד עם זאת לאלגוריתם טעות גדולה יותר מסוג שני. להערכתנו, הסיבה לכך נעוצה בבעיה הקשורה במודל הלמידה. חשוב לזכור כי פעילות הזחל מלווה לרוב בפעילות צמחית וקשה לסנן את הפעילות הצימחית מפעילות החרק בעת יצירת מודל הלמידה.

בכדי לשפר את סיווג האלגוריתם יהיה עלינו לספק למודל בעתיד דוגמאות של פעילות צמחית שאין בהן פעילות חרק כלל וכאלו שאין בהן פעילות צמחית כל זאת, תוך סינון ההקלטות בעזרת שיטות מתקדמות.

מסקנות

במחקר של השנה האחרונה חלה התקדמות רבה בפיתוח שיטת חיטוי שתילים במתיל ברומיד בפיתוח האלגוריתם לניתור אקוסטי של פעילות זחל החדקונית. מצאנו שמינון של כ-20 גרם/מ"ק מתיל ברומיד במשך 4 שעות, יעיל להדברת הזחלים בשתיל בקוטר ממוצע של 7.5 ס"מ. קוטר זה קטן יחסית לקוטר המקובל לשתילה. בהמשך העבודה יהיה צורך לבחון את יעילות החיטוי גם בחוטרים גדולים אשר לא היה זמינים למחקר זה עד כה. כמו כן יש צורך לבחון מינונים שונים למשך חיטוי ארוך יותר וכל זאת תוך מניעת פיטוטוקסיות בתמר (מדד זה טרם נבחן עד כה).

מבחינת פיתוח שיטת הניטור האקוסטי הגענו לאלגוריתם ממוחשב המזהה פעילות זחל בדיוק של 97-98%, בתנאי שהזחל פעיל. האלגוריתם טועה, בשלב זה, לגבי שתילים נקיים מזחלים בכ-15% מהמיקרים במיוחד כאשר יש בצמח פעילות קולית חזקה מסיבות אחרות מאשר אלו הנגרמות על ידי זחלים. פרק הזמן המינימלי שדרוש לנו להכריע בוודאות האם יש חרק במידה ויש פעילות קולית חזקה הוא כ-5 שניות. השגיאה של האלגוריתם באיתור זחלים פעילים היא 2-3%, בדיקה מדוקדקת של הקבצים שהאלגוריתם כשל בזיהויים מעלה תוצאות מעודדות. השגיאה לא מתרכזת בעץ מסויים כי אם מתפזרת על מספר עצים. על מנת לסווג עץ כנגוע דיי לנו בהקלטה אחת המסווגת כ-י"ש זחלי. האלגוריתם הצליח לזהות את כל העצים הנגועים.

כיום, עדיין אין לנו מידע על מחזור הפעילות של החרק או העץ, ותרם נחקרו שיטות לעודד אותו לפעילות. אנו יודעים לסווג בדיוק רב פעילות קולית שנובעת מעץ דקל צעיר או מפעילות הזחל כאשר הם מוקלטים בתנאי מעבדה בתיבת הקלטה. הסיווג של האלגוריתם הוא יש פעילות של זחלי או אין פעילות של זחלי. במידה והאלגוריתם לא זיהה פעילות זחל למשך מספר דקות, עדיין לא ניתן להניח שהעץ נקי, מאחר וייתכן והזחל אינו פעיל.

מהשוואת הזיהוי האקוסטי על ידי גורם אנושי מול מחשב אנו למדים כי זיהוי אקוסטי על ידי גורם אנושי אינו פשוט ועקבי ומדגיש את הצורך בכלי של זיהוי אוטומטי המסוגל לחזור על עצמו, כלי שאינו מתעייף, ושיכול לצמצם את כמות השגיאות בתהליך הלמידה. ניתן לאמן אלגוריתם להגיע (לפחות) לאותו סדר גודל של דיוק כמו מומחים מאומנים. (2% שגיאה מסוג ראשון עבור קבוצת ההקלטות שיש לגביהם הכרעה מלאה). ניתן להפעיל את האלגוריתם על מספר מחשבים בעזרת אדם יחיד ולבחון מספר עצים רב בו זמנית. האדם המפעיל לא נזקק לידע מיוחד. להערכתנו, ניתן יהיה אף לשכלל את דיוק האלגוריתם. יחד עם זאת חשוב לשכלל את השיטה לצמצום זמן האזנה הדרוש לסיווג חוטרים נגועים ולא נגועים וכן, לצמצם את משך עיבוד המידע בכדי שנוכל לזהות חוטרים נגועים בזמן אמת ללא צורך בעיבוד נוסף.

אנו מתכננים להמשיך ולפתח את האלגוריתם על מנת לצמצם את השגיאה מסוג שני. בכדי ללמוד את התנהגות הזחל במהלך היממה אנו נפתח סביבת הקלטה המיועדת למעקב ארוך אחרי התנהגות הצמח והזחל. אם נדע מהי ההסתברות להאזין לעץ נגוע באקראי ולשמוע זחל נוכל להעריך את פרק הזמן המינימאלי הדרוש לאיתור המזיק. בנוסף, אנו מעוניינים גם לגלות האם לצמח יש פעילות קולית מחזורית. פיתוח שיטת חיטוי יחד עם ניתור פעילות זחלים יאפשר פיתוח ממשק הסגר נאות ליצור ולשינוע חוטרים/שתילים בין איזורי הגידול השונים.

- Bimbot, F., Bonastre, J-F., Fredouille, C., Gravier, G., Magrin-Chagnolleau, I., Meignier, S., Merlin, T., Ortega-Garcia, J., Petrovska-Delacretaz, D. and Reynolds, D.A. 2004. A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification. *EURASIP J. Appl. Sig. Proc.* 4:430–451.
- Giblin-Davis, R.M. (2001) Borers of Palms. in F.W., Moore, D., R.M., Giblin-Davis and Abad, R.G. [Eds.] *Insects on Palms*. Howard, CABI Publishing, Wallingford, UK. pp 267-305.
- Soroker, V., Blumberg, D., Haberman, A.M. Hamburger-Rishard, S., Reneh, T. Salavat, L. Anshelevich and Harari A. R. 2005. The current status of red palm weevil infestation in date palm plantations in Israel. *Phytoparasitica*, 33: 97-106.
- Soroker, V., Y. Nakash, U. Landau, A. Mizrach, A. Hetzroni, and D. Gerling. 2004. Utilization of sounding methodology to detect infestation by *Rhynchophorus ferrugineus* on palm offshoots. *Phytoparasitica* 32:6-8.