

**הרבצת אבקת פרחים בשדה אלקטרוסטטי**

אביטל בכר

הרבצת אבקת פרחים בשדה אלקטרוסטטי

חיבור על מחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת תואר

מגיסטר למדעים

בהנדסה חקלאית

מאת :

אביטל בכר

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

יוני 1996

חיפה

תמוז תשנ"ו

המחקר נעשה בהנחיית ד"ר יצחק שמולביץ בפקולטה להנדסה חקלאית בטכניון  
וד"ר שמואל גן-מור מהמכון להנדסה חקלאית במרכז המנהל החקלאי - וולקני

תודתי הרבה נתונה לפרופ' דן איזיקוביץ על הייעוץ הרב בנושאים בוטניים

תודה מיוחדת נתונה לד"ר שמואל גן-מור וד"ר יצחק שמולביץ על הנחייתם

כן נתונה תודתי ליפתח ואקנין ולבני רונן וכן לעמיתיי מהמכון להנדסה חקלאית על  
תרומתם להשלמת מחקר זה

## תוכן עניינים

<u>עמוד</u>	<u>תקציר</u>
1	
4	<b>רשימת סימנים</b>
6	<b>פרק 1: מבוא</b>
6	1.1 מבוא
7	1.2 מטרות העבודה
7	1.3 מהלך העבודה
8	<b>פרק 2: סקר ספרות</b>
8	2.1 אקולוגיה של האבקה
8	2.1.1 מהי האבקה
8	2.1.2 מאביקים טבעיים
9	2.1.3 שיטות מקובלות בהאבקה מלאכותית
11	2.1.4 שקד
14	2.1.5 תמר
16	2.2 תופעות אלקטרוסטטיות בצמחים, חרקים, ואבקה
16	2.2.1 רקע בסיסי
18	2.2.2 שימושי אלקטרוסטטיקה בחקלאות
18	2.2.3 איפיונים אלקטרוסטיים בצמחים, חרקים, וגרגרי אבקה
20	2.2.4 השפעת כוחות אלקטרוסטיים על גרגרי אבקה
22	2.2.5 מנגנון הטעינה בבעלי חיים
23	2.2.6 השפעת שדה ומטען חשמלי על דבורים
24	2.2.7 טכניקות טעינה אלקטרוסטטית
25	2.2.8 ניסויים בריסוס אלקטרוסטטי של טיפות
26	2.3 סימולציות ומודלים לחיזוי ומציאת השפעות ומאפיינים
26	אלקטרוסטטיים בריסוס והאבקה
26	2.3.1 שיטות למדידת המטען החשמלי ומהירות חלקיקי תרסיס וגרגרי אבקה
26	2.3.2 שיטות מתמטיות ונומריות לחישוב פרמטרים אלקטרוסטטיים
29	במערכות מורכבות
33	2.4 סיכום

	<b>פרק 3: מודל ממוחשב לתאור האבקה אלקטרוסטטית</b>
34	3.1 אלמנטים סופיים כאמצעי לפתרון בעיה אלקטרוסטטית
34	3.2 בחינת המודל מול פתרונות תאורטיים
35	3.3 השדה החשמלי במודל דו-ממדי של מערכת פרח תמר/אבקה טעונה
37	אלקטרוסטטית
	3.4 השדה החשמלי במודל תלת-ממדי של מערכת פרח תמר/אבקה טעונה
42	אלקטרוסטטית
46	3.5 סימולציית מסלול תנועת גרגרים
48	3.6 סיכום
	<b>פרק 4: ניסויי פיזור אלקטרוסטטי של אבקה</b>
50	4.1 מבוא
50	4.2 שיטות ואמצעים
50	4.2.1 מערכת לפיזור אבקת פרחים טעונה אלקטרוסטטית
51	4.2.2 מערכות נילוות להערכת איכות ההאבקה
52	4.3 ניסוי מעבדה בהרבצת אבקה על מודל דמוי פרח תמר
52	4.3.1 תאור הניסוי
54	4.3.2 תוצאות ודיון
56	4.4 ניסויי שדה בהרבצת אבקה בתמרים
56	4.4.1 תאור הניסויים
57	4.4.2 תוצאות ודיון
63	4.5 ניסויי שדה בהרבצת אבקה בשקדים
63	4.5.1 תאור הניסויים
64	4.5.2 תוצאות ודיון
	<b>פרק 5: דיון ומסקנות</b>
70	5.1 מודל פרח תמר/אבקה טעונה אלקטרוסטטית
71	5.2 סימולציית תנועת גרגרים
71	5.3 ניסויי מעבדה ושדה
	<b>פרק 6: סיכום והצעות להמשך</b>
74	6.1 סיכום
74	6.2 הצעות להמשך
	תוכן עניינים (המשך)
	<b>נספחים</b>
76	נספח א'
76	נספח ב'
80	

88

נספח ג'

91

נספח ד'

94

**רשימת מקורות**

## תקציר

האבקת פרחים הינה חלק מתהליך הרבייה של צמחים והכרחית ברוב המקרים להמשכות הדור. בחקלאות המודרנית ובתנאי שוק תחרותיים, חשיבות ההאבקה רבה ביצור פירות, ירקות וזרעים איכותיים. האבקת רוב עצי הפרי בארץ מתבצעת בעזרת חרקים האוספים את האבקה ממאבקי הפרח ומעבירים אותה אל צלקות העליים. כתוצאה מתנאים אקולוגיים בלתי מתאימים וחוסר התאמה בין המאביקים לגידול המואבק, עלולה להתקבל רמת האבקה ירודה הגורמת ליבול נמוך ופחות כלכלי.

התמר הינו צמח מואבק רוח המואבק בארץ באופן מלאכותי. שיטות ההאבקה המלאכותית הנהוגות כיום בתמרים הינן יקרות ובעלות יעילות נמוכה. כמו כן, באיסוף האבקה ופיזור פעולות ההאבקה דורשות כמות אבקה וכוח אדם רב. השקד הינו צמח מואבק חרקים. כתוצאה מתנאי מזג אוויר קיצוניים, דרישות ביולוגיות מיוחדות לקיום ההפריה וחוסר שיווי משקל מספרי בין החרקים המאביקים לשקד, מתקבלת רמת האבקה וחנטה נמוכה. השיטות הנפוצות להעלאת רמת ההאבקת השקדים בארץ הן: נטיעת עצים מזנים שונים במטע והכנסת כוורות לתוך מטעי שקדים בתקופת הפריחה.

בעקבות תצפיות של מספר חוקרים שדיווחו על ענן אבקה המתרומם ממאבקי פרח ונצמד אל דבורה המרחפת מעליו, בוצעו מספר מחקרים אשר מצאו כי דבורה נטענת במטען חשמלי תוך כדי מעופה ונפנוף בכנפיה. כמו כן, הועלתה השערה כי כאשר דבורה טעונה קרבה לפרח היא משרה עליו מטענים חשמליים ומפעילה כוחות אלקטרוסטטיים המאפשרים ניתוק גרגרי אבקה. בשנים האחרונות מתפתחת טכנולוגיה של שימוש בכוחות אלקטרוסטטיים במקרים בהם יש לשנע ולהצמיד למטרה מדויקת חלקיקים כמו אבקות וטיפות זעירות. בתעשייה יושמה הטכנולוגיה בצביעה אלקטרוסטטית ובמכונות צילום. בענף החקלאות יושמה טכנולוגיה זו לתחום של ריסוס חומרי הדברה נגד מזיקים. עבודות מקדימות בנושא מראות את יתרון הריסוס האלקטרוסטטי על פני הריסוס הרגיל בחיסכון כמות החומרים, כיסוי טוב יותר של המטרות והקטנת הזיהום הסביבתי.

מטרת העבודה הנוכחית הינה שיפור תהליך ההאבקה באמצעות אלקטרוסטטיקה תוך הערכתה כמותית ולימוד הכוחות והשדות הפועלים במערכת באמצעות מודל לחיזוי תהליך ההרבצה של גרגרי האבקה. בעבודה נחקרו הכוחות הפועלים במערכת פרח/ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית. נבדקה האפשרות כי טעינת גרגרי אבקה פרחים במטען חשמלי ופיזור על פרחים תשפר את תהליך ההאבקה ואת אחוז חנטת הפרחים על ידי הגדלת מספר הגרגרים המורבצים על צלקת הפרח.

העבודה פותחת בסקר ספרות רחב בכדי להבהיר את הרקע הבוטני החשוב להבנת הבעיות, הרעיונות והגישות לפתרון בעיות ההאבקה. בסקר הספרות מתוארים השקד והתמר שנבחרו לבחינה בעבודה זו, השימושים באמצעים אלקטרוסטטיים בצמחים ובעלי חיים, הטכניקות

והניסויים בריסוס אלקטרוסטטי בחקלאות, השיטות המתמטיות/נומריות לחישוב פרמטרים אלקטרוסטטיים במערכות מורכבות ושיטות ניסויים למדידת מטען חשמלי בחלקיקים.

בעבודה נחקרה השפעת מורפולוגיית הצמח על יעילות הרבצת האבקה. נוסח מודל נומרי זו ותלת ממדי המשתמש בשיטת אלמנטים סופיים לחישוב השדה החשמלי והכוחות הפועלים במערכת של דמוי פרח תמר בקוטר 4 מ"מ וענן אבקה. נבדקה באופן תאורטי השפעת מבנה הפרח ואורך העלי על השדה החשמלי במערכת הנתונה. נמצא כי השדה החשמלי המקסימלי במערכת ממוקם בראש העלי וכי עם עליית אורך העלי גדלה עוצמת השדה החשמלי בראשו. חושב כי במודל הדו-ממדי השדה החשמלי המקסימלי בפרח בעל עלי באורך 5 מ"מ גדול פי 2.25 מאשר בפרח חסר עלי והיחס בין השדה המקסימלי לבין השדה במעטפת הפרח הינו 5.4 במערכת פרח בעל עלי באורך 5 מ"מ. במודל התלת-ממדי השדה החשמלי המקסימלי בפרח בעל עלי באורך 4 מ"מ גדול פי 2 מאשר בפרח חסר עלי והיחס בין השדה המקסימלי לבין השדה במעטפת הפרח הינו 3 במערכת פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ. כמו כן נערכה סימולציה באמצעות המודל הנומרי לשם חישוב מסלול תנועת הגרגר ומקום נחיתתו על הפרח בהזנחת פרמטרים התלויים בזמן. נמצא כי כאשר מוספים טעינה אלקטרוסטטית בפוטנציאל חשמלי מחושב של 80 kV כמות הגרגרים המורבצים על קצה העלי גדלה פי 225 ועל שאר הפרח פי 36. מכאן שאטרקטיביות העלי לעומת הפרח גדלה פי 6.25 עבור האבקה אלקטרוסטטית. צפיפות הגרגרים הטעונים חשמלית על העלי גדולה פי 4.6 בממוצע מאשר על פני מעטפת הפרח. במודלים וסימולציות אלו ניתן להעריך את יעילות הרבצת האבקה האלקטרוסטטית בסוגי פרחים בעלי מורפולוגיה שונה. לשם בחינת המודל נבחנו תוצאותיו מול ניסויי המעבדה. נבנתה מערכת ניסוי שכללה מודל דמוי פרח תמר וענן אבקה טעון אלקטרוסטטית בקני"מ 1: 4.75. למודל הנומרי. נמדדה צפיפות גרגרים גבוהה פי 60 בראש העלי ופי 30 בממוצע בכל העלי בהשוואה למעטפת הפרח במתח של 80 kV. בניסוי נוסף שנערך במתח 0 kV נמדדה צפיפות גרגרים גבוהה פי 5 בלבד.

החלק השני של העבודה התמקד בניסויי שדה. נערך ניסוי לשיפור תהליך ההאבקה והגדלת היבול בתמרים בעזרת האבקה אלקטרוסטטית. נמצא יתרון ברור להאבקה אלקטרוסטטית על פני האבקה לא אלקטרוסטטית. התקבל שיפור באחוז הפרי של 85% ו-150% בשני ניסויים בהתאמה כאשר משווים האבקה אלקטרוסטטית להאבקה לא אלקטרוסטטית. ניסויים בשקדים חיזקו את התוצאות אשר התקבלו בניסויי התמרים. בניסויים שנערכו בתקופת אמצע הפריחה נמצא שיפור של 70% באחוז הפרחים שחנטו בשיטת האבקה אלקטרוסטטית בהשוואה להאבקת דבורים בלבד. החנטה בהאבקה אלקטרוסטטית היתה דומה בכל הניסויים ועמדה על כ-50%. החנטה בהאבקת דבורים נעה בין 28% באמצע הפריחה ל-1% בסופה. התוצאות בתמרים היו טובות יותר ונבעו מהמבנה הגיאומטרי של הפרח אשר גרם לריכוז השדה החשמלי מעל הצלקת בצורה טובה יותר מאשר בשקדים. בנוסף תכונות אבקת התמרים ובעיקר גודל הגרגרים מתאימות יותר להאבקה אלקטרוסטטית מאשר אבקת פירחי השקד.

על סמך תוצאות עבודה זו יש מקום לערוך ניסויי שדה על מגוון רחב יותר של גידולים באופן חצי מסחרי ומסחרי. לבדוק את השתנות השדה החשמלי והשפעתו במודל נומרי שאינו קבוע בזמן, לערוך סימולציה הכוללת פתרון של שדה זרימה ושיפור ציוד ההאבקה.





## רשימת סימנים

-A	שטח
- a	אורך ראש העלי
- $A_p$	שטח חתך הגרגר
- B	מקדם טעינת יוניזציה
- C	קיבול
- $C_D$	מקדם גרר הגרגר
-Cr	קיבוליות הטבעת
- D	כוח גרר
- d	מרחק
- E	שדה חשמלי
- $E_0$	השדה החשמלי המשרה
- F	הכוח הפועל בין שני המטענים
- f	ספיקה
- h	עובי התרסיס
-i	זרם
- $i_{peak}$	זרם מרבי
- K	מקדם הדיאלקטריות (משוואה 2.1)
- K	מטריצת ה"קשיחות" (משוואה 2.18)
-k	מקדם הולכת החום
- l	מרחק
- Q	מטען חשמלי
- $q, q_1, q_2$	מטענים חשמליים
- R	התנגדות
- r	רדיוס
- $r_c$	רדיוס מעטפת הפרח
- $r_{esc}$	רדיוס ענן האבקה המגיע אל הפרח
- $r_{ess}$	רדיוס ענן האבקה המגיע אל העלי
- $R_p$	מספר ריינולדס
- $r_p$	רדיוס החלקיק
- $r_s$	רדיוס העלי
- s	שטח מעטפת
- T	טמפרטורה
- t	זמן
- $t_{peak}$	זמן שבו מתקיים $i_{peak}$
- $U_h$	מהירות בכיוון התנועה

$U_v$	- מהירות בניצב לכיוון התנועה
$u$	- מהירות החלקיק
$V$	- מתח חשמלי
$V_{air}$	- מהירות האוויר על פני הגרגר
$V_L$	- פוטנציאל בלוח השמאלי
$v$	- מהירות החלקיק
$W_{a \rightarrow b}$	- עבודה המתבצעת במעבר מ- a ל- b
$X$	- מרחק
$x$	- מרחק
$Y$	- גובה מטרה אנכית
$y$	- מרחק
$Z$	- מרחק לאורך ציר הסימטריה
$\gamma$	- הצפיפות המקומית.
$\epsilon$	- מקדם הרשיות
$\epsilon_0$	- מקדם הרשיות של וואקום
$\epsilon_r$	- מקדם רשיות של הטבעת
$\epsilon_r$	- מקדם רשיות יחסית
$\Phi$	- שטף חשמלי
$\mu$	- צמיגות
$\eta_c$	- שיפור בכמות האבקה המורבצת על העלי עקב תוספת אלקטרוסטטיקה
$\eta_s$	- שיפור בכמות האבקה המורבצת על מעטפת הפרח עקב תוספת אלקטרוסטטיקה
$\eta_p$	- השוואת צפיפות הגרגרים על העלי במשוואה לצפיפותם על מעטפת הפרח
$\theta_i$	- הזווית בין כיוון השדה החשמלי לבין נורמל המשטח האינטפיסימלי.
$\Psi$	- פוטנציאל חשמלי
$\rho$	- ווקטור צפיפות המטען
$\rho_{air}$	- צפיפות האוויר
$\sigma$	- צפיפות המטען
$\tau$	- זמן רלקסציה
$\chi$	- מקדם החום הסגולי.

## פרק 1: מבוא

### 1.1 מבוא

ברוב הצמחים אברי הרבייה נמצאים בפרחים, תאי המין הנקביים נמצאים בשחלה שבתחתית העלי ותאי המין הזכריים נמצאים בגרגרי האבקה. תהליך ההאבקה נקרא השלב בו גרגר אבקה עובר מהמאבק אל הצלקת שבעלי, הוא מהווה חלק מתהליך הרבייה והכרחי ברוב המקרים להמשכיות הדור. בחקלאות המודרנית ובתנאי שוק תחרותיים, חשיבות ההאבקה רבה ביצור פירות, ירקות וזרעים איכותיים. האבקה חלק ניכר מעצי הפרי בארץ מתבצעת בעזרת חרקים האוספים את האבקה ממאבקי הפרח ומעבירים אותה אל צלקות העליים. כתוצאה מתנאים אקולוגיים בלתי מתאימים כגון מזג אוויר סגרירי וחוסר איזון מספרי בין החרקים המאביקים לבין הצמחים עלולה להתקבל רמת האבקה ירודה הגורמת ליבול נמוך הפוגע בכדאיות הכלכלית. תופעה זו ידועה במיוחד בתמרים, שקדים, אבוקדו, קיווי, תפוחי עץ, דלועים, סולניים, אגוזי פקאן ועוד.

התמר הינו צמח חד מיני למרות שלעתים ניתן לראות עצים דו מיניים. מבנה ותכונות הפרח וגרגרי האבקה מוכיחים כי הינו מואבק רוח. כיום ההאבקה בתמרים הינה מלאכותית לחלוטין. השיטות המלאכותיות יקרות, בעלות יעילות נמוכה ודורשות כמות אבקה וכוח אדם רב, הן באיסוף האבקה מן העצים הזכריים והן בפיזור האבקה על העצים הנקביים.

עץ השקד פורח בפברואר למשך כשבועיים. על מנת לקבל פירות בשקד, יש צורך להאביק בין זנים שונים. מבנה הפרח, מיקום האבקנים והעלי, דביקות גרגרי האבקה, הפרשת הצוף, ריחו וצבעו מראים כי השקד הינו מואבק על ידי חרקים ובעיקר דבורים. כיום שיפור האבקה בשקדים מסתכם בשיטות לניצול טוב יותר של דבורת הדבש כמאביק. השיטות הנפוצות הן: נטיעת עצים מזנים שונים במטע, הכנסת כוורות לתוך מטעי שקדים בתקופת הפריחה ושימוש באינסרטים.

מספר חוקרים (איש עם ואיזיקוביץ, 1990) דיווחו על מקרים בהם נצפה ענן אבקה מתרומם ממאבקי פרח ונצמד אל דבורה המרחפת מעליו. במספר מחקרים נמצא כי דבורה נטענת במטען חשמלי תוך כדי מעופה ונפנוף בכנפיה (שוורץ 1992, Erickson 1975, Y'eskov 1976). הועלתה השערה כי כאשר דבורה טעונה קרבה לפרח היא משרה עליו מטענים חשמליים ומפעילה כוחות אלקטרוסטטיים המאפשרים ניתוק גרגרי אבקה.

בשנים האחרונות מתפתחת הטכנולוגיה של שימוש בכוחות אלקטרוסטטיים במקרים בהם יש לשנע ולהצמיד למטרה מדויקת חלקיקים כמו אבקות וטיפות זעירות. בתעשייה מיושמת הטכנולוגיה במכונות צילום ובצביעה יבשה של משטחים גדולים כגון חלקי מכוניות או מקררים. בענף החקלאות יושמה טכנולוגיה זו לתחום של ריסוס חומרי הדברה נגד מזיקים. נעשו מספר עבודות המראות את יתרון הריסוס האלקטרוסטטי על פני הריסוס הרגיל בחיסכון כמות החומרים הנדרשים, כיסוי טוב יותר של המטרות, והקטנת הזיהום הסביבתי ( Gan-Mor and Law 1992, Dante and Gupta 1991, Lake 1988, Law and Bowen 1975, Law 1978).

העבודה הנוכחית נועדה להוסיף נדבך בהבנת יחסי הגומלין בין האבקה הטעונה אלקטרוסטטית לבין מורפולוגיית הפרח של צמחים שונים.

## 1.2 מטרות העבודה

המטרה הכללית של העבודה הינה שיפור תהליך ההאבקה באמצעות אלקטרוסטטיקה תוך הערכתו הכמותית ולימוד הכוחות והשדות הפועלים במערכת באמצעות מודל לחיזוי תהליך ההרבעה של גרגרי האבקה.

### המטרות הספציפיות הן:

פיתוח מודל נומרי לחיזוי תהליך ההרבעה של גרגרי אבקה בשדה אלקטרוסטטי.  
 עריכת ניסויי מעבדה לאימות המודל הנומרי.  
 עריכת ניסויי שדה לבדיקת יעילות ההאבקה האלקטרוסטטית.  
 גיבוש המלצות לתיכנון ופיתוח שיטות הנדסיות להאבקה אלקטרוסטטית.

## 1.3 מהלך העבודה

העבודה פותחת בסקר ספרות רחב בכדי להבהיר את הרקע הבוטני החשוב להבנת הבעיות, הרעיונות והגישות לפתרון בעיות ההאבקה. בסקר הספרות מתוארים השקד והתמר שנבחרו כגידולי מבחן לעבודה זו. חלק נרחב מוקדש לסקירת השימושים באמצעים אלקטרוסטטיים בצמחים ובבעלי חיים. כמו כן מובאת סקירה של טכניקות וניסויים בריסוס אלקטרוסטטי בחקלאות. הסקר הספרותי מסתיים בסקירת שיטות מתמטיות ונומריות לחישוב פרמטרים אלקטרוסטטיים במערכות מורכבות ובשיטות ניסיוניות למדידת מטען חשמלי בחלקיקים. בפרק 3 מנוסח מודל נומרי המשתמש בשיטת אלמנטים סופיים לחישוב השדה החשמלי והכוחות הפועלים במערכת דמוי פרח תמר/ענן אבקה. כן נערכה סימולציה המחשבת את מסלול תנועת הגרגר ומקום נחיתת הגרגר על הפרח בהזנחת הפרמטרים התלויים בזמן. פרק 4 מדווח על עבודה ניסויית. תחילתו בניסוי מעבדה לאימות המודל הנומרי. בהמשך מדווחים ניסויי שדה שנערכו בתמרים ושקדים לבדיקת יעילות ההאבקה האלקטרוסטטית. בפרק 5 נערך דיון והוסקו מסקנות מתוצאות הניסויים והרצות המודל הממוחשב. פרק 6 מסכם את תוצאות העבודה ומצביע על הצעות להמשך. בנספחי העבודה מצויים פרטים על המודל הנומרי.

## פרק 2 - סקר ספרות

### 2.1 אקולוגיה של האבקה

#### 2.1.1 מהי האבקה

בכל הצמחים בעלי הפרחים, אברי הרבייה נמצאים בפרח. תאי המין הנקביים נמצאים בשחלה שבבסיס העלי ותאי המין הזכריים נמצאים בתוך גרגרי האבקה. אך לא בכל הצמחים האבקנים ושחלות נמצאים באותו הפרח. קיימים מיני צמחים שבהם פרחי הזכר ופירחי הנקבה נמצאים על פרטים שונים, כדוגמת התמר והתות. להלן תאור כללי בו מתוארת התפתחות דור המשך בצמחים בעלי פרחים: גרגר אבקה נוחת על צלקת הפרח, נובט ושולח נחשון המכיל תאי מין זכריים דרך עמוד העלי אל תוך השחלה עד לביצית המכילה תא מין נקבי. לאחר הפריה מוצלחת הפרח עובר לשלב החנט (שלב הפרי המוקדם) שבו השחלה גדלה ומתפתחים בה זרעים מהביציות המופרות. הזרעים מגיעים למצע הנביטה (בדרך כלל לקרקע), נובטים ומהם מתפתח צמח חדש. קיימים גידולים שבהם לא תתקיים הפרייה במידה וגרגר האבקה והביצית שייכים לאותו פרח, צמח או אפילו זן (self incompatibility).

תהליך מעבר גרגרי אבקת פרחים מן המאבקים אל הצלקת שבעלי והרבעתם מכונה "האבקה". בטבע קיימות מספר צורות האבקה. האבקה עצמית ספונטנית אשר אינה דורשת אמצעי חיכוך להעברת הגרגרים אל הצלקת, האבקה עצמית שאינה ספונטנית והאבקה זרה. עבור ההאבקה העצמית שאינה ספונטנית וההאבקה הזרה דרושים אמצעים המעבירים את גרגרי האבקה מן האבקנים אל צלקת העלי. האמצעים יכולים להיות בעלי חיים (biotic), והאבקה תופץ בעזרת ציפורים, עטלפים ובעיקר חרקים. או שההאבקה יכולה להיות אביוטית (abiotic) שבה העברת האבקה נעשית שלא באמצעות בעלי חיים, כמו האבקות רוח (anemophily) או האבקות מים (hydrophelia) אשר נדירה בטבע (Faegri & Van der Pijl 1979).

#### 2.1.2 מאבקים טבעיים

בספרו של Free (1993) נכתב כי רוב בעלי החיים המאבקים שייכים למחלקת החרקים (insecta), מתוכם סדרת הדבורניים (Hymenoptera) מהווה כ- 50% מכלל המאבקים, זבובים (Diptera) מהווים כ- 20%, חיפושיות (Coleoptera) כ- 15%, פרפרניים (Lepidoptera) כ- 10% ואחרים כ- 5%. בעלי החיים מגיעים אל הפרחים במטרה לאסוף צוף ו/או אבקה להזנתם והזנת צאצאיהם. איסוף הצוף מתבצע באמצעות גפי פה בדרך כלל, לתוך הזפק (איבר דמוי קיבה). האבקה נאספת על ידי אברי איסוף מיוחדים או גפי פה ונצברת בדרך כלל על הבטן או הרגליים. החרקים אינם באים אל הפרח בכדי להאביקו (דרישת הצמח) אך הם מבצעים זאת תוך כדי איסוף המזון (איזיקוביץ 1994, Faegri and V. der Pijl 1979).

במהלך האבולוציה של הפרחים ומאבקייהם פיתחו הצמחים מספר תכונות אשר מאפשרות למאבקים את זיהויים ומגבירות את משיכתם כגון: צורת הפרח, ריחו, נוכחות משטחי נחיתה, מועדי הפריחה, שעות פתיחת הפרח וסוג הגמול הניתן למאביק. כל מאביק או קבוצת מאבקים

נמשכים לתכונות מסוימות בלבד. דבורים לדוגמה מעדיפות פרחים בעלי צורות לא סימטריות המפרישים ריחות עדינים, פרחים בעלי משטחי נחיתה ועלי כותרת בצבעים בולטים, המייצרים צוף וגרגרי אבקה. תכונת משיכה נוספת הינה הרכב הצוף. הצוף מורכב מסוכרים שונים והיחס ביניהם מכתוב את משיכת המאביקים אליהם. אם נתייחס לקשר שבין סוכרוז (S), גלוקוז (G) ופרוקטוז (F) באופן הבא:  $J = \frac{S}{G + F}$ , ה-J המועדף על ידי דבורים יהיה מעל 0.5, זבובים ימשכו

ל 0.1 ורפרפים ל-  $J=0.99$  (איזיקוביץ 1994). קיים קשר בין מבנה החדק לבין ריכוז הסוכרים המועדף בצוף, ככל שהחדק יותר ארוך צמיגות הצוף חייבת להיות נמוכה יותר בכדי שיוכל להישאב על ידי החרק. לפי איזיקוביץ (1994) ריכוז הצוף משתנה בצמח במשך שעות היום, בדרך כלל השעות שבהן ריכוז הצוף מינימלי הינו בין  $6^{00}$  ל- $8^{00}$  ו- $18^{00}$  עד  $20^{00}$ , אולם הדבר עשוי להשתנות בהתאם למין הצמח, תנאי האקלים והתנהגות המאביקים בשטח. כאן הודגמה מורכבות פעולת ההאבקה הטבעית התלויה במספר גורמים רב.

### 2.1.3 שיטות מקובלות בהאבקה מלאכותית

גידולים רבים תלויים באופן מוחלט במאביקים, במיוחד בצמחים מואבקי חרקים שבהם לכל גידול יש חרק או קבוצת חרקים המתאימים לו. איזיקוביץ (1994) טוען כי קיימים מקרים בהם ההאבקה הטבעית אינה מתקיימת, כאשר המאביקים הטבעיים מושמדים עקב תנאי אקלים קיצוניים, מחלות או הדברה. במקרים מסוימים מעבירים צמחים מבית גידולם הטבעי לאזור שבו המאביקים הטבעיים אינם קיימים ואלו הקיימים אינם מתאימים להאביק את הצמח. הפתרון לבעיות אלו בחלק מהמקרים הינו הכנסת מאביקים מיוחדים או האבקה מלאכותית שפרושה שימוש באמצעים מלאכותיים לקיום האבקה ושיפור ההאבקה הטבעית בשיטות ידניות ומכאניות. ניתוח תהליך ההאבקה באופן הנדסי מראה כי התהליך מורכב משלושה שלבים: א) שחרור גרגרי האבקה מאבקני הפרח ואיסופם. ב) אחסון האבקה ושינועה לאמצעי ההאבקה. ג) פיזור גרגרי האבקה והיקלטותם בצלקת. כיום מיישמים האבקה מלאכותית על גידולים רבים ובחלקם היא הכרחית לקבלת יבול ויצירת פירות וזרעים.

להלן סקירה קצרה של תהליכי האבקה מלאכותית במספר גידולים חקלאיים:

#### האבקה בשקדים

כיום שיפור ההאבקה בשקדים מסתכם בשיטות לניצול טוב יותר של דבורת הדבש כמאביק. הגדלת יעילות דבורת הדבש מתקיימת בכמה תחומים, החוקר Thorp (1978) טוען כי הכנסת כוורות לתוך מטעי שקדים בתקופת הפריחה מספקות לדבורים מקור צוף ואבקה קרוב ועשיר ומעלות את רמת ההאבקה. הנחת זרי פרחים ליד עצי שקד הגדילו את מספר גרגרי האבקה שקיבלו הפרחים בעצים שבקרבתם. תכנון כוורות שימנעו אגירת אבקה יאלצו את הדבורים לאסוף אבקה במשך כל הזמן ועקב כך להאביק זמן רב יותר. McGregor (1976), טוען כי נטיעת עצים מזנים שונים במטע עשויה להגביר את אחוז ההאבקה הזרה ושימוש באינסרטים (inserts) שהם מעין שוקת המלאה באבקה המותקנים בפתח הכוורת, כאשר הדבורים יוצאות מן הכוורת הן מתכסות באבקה ותוך כדי ביקור בפרחים מאביקות אותם (איזיקוביץ 1994).

### האבקה בתמרים

לפי McGregor (1976) האדם האביק תמרים באופן ידני משנת 800 לפני הספירה וזהו למעשה הגידול העתיק ביותר הידוע אשר בוצעה בו בקרת האבקה לשם הגדלת יבול. אחת השיטות הנפוצות להאבקה היא לחתוך את אשכולי הפרחים הזכריים אשר נפתחו זה מקרוב ולהעבירם בין הפריחה הנקבית במשך שלושת הימים הראשונים לפריחתם או לקשרם בין הפרחים הנקביים. בארץ האבקה מלאכותית של עצי תמר נפוצה מאוד: לפי ברנשטיין (1995) איסוף האבקה מתבצע על ידי חיתוך התפרחות הזכריות והכנסתם למעין צנטרפוגה, האבקה שנאספה מדוללת בטלק או גבס ומפוזרת על התפרחות הנקביות באופן ידני בעזרת פודריות. שיטות נוספות כוללות פיזור האבקה על הפרחים בעזרת מפוחים וכלי טייס. עם זאת שיטות אלו יקרות, דורשות כמות אבקה וכוח אדם רב, ויעילותם נמוכה.

### האבקה בעגבניות

פרח העגבנייה נטוי כלפי מטה. מבנה פרח העגבנייה כשל צינור אשר פתוח בצידו המופנה כלפי מטה ובתוכו ממוקמים העלי והמאבקים, כאשר הדבורה המאביקה נוחתת על הפרח ומנדנדת אותו, גרגרי האבקה נושרים מן האבקנים אל הצלקת וחלקם נדבקים לגופה (איזיקוביץ 1995). רוב שיטות ההאבקה המלאכותית בעגבנייה משתמשות בעיקרון זה. הטכניקה הראשונה שהופעלה על העגבנייה היתה נענוע ידני של הפרחים כדי שהאבקה תיפול אל הצלקות. בהמשך פותחה "הדבורה החשמלית", זהו נדנד חשמלי המייצר רעידות על מוט קצר, הנדנד מוצמד לגבעול הפרח והרעידות עוברות אל הפרח וגורמות להפרחת ענן אבקה. בעזרת הדבורה החשמלית הושג שיפור של כ-40% ביבול. במידה ורוצים ליצור מכלואים מסוימים יש לאסוף את האבקה מן הפרחים הזכריים ואז לפזרה על הפרח הנקבי בעזרת מכחול. החיסרון בשיטות אלו הוא השימוש בעבודת ידיים רבה ושעות העבודה הרבות הדרושות. כמו כן שיטה זו דורשת טיפול אישי בכל פרח ופרח. גן-מור וחובריו (1983) פיתחו טכניקה המפעילה זרם אוויר פועם על הפרחים. העבודה מתבצעת תוך כדי נסיעה בין הערוגות או השורות בחממה. היעילות המרבית הושגה בתדר של כ-23 Hz. יתרון השיטה הוא בביטול הטיפול האישי בכל פרח אך שיפור היבול בעזרת פתרון זה היה נמוך משל הדבורה החשמלית ועמד על כ-30%.

### האבקה בתפוחי עץ

יבולים דלים נובעים ממוגבלות חנטת הפרחים (בתפוח שטח הצלקת 0.5 ממ"ר ועבורו דרושים לפחות שני גרגרים בכדי שתתקיים חנטה) ואי התאמה במאבקים טבעיים. בשני מקרים אלו תוספת האבקה ידנית יכולה לשפר את חנטת הפירות. האבקה הידנית יעילה אך העבודה קשה ויקרה ולכן נחקרו טכניקות אחרות.

החוקר MacDaniels (1930) ריסס תמיסת גרגרי אבקה עם 10% סוכרוז אך הגידול בחנטה לא היה מעודד, ריסוס מהאוויר לא הראה שיפור מובהק בחנטה. נעשו מספר ניסויים לאיסוף ופיזור אבקת פרחי תפוח באופן ידני ומכני בכדי להגדיל את יבול התפוחים. פרחים הוסרו ידנית מן העצים ונטחנו. נפה רוטטת במפתח #8 או #12 מיינה בין חלקי הפרח לבין האבקנים. מערכת ייבוש



בטמפרטורה של  $26^{\circ}\text{C}$  גרמה לפתיחת המאבקים, ונפות של 90, 125, 300 ו-600 מיקרון הפרידו את גרגרי האבקה מן המאבקים. פיזור האבקה בוצע בעזרת מאביק מסוג Turbair duster המורכב ממכל אבקה קטן, אשר תחת לחץ מזריק את האבקה אל זרם אויר המונע על ידי מאוורר לשם הסעתה אל הפרחים. נעשה גם שימוש באקדח אלקטרוסטטי הטוען את הגרגרים במטען שלילי. האבקה דוללה עם גרגרי P.V.C. ביחס 9:1. ריכוז האבקה שפוזרה נע בין 15 ל-140 gr/acre. תוצאות הניסויים הראו שיפור מרבי של 21% בכמות היבול עבור פיזור אבקה בריכוז 70 gr/acre בעזרת Turbair duster. שיפור של 38% התקבל עבור פיזור בעזרת האקדח האלקטרוסטטי (Lombard et al. 1973). החוקרים Williams ו-Legge (1979) ערכו ניסויים בעזרת "Imp" Turbair micron sprayer שהותאם לפיזור אבקה על ידי שינוי המזין למזין גרגרי אבקה לתוך זרם האוויר. בתנאי מעבדה המתקן נתן פיזור גרגרים משביע רצון עד למרחק של 2 מ' מהנחיר. טעינה אלקטרוסטטית של הגרגרים נכשלה בשיפור ההרבה. חומר אינרטי סינתטי "Corvic" שימש לדילול האבקה, בדרך כלל ביחס של גרגר אבקה אחד עם 4 גרגרי Corvic. ההאבקה בוצעה מרכב שנסע במטע במהירות קבועה ואיטית, הסילון כוון לאזור העשיר ביותר בפרחים בעץ ולא נעשה ניסיון לכיסוי אחיד של העצים. האבקה פוזרה בשעורים של בערך 25 g/h עד 525 g/h. כמות אבקה של 30 g/h מומלצים לתפוחים על ידי ספקי אבקת תפוחים בצפון מערב ארצות הברית. תוצאות הניסוי לא הראו גידול משמעותי בחנטה, אך האבקה ידנית הכפילה ואף השלישה את החנטה. חיוניות האבקה היתה 75%. תוצאות הניסויים שבוצעו על ידי החוקרים השונים לא הראו יתרון חד משמעי של האבקה אלקטרוסטטית בתפוחים אך ההאבקה הידנית הראתה את הפוטנציאל הטמון בשיפור ההאבקה.

#### 2.1.4 שקד

השקד (*Prunus amygdalus batsch*) הינו עץ ממשפחת הורדניים (Rosaceae) אשר הוכלא מקבוצת מינים או זנים קרובה בעלת צורות מורפולוגיות שונות הנפוצות באופן טבעי באגן הים התיכון (איזיקוביץ ולופו 1989). למרות השונות, הגנטית והמורפולוגית הרבה במין זה קיימות מספר תכונות משותפות לכולם: אי התאם עצמי (incompatibility) פרט ליוצאים מהכלל, פירות מרים, ופריחה מוקדמת.

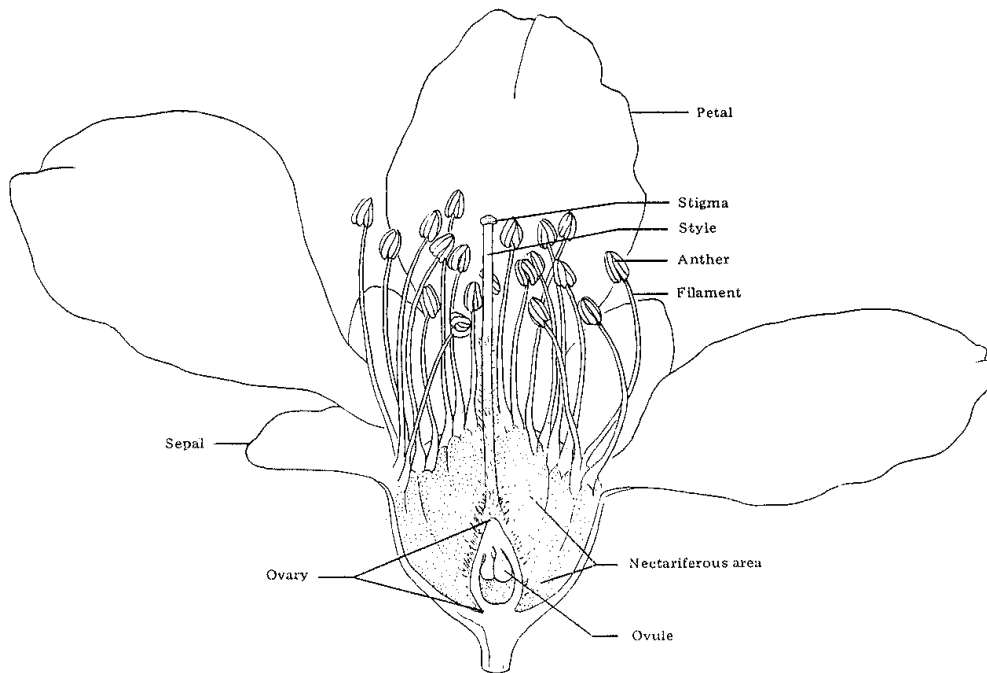
הפריחה בשקד מופיעה בדרך כלל לפני שהעלים התפתחו. עצי השקד מתפתחים בבתי גידול חמים ויבשים אך הם דורשים מנות קור מסוימות לפני הפריחה. הפירות לעומת יכולים לעמוד בטמפרטורה שמתחת לאפס. העצים ניטעים במטע במרחק 6 עד 10 מטרים זה מזה ובדרך כלל שתי שורות של הזן העיקרי על כל שורה של הזן המאביק (בשל אי ההתאם העצמי). עץ השקד יכול לייצר יבול במשך 50 שנה ויותר (McGregor 1976).

#### הפריחה בשקד

הפריחה בשקד בחצי כדור הארץ הצפוני מתרחשת מסוף ינואר עד סוף מרץ, אך רוב הזנים פורחים מאמצע פברואר ועד אמצע מרץ. בתקופת הפריחה דרוש מזג אוויר נאה עם טמפרטורות הגבוהות מ- $14^{\circ}\text{C}$  וללא גשם בכדי לאפשר מעוף ופעילות של חרקים מאביקים (איזיקוביץ ולופו

1989). כל פרח נפתח למשך 4 עד 5 ימים כאשר הצלקת רצפטיבית לקליטת האבקה במשך כשלושה ימים.

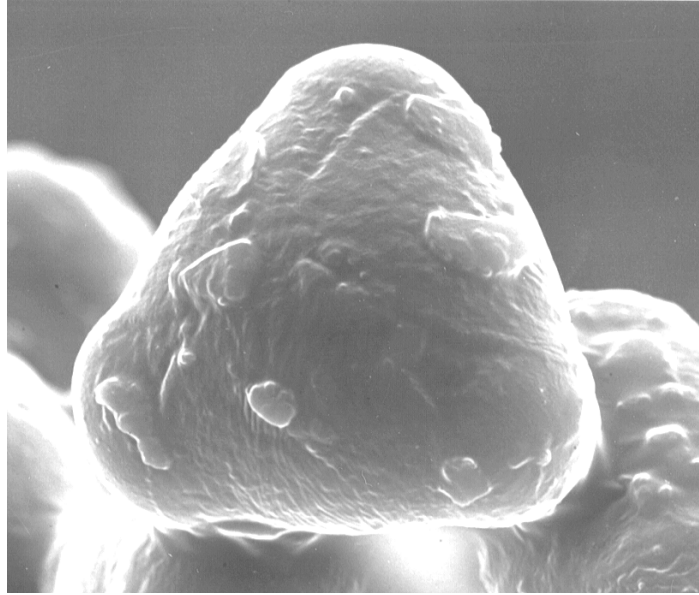
פרחי השקד מפוזרים על פני כל העץ בקבוצות של 2 עד 4 פרחים בדרך כלל. תאור הפרח: הפרח בגודל 2-4 ס"מ בדרך כלל, בעל עלי אחד באורך של כ-10 מ"מ עם שתי ביציות, השחלה אמצעית, חמישה עלי כותרת ורדרדים ו-10 עד 20 אבקנים המקיפים את העלי. הצוף נמצא בבסיס עלי הכותרת, קוטר הצלקת כ-1 מ"מ (McGregor 1976).



ציור מס' 2.1: ציור של פרח שקד (McGregor 1976).

Fig 2.1: A draw of almond flower (McGregor 1976).

גרגרי אבקת השקד מתפתחים במאבקים, צורתם כמשולש בעל פינות מעוגלות, רוחב הגרגר כ- $20\mu$  ואורך כל צלע כ- $40\mu$  (ציור מס' 2.2). הגרגרים מצופים במעטה שומני אשר מדביק אותם זה לזה בצברים גדולים גם לאחר יציאתם מן המאבקים. בעבודתו של מיכאל (1994) נמצא כי פתיחת המאבקים מושפעת מאוד מתנאי הסביבה, ביום חם ויבש המאבקים יפתחו בשעות מוקדמות יותר מאשר ביום קריר (מיכאל 1994, איזיקוביץ 1995).



ציור מס' 2.2 : גרגר אבקת שקד, הגדלה פי 2000 (צולם במסגרת העבודה הנוכחית).  
 Fig 2.2: Almond pollen grain x 2000

### ההאבקה בשקד

כאמור לעיל השקד self incompatible ועל כן בכדי לקבל פירות בשקד יש צורך בהאבקה זרה (cross pollination), דהיינו העברת האבקה מאבקנים של פרח אחד לצלקת בפרח אחר, גרגר האבקה לא ינבוט ולא יצמיח נחשון על צלקת מאותו פרח, עץ, או מעצים אחרים בני אותו זן. מבנה הפרח, מיקום האבקנים והעלי, דביקות גרגרי האבקה, הפרשת הצוף, ריחו וצבעו מראים כי פרחי השקד הינם בעלי מבנה אנטומופילי (מואבק על ידי חרקים) מובהק וברור כי לשם ההאבקה דרוש חרק כלשהו אשר ישמש כסוכן ויעביר אבקה בין הזנים השונים (Free 1993).

כיום, המאביק העיקרי, והיחיד בעל חשיבות כלכלית בשקד היא דבורת הדבש, מכיוון שמועד הפריחה המוקדם בארץ הינו תקופה קשה לחרקים: טמפרטורה נמוכה, רוחות, גשמים ומיעוט מקורות מזון. דבורי הדבש מבקרים את הפרחים בלהיטות הן עבור צוף והן עבור אבקה אך פעילותן במטעי השקדים נפגמת בצורה ניכרת כאשר יש פריחה של פירחי בר באזור (איזיקוביץ ולופו 1989). החוקרים McGregor (1976) ו-Thorp (1978) מצביעים על הטמפרטורות הנמוכות שבעונת הפריחה, הגשם והעננות הרבה כגורמים לירידה בפעילות הדבורים אשר לעתים כלל אינה קיימת. הדבורים אינן עפות כאשר יורד גשם, הטמפרטורה נמוכה מ-10°C ומהירות הרוח מעל 24 קמ"ש. בימים שבהן הטמפרטורה גבולית הדבורים מפסיקות את פעילותן כאשר ענן חולף מעל המטע. דרושה טמפרטורה מעל 14°C בכדי לקיים פעילות טיסה טובה. איזיקוביץ (1995) ו-Free (1993) ממליצים להכניס כוורות של דבורי דבש למטעי שקדים בתקופת הפריחה ואף להוסיף מתקנים כגון אינסרטים (inserts) לשם שיפור ההאבקה והגדלת היבול.

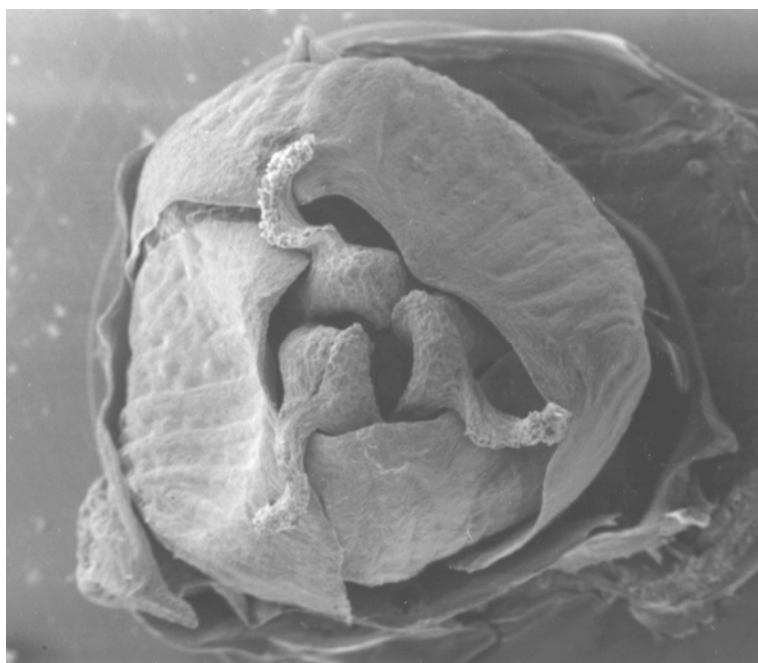
### **2.1.5 תמר**

התמר (*Phoenix dactylifera*) הינו עץ ממשפחת הדקליים (Palmeaceae), הנפוץ כצמח תרבות על פני כל כדור הארץ ומשגשג באקלים חם ויבש. עץ התמר יכול להתנשא לגובה של 15 מטרים

(McGregor 1976), רוב הזנים בעלי גזע יחיד ללא התפצלויות ובעלי נקודת צמיחה אחת בראש כתר הענפים.

### הפריחה בתמר

התמר הינו צמח חד מיני למרות שלעתים ניתן לראות עצים דו מיניים, התפרחת נמצאת בנקודת הצמיחה. בעץ הזכרי התפרחת מורכבת ממספר אשכולות פרחים, כל קבוצה של אשכולות סגורה בתוך נדן קשיח אשר נפתח ומתקלף כאשר האבקה הבשילה. אורך התפרחות מגיע ל- 120 ס"מ. בכל פרח שלושה עלי כותרת וששה אבקנים. הפרחים הנקביים מסודרים בצורה דומה אך באשכול קטן יותר, הם בעלי שלוש צלקות אך רק שחלה אחת מתפתחת לזרע ולפרי. נדן התפרחת נפתח בהתאם ללחות בפרחים. קוטר הפרח הוא 3-4 מ"מ (הן לפרחי הזכר והן לפרחי הנקבה).



ציור מס' 2.3 : פרח תמר נקבי (מבט על), הגדלה פי 25 (צולם במסגרת העבודה הנוכחית).  
Fig 2.3: Date female flower (top view) x 25.

הפריחה מתרחשת בחודשים אפריל עד יוני אך שיא הפריחה הינו בחודש מאי. האבקה מיוצרת למכביר בעצים הזכריים ומאוד מבוקשת על ידי דבורים, צורת הגרגרים כאליפסואיד באורך  $16\mu$  וקוטר של  $10\mu$ , באחד מצידיו הגרגר קיים סדק לכל אורכו (ציור מס' 2.4). אבקת התמר יבשה ואינה דביקה (אופיינית לצמחים מואבקי רוח) ובשל כך ניתן למצוא גרגרי אבקה בודדים רבים.



## 2.2 תופעות אלקטרוסטטיות בצמחים, חרקים, ואבקה

### 2.2.1 מושגי יסוד

אלקטרוסטטיקה הינה תחום בפיסיקה השייך לחשמל ועוסק בתופעות הקשורות לנוכחות מטענים חשמליים נייחים והשפעתם זה על זה ועל סביבתם כתלות בגודלם, מיקומם הגיאומטרי ותכונות של החומר והתווך. מטען חשמלי יכול להיות חיובי או שלילי. המשוואה הבסיסית של האלקטרוסטטיקה שפותחה על ידי Coulomb מחשבת את הכוח ההדדי הפועל בין שני מטענים כתלות בגודלם ובמרחקם זה מזה.

$$F = K \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad [2.1]$$

כאשר:

F - הכוח הפועל בין שני המטענים [N].

K - מקדם הדיאלקטרייות [m/F] המבוטא בנוסחה:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad [2.2]$$

$q_1, q_2$  - גודל המטענים [C].

d - המרחק בין המטענים [m].

$\epsilon$  - מקדם הרשיות של התווך [F/m].

הכוח הפועל בין מטענים שווי סימן הינו של דחייה ובין מטענים שוני סימן קיימת משיכה. במקרים המעורבים יותר משני מטענים, מחשבים את כל ווקטורי הכוחות הפועלים על המטען ומוצאים את ווקטור הכוח השקול הפועל עליו:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \quad [2.3]$$

השדה החשמלי E יהיה:

$$\vec{E} = \lim_{q' \rightarrow 0} \left( \frac{\vec{F}}{q'} \right) \quad [2.4]$$

כאשר  $q'$  הינו מטען בוחן חיובי השואף לאפס בנקודה שבה מחשבים את השדה ו-F הינו הכוח הפועל באותה נקודה. השדה החשמלי הינו ווקטורי וכיוונו ככיוון הכוח. לדוגמא השדה הפועל בנקודה i עקב מטען נקודתי יחיד יהיה בכיוון המטען או ממנו ומשוואת השדה תהיה:

$$E_i = \frac{K \frac{q \cdot q'}{d^2}}{q'} = K \frac{q}{d^2} \quad [2.5]$$

הכוח הפועל על חלקיקים זעירים וגרגרי אבקת פרחים יהיה  $F=qE$  מאחר וניתן להתייחס אליהם כאל מטענים נקודתיים.

השטף החשמלי  $\Phi$  הינו השדה החשמלי הנורמלי העובר דרך משטח נתון

$$\Phi = \sum_i E_i \cdot \Delta A_i \cdot \cos \theta_i \quad [2.6]$$

כאשר

$\Delta A_i$  - המשטח האינטפיסימלי שדרכו עובר השטף הנקודתי  $[m^2]$ .  
 $\theta_i$  - הזווית בין כיוון השדה החשמלי לבין נורמל המשטח האינטפיסימלי.

חוק גאוס: סך צפיפות שטף השדה החשמלי  $E\epsilon$  דרך מעטפת סגורה  $s$  שווה למטען הכלוא בתוכה:

$$\oint_s E\epsilon ds = \sum_i q_i \quad [2.7]$$

העבודה הנדרשת להעביר חלקיק מנקודה  $a$  לנקודה  $b$  הינה הכוח הפועל על החלקיק כפול המרחק שעבר:

$$W_{a \rightarrow b} = -\int_a^b F dl = -q \int_a^b E dl \quad [2.8]$$

הפרש הפוטנציאלים החשמלי הינו העבודה הנדרשת ליחידת מטען ומבוטא על ידי:

$$V_{ab} = -\int_a^b E dl \quad [2.9]$$

הפוטנציאל החשמלי של מטען נקודתי יהיה:

$$V = K \frac{q}{d} \quad [2.10]$$

ומכאן שהשדה החשמלי הינו מינוס גרדיאנט הפוטנציאל החשמלי:  $\vec{E} = -\nabla V$ , ובמקרה חד ממדי:

$$E = -\frac{dV}{dr} = -\frac{d\left(K \frac{q}{r}\right)}{dr} = K \frac{q}{r^2} \quad [2.11]$$

קיבול חשמלי זו תכונה התלויה בצורתו, ותכונותיו האלקטריות של גוף והמטען שבו. הקיבול החשמלי מבוטא כיחס שבין כמות המטען לפוטנציאל הגוף ונמדד בפרד [F]:

$$C = \frac{\sum_i q_i}{V_{ab}} = -\epsilon \frac{\oint_s E ds}{\int_a^b E dl} \quad [2.12]$$

קשרים פיסיקליים מקובלים בתחום האלקטרוסטטיקה שהוראו, באים להבהיר מושגים בהם נדון בהמשך המחקר הנוכחי.

## 2.2.2 שימושי אלקטרוסטטיקה בחקלאות

בשנים האחרונות מתפתחת טכנולוגיה של שימוש בכוחות אלקטרוסטטיים במקרים בהם יש לשנע ולהצמיד למטרה מדויקת חלקיקים כמו אבקות וטיפות זעירות. בענף החקלאות יושמה טכנולוגיה זו לתחום של ריסוס חומרי הדברה נגד מזיקים ונעשו מספר עבודות המראות את יתרון הריסוס האלקטרוסטטי על פני הריסוס הרגיל ( Gan-Mor and Law 1992, Dante and Gupta 1991, ) (Lake 1988, Law et al. 1990, Law and Bowen 1975, Law 1978). הנושא מקבל תנופה במיוחד כיום כאשר המודעות לאיכות הסביבה גוברת וקיימת דרישה להקטנת כמות חומרי ההדברה מצד ציבור הקונים, אך עם זאת נותר הצורך בהשמדת המזיקים. בריסוס הרגיל ענן התרסיס נשאר באוויר זמן ארוך, ויכול להיסחף למרחק רב ולגרום למפגע אקולוגי. כמות חומרי ההדברה שמקבל צידו העליון של העלה גבוהה מאוד בעוד צידו התחתון מקבל כמויות אפסיות. לעומת זאת ריסוס אלקטרוסטטי מאפשר שימוש בכמות חומרי הדברה קטנה יותר מאחר והטיפות הטעונות נמשכות אל הצמחייה, אינן נשארות באוויר זמן רב וצידו התחתון של העלה מקבל חלק ניכר מהתרסיס (Lake 1988, Dante (and Gupta 1991).

### 2.2.3 איפיונים אלקטרוסטטיים בצמחים, חרקים, וגרגרי אבקה

#### איפיונים אלקטרוסטטיים בצמחים

בימים חמים ויבשים קיימים שדות חשמליים חיוביים באטמוספירה. כיוון שהצמחים מוארקים לאדמה, ואינם מבודדים ניתן להניח כי מצטבר עליהם מטען חשמלי שלילי נמוך. עוצמת השדה החשמלי בקרבת הצמח וכמות המטען עליו תלויה בעובי הקוטיקולה, בגיאומטריה שלו, בגובהו ובסביבתו. פילוג השדה החשמלי משתנה בהתאם לגאומטריית הצמח, השדה חזק בקרבת אברים חדים כגון אבקנים וצלקות וחלש בקרבת משטחים רחבים כעלי כותרת. גורמים נוספים המשפיעים על עוצמת השדה הינם טיב פני השטח, הלחות והקיבוליות. טעינת הצמחים תהיה מיטבית בימים בהירים עם לחות נמוכה. ימים אלה מתאימים גם למעוף חרקים מאביקים.

#### איפיונים אלקטרוסטטיים בחרקים

בעבודתו של שוורץ (1992) נמצא כי חרקים צוברים מטען חשמלי תוך כדי תנועה דרך האוויר. חיכוך האוויר בזמן מעופם של החרקים גורם לקריעת אלקטרונים מהם וליצירת מטען חשמלי חיובי על גופם. תנועת חרק בשדה מיוון תגרום אף היא להצטברות מטענים בהתאם לשדה החשמלי. בדבורת הדבש המטען החשמלי נרכש כתוצאה מחיכוך הכנפיים באוויר.

כמות המטען שחרק צובר ומשך זמן קיומו משתנה לפי התנאים האטמוספריים, באוויר עומד, המטען יכול להתקיים על גוף החרק אף מספר דקות. ביום נאה הדבורה החוזרת לכוורת יכולה לשאת פוטנציאל חיובי של עד 1.8 וולט (Erickson 1975). החוקר Y'eskov (1976) דיווח על מטען של 45 pC אשר אמור לתת פוטנציאל של מאות וולטים ובעבודתו של שוורץ (1992) נמצא כי המטען הממוצע על דבורה במעוף הינו כ-23 pC. החוקר Erickson טוען (1975) כי המטען הנצבר על גבי דבורת הדבש קשור ישירות למשימתה, דבורה הנמצאת במסלול חיפוש מזון בטיסה למרחק רב ובגובה קבוע נטענת במטען חשמלי גבוה בהשוואה לדבורה שאינה במשימת חיפוש מזון. הסברו לכך היה שבמשימה שאינה חיפוש מזון הדבורה אינה טסה בגובה אחד ונחיתותיה גורמות



לאובדן מטענה. בתצפיותיו ראה כי דבורים היוצאות מן הכוורת נושאות מטען נמוך מאוד או אף שלילי כתוצאה ממגע ממושך עם הקרקע. כמו כן Erickson מצא כי כמות המטען החשמלי המצטבר על דבורים קטן בימים מעוננים ובלחות גבוהה. לפי Y'eskov (1976) ו Warnke (1976) קיים קשר בין התנהגות החרק לבין הגירוי החשמלי הנובע מהשדות החשמליים, השדות המגנטיים, והמטען המצטבר על גופו. החוקר Edwards (1962) מצא כי חרקים רוכשים מטען חשמלי גם כתוצאה ממגע בחומרים בלתי טעונים, המטען יכול להצטבר כתוצאה מהליכה או רפרוף על החומר וסוג מטענו החשמלי תלוי בסוג החומר.

#### אפיונים אלקטרוסטטיים בגרגרי אבקת פרחים

האבקה הינה תחום שנחקר רבות מהיבטים שונים. קיימות שיטות רבות לקיים האבקה בין צמחים. אחת ההשערות שהוצעו הינה המעורבות של כוחות אלקטרוסטטיים בהעברת גרגרי אבקה. בהמשך נעמוד על מנגנוני ההאבקה הטבעיים מנקודת אופיים האלקטרוסטטי, בכדי להעריך את תרומתם לנושא יעילות ההאבקה ובמטרה לחקות את המנגנונים הטבעיים.

מאחר והצמחים טעונים במטען חשמלי שלילי והדבורים במטען חשמלי חיובי, ייווצר שדה חשמלי בין הדבורה המאביקה לבין הפרח. כאשר הדבורה נוחתת על הפרח, המטען ממנה עובר לצמח והמטען החשמלי בפרח ישתנה. דבר זה מהווה מעין עדות לכך שבפרח התבצע ביקור על ידי מאביק והפרח אינו כדאי לאיסוף מזון. טעינה מחדש של הפרח לרמתו הטבעית אורכת 5 עד 40 דקות תלוי בתנאים אטמוספריים וגורמים כימיים בצמח (Jones and Buchmann 1974). זמן הטעינה מחדש מקביל לזמן שבו הפרח משלים את כמות הצוף שנאספה על ידי החרק המאביק.

תצפיות ב- כרוב השמן (Eisikowitch 1981) הראו כי ענן גרגרי אבקה עולה ונצמד לגוף דבורה אשר התקרבה לפרח. החוקרים הניחו כי בתהליך ההאבקה משתתפים כוחות נוספים לכוחות המכניים המשפרים ומיעלים את תהליך האבקה החרקים המאביקים בצמחים מסוימים וכי לכוחות האלקטרוסטטיים תפקיד כלשהו בהאבקה.

לפי איזיקוביץ (1995) הימצאות מטען חשמלי על הדבורה יכול לעזור בהאבקה גם ללא נחיתת הדבורה על הפרחים וללא יצירת מגע בצלקת ובאבקנים. כאשר הדבורה הטעונה במטען חיובי מתקרבת לפרח היא משרה מטענים שליליים עליו ובעיקר על קצוותיו, דהיינו האבקנים. בין הדבורה לאבקנים נוצר שדה חשמלי הגדל ככל שהמרחק ביניהם קטן. כאשר המרחק מספיק קטן הכוח המופעל על גרגרי האבקה גובר על הכוחות המדביקים אותם למאבקים והם ניתקים ועוברים לגוף הדבורה. הדבורה ממשיכה במעופה וניגשת לפרח נוסף המצוי בשלב נקבי, שבו הצלקת בולטת כאנטנה, כאן התהליך חוזר על עצמו אך מן הדבורה אל הצלקת. הדבורה משרה מטענים שליליים על הפרח ובעיקר על הצלקת ויוצרת שדה חשמלי חזק סביבה. כאשר המרחק בין הדבורה לצלקת מספיק קטן ניתקים גרגרי האבקה אשר נאספו קודם מן הדבורה נצמדים לצלקת ומפריים את הפרח. הכוחות האלקטרוסטטיים יהיו חזקים יותר בפרחים בעלי גרגרי אבקה יבשים יחסית, פני שטח חלקים ובעלי ממדים קטנים כך שכוח ההצמדה ההדדי יהיה חלש ויחס המטען הנצבר למסה יהיה גבוה.

החוקר Free מציין בספרו (1993) כי Buzz pollination מתרחשת בצמחים שונים אך בעיקר בצמחים ממשפחת הסולניים המתאפיינים בפרחים שאינם מכילים צוף אך בעלי כמות גדולה של גרגרי אבקה. גרגרי האבקה בדרך כלל בגודל הנע מ-5 עד 20 מיקרון, חלקים, יבשים וקלים. כאשר דבורה המחפשת מזון מגיעה לפרח היא נצמדת אליו מפעילה את שרירי החזה, גורמת לנפנוף מהיר בכנפיים ולתנודות הפרח והמאבק. גרגרי האבקה הנשפכים דרך חריץ במאבק נדבקים לבטן הדבורה. החוקר איזיקוביץ (1981) דיווח כי בתצפיות נראה שרוב האבקה נשארת על הדבורה למרות שחלק גדול ממנה היה אמור ליפול מטה בהשפעת כוח הכובד. ניתן להסביר תופעה זאת בכך שבנפנוף כנפיה הדבורה נטענת במטען חשמלי, משרה על המאבקים מטען חשמלי הפוך והשדה החשמלי הפועל ביניהם גורם למשיכת גרגרי האבקה ולהצמדתם אליה.

#### 2.2.4 השפעת כוחות אלקטרוסטטיים על גרגרי אבקה

בניסויים שנערכו על ידי Corbet et al. (1982) נבדקה השפעת הכוחות האלקטרוסטטיים על תנועת גרגרי אבקה כרוב השמן (*Brassica napus*) המצויים בין שתי אלקטרודות כאשר אחת מוארקה והשניה בפוטנציאל מסוים במספר מצבים. בכל המקרים שנחקרו נתקבלה עליה לינארית של log המתח עם עליה ב- log המרחק הדרוש לניתוק הגרגר.

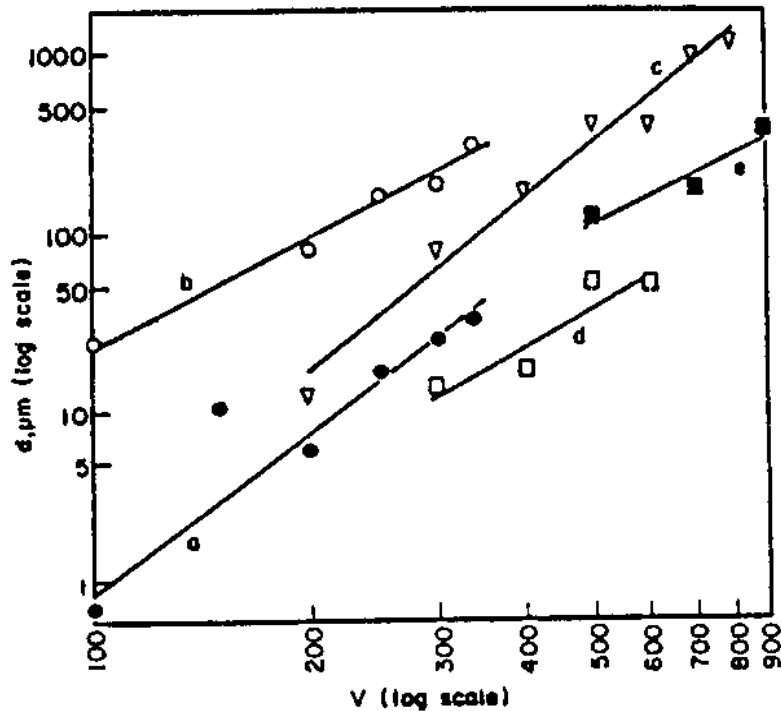
1. מערכת שתי סיכות: שדה חשמלי נוצר בין שתי האלקטרודות כאשר אחת מהן כוסתה בגרגרי אבקה. האלקטרודות קורבו זו לזו עד לקפיצת הגרגר הראשון. נבדקו הערכים עבור גרגרי אבקה השטופים בכלורופורם להסרת המעטה השומני (גרף a בציור מס' 2.5) ועבור גרגרי אבקה לא שטופים (גרף b ציור מס' 2.5). הגרגר הראשון שקפץ לאלקטרודה הנגדית וקיבל את מטענה חזר לאלקטרודה הראשונה וחוזר חלילה. מן הניסוי עולה כי קיים הבדל גדול בין גרגרים שטופים וכאלה שאינם שטופים בכלורופורם.

2. מערכת זיר - דבורת דמה: הדבורה נבנתה מאטב נייר מכוסה ברצועות נחושת המצופה בדונג. הזיר הוצמד לאלקטרודה המוארקה ודבורת הדמה חוברה לאלקטרודה השנייה. דבורת הדמה קורבה אל הזיר עד שגרגרים קפצו ממנו אל הדבורה. בניסוי זה הגרגרים אשר ניתרו אל הדבורה נשארו עליה (גרף c ציור מס' 2.5).

3. מערכת דבורת דמה - צלקת: גרגרי האבקה נמרחו על דבורת הדמה, הצלקת הוצמדה לאלקטרודה המוארקה ודבורת הדמה חוברה לאלקטרודה השנייה. גרגרי אבקה ניתקו מן הדבורה אל הצלקת אך ניצפה שחלקם חזרו לדבורת הדמה.

4. ניסויים בדבורים אמיתיות: חוט משי נקשר בציודו האחד לבלוק שעווה ובציודו השני לדבורת בומבוס חיה. גרגרי אבקה הומטרו על הדבורה ונצפו בצורה כזו שניתן היה לעקוב אחר מסלול תנועתם. ניצפה שגרגרים שנעו בקרבת הדבורה שינו את מסלולם ונדבקו לדבורה. בניסוי נוסף דבורת דבש (*Apis mellifera*) הומתה בקור וחברה לאלקטרודה במתח של +750 וולט. אלקטרודה שנייה הוארקה וחברה לזיר, המרחק בין הדבורה לזיר שונה באיטיות. גרגרי האבקה החלו לקפוץ אל הדבורה כאשר המרחק הממוצע היה 630 מיקרון. כאשר מתח האלקטרודה שונה ל+500 וולט הגרגרים ניתרו במרחק ממוצע של 203 מיקרון. כאשר חזרו על הניסוי אך הפעם הדבורה כוסתה

בגרגרים ופוטנציאל האלקטרודה היה +750 וולט, גרגרי האבקה החלו לנתר ממנה אל האלקטרודה המוארכת במרחק ממוצע של 376 מיקרון.



ציור מס' 2.5: המרחק המינימלי כנגד הפוטנציאל החשמלי עבור ניתוק גרגר ראשון בין שתי אלקטרודות. האותיות מתארות את הניסויים השונים, a - מערכת פין / פין עבור גרגרים שטופים בכלורופורם, b - מערכת פין / פין עבור גרגרים לא שטופים, c - מערכת זיר / דבורת דמה, d - מערכת דבורת דמה / צלקת, e - ניסויים בדבורים אמיתיות. מתוך (Corbet et al. 1982).

Fig 2.5: The minimal distance vs. electric potential for depart of first grain between 2 electrodes. The letters represent the difference experiments, a - pin/pin system with chloroform washed grains, b - pin/pin system for unwashed grains, c - anther/dummy bee system, d - dummy bee/stigma system, e - experiments with real bees. From (Corbet et al. 1982).

שוורץ (1992) ערך ניסוי למדידת הכוח האלקטרוסטטי המינימלי הדרוש לשם ניתוק גרגרי אבקה פירחי אבוקדו ואקליפטוס. הניסוי כלל מספר מקרים.

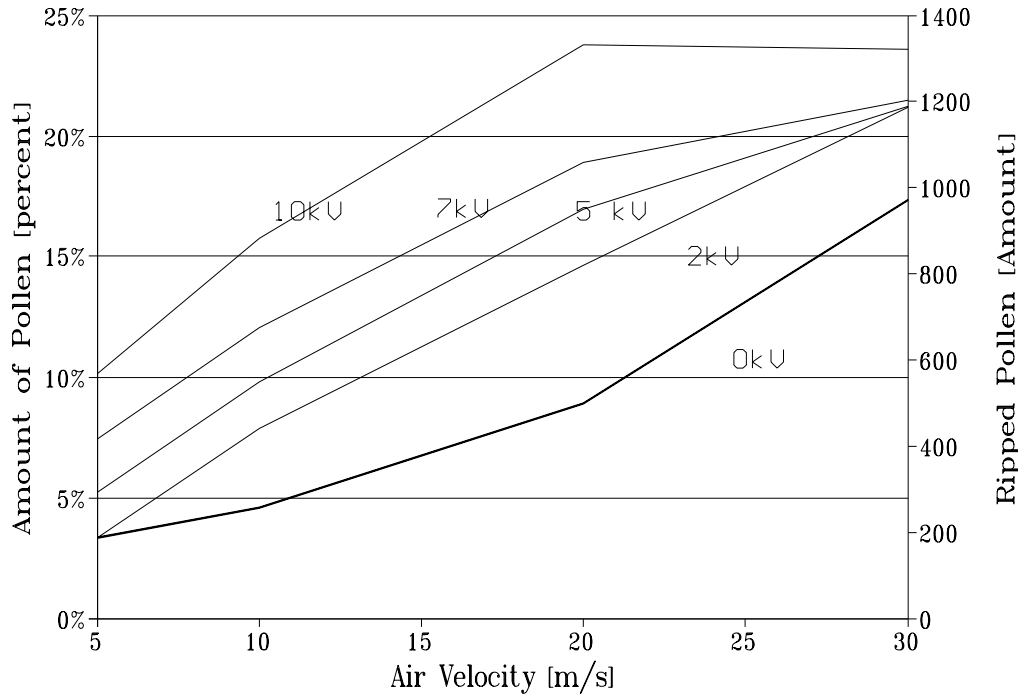
1. ניתוק גרגרי אבקה באמצעות שדה חשמלי קבוע (DC): במערכת זו הוכנס פרח מוארק לתוך שדה חשמלי שהושרה על ידי פלטת נחושת המחוברת לספק מתח גבוה (1 עד 30 kV). הפוטנציאל הוגבר עד שגרגרי האבקה החלו להינתק מן המאבק. הפוטנציאל החשמלי והמרחק נרשמו בכדי לחשב את כוח הניתוק בעזרת טכניקת "הדמיה רציפה". בטבלה 2.2 מופיעים הערכים לכוח הניתוק.

טבלה 2.2: הכוח המינימלי ב-pN הדרוש לניתוק גרגרי אבקה בעזרת כוחות אלקטרוסטטיים

Table 2.2: The minimal force in pN require to depart pollen grains with electrostatic forces

	Average	Standard deviation	L.C 95%
Avocado	351	196	383 - 318
Eucalyptus	458	208	535 - 380

2. ניתוק גרגרי אבקה באמצעות שדה חשמלי קבוע (DC), משולב בזרימת אוויר: הוכנס פרח מוארק לתעלת אוויר סגורה בממדים 80X5X4 ס"מ. בתעלה הזורם אוויר במהירויות שונות שנמדדו במשך כל הניסוי בעזרת אנמומטר. פלטת נחושת שהוצמדה לדופן התעלה סיפקה שדה חשמלי קבוע בסביבת הפרח. איסוף הגרגרים בוצע על ידי פלטה משומנת שמוקמה בקצה התעלה. בציור מס' 2.6 ניתן לראות שעם העלייה בפוטנציאל הפלטה ובמהירות הרוח מספר הגרגרים הנאסף מן הפרח גדל.



ציור מס' 2.6: ניתוק גרגרי אבקה פירחי אבוקדו כתלות בפוטנציאל החשמלי ומהירות האוויר. מתוך (שוורץ 1992).

Fig 2.6: Avocado Pollen grains departing due to electric potential and air velocity. From (שוורץ 1992).

## 2.2.5 מנגנון הטעינה החשמלית בבעלי חיים

המנגנון העיקרי להיטענות בעלי חיים יבשתיים במטען חשמלי הינה מן האוויר. בעל חיים הנע בתווך של יונים גורם להיצמדותם אליו ועקב כך צובר מטען על גופו (Warnke 1976). ציפור או חרק הנעים ללא נפנוף הכנפיים יוצרים זרימת אוויר למינרית סביבם, במצב זה זרימת האוויר בצמוד לגוף איטית, השפעת החיכוך על נפח אוויר קטן וכמות היונים הנעים בקרבת הגוף ונצמדים אליו הינה מועטה ולכן טעינה כמעט ואינה מתרחשת. כאשר התנועה כוללת נפנוף, נוצרת זרימה טורבולנטית וטורבולנציה סביב הכנפיים, זרימת האוויר בלתי סדירה ונוצר ערבוב של שכבות אוויר שונות הגורם להתנגשויות רבות בין היונים באוויר לבין כנפי הציפור או החרק. עוצמת השדה החשמלי שנוצרת תלויה בתדר הנפנוף ובשטח הכנף עליו מתקיימת זרימה טורבולנטית. בניסויים שנערכו במנהרת רוח מתכתית, ציפורים וחרקים שהוכנסו למנהרה לא נטענו במטען חשמלי במהלך מעופם מאחר שהחלקיקים הטעונים באוויר התפרקו על קירות

המנהרה המתכתיים בעוד שבמנהרת רוח הבנויה ברובה מעץ נצפתה טעינה אשר השתנתה בהתאם לתדר פירפור הכנפיים.

Erickson (1975) ביצע ניסויים למדידת הפוטנציאל החשמלי בדבורים. על מספר כוורות נבנו כניסות גליליות בעלות מעטפת העשויה משלוש שכבות (נחושת - זכוכית - נחושת) במבנה של קבל גלילי כאשר השכבה החיצונית מוארקה. דבורה היוצאת או נכנסת לכוורת נוגעת בשכבה הפנימית ומעבירה לה את מטענה. התוצאות שהתקבלו הראו שהפרש הפוטנציאלים המרבי עבור דבורה החוזרת לכוורת היה  $1.8+$  וולט, בעוד שדבורה היוצאת מן הכוורת אינה נושאת מטען אלקטרוסטטי.

Yes'kov (1976) מדד את המטען על גבי דבורים בעזרת אלקטרומטר שנבנה במיוחד. חיישן האלקטרומטר שהוצמד לדבורה לשם מדידה הורכב מפתיליה מורטבת בתמיסה מלחית. התוצאות הראו שהמטען הממוצע של דבורה החוזרת לכוורת בעת ביצוע ריקוד השמיניות היה  $45$  pC. העלייה בלחות היחסית גורמת לירידת המטען בדבורה. משך זמן המעוף אינו משפיע על כמות המטען הנצבר בדבורה.

שוורץ (1992) ערך ניסויים לחישוב המטען החשמלי שעל דבורים במעופן ולהבנת מנגנון הטעינה. בניסוי ראשון דבורים נקשרו לחוט כותנה באורך  $30$  ס"מ ולאחר מעוף של  $3$  דקות במעגלים נוטה הדבורה למיקום ניח במרחק  $3$  מ"מ מחיישן מד שדה וערכו של השדה החשמלי נירשם. ניסוי שני נערך בדבורים פסיביות אשר מעופן נגרם על ידי מנוע חשמלי קטן שחובר לקצה החוט. בניסוי הראשון הדבורה עופפה בצורה טבעית באמצעות תנועת כנפיה. השדה החשמלי שנמדד עבור הדבורים הפעילות היה בממוצע  $3.74$  kV/m והמטען החשמלי הממוצע שחושב היה  $22.9$  pC. הדבורים הפסיביות לא צברו מטען במהלך מעופן. מסקנתו היתה כי המטען הנצבר על הדבורה מושפע ישירות מתנועת הכנפיים.

### 2.2.6 השפעת שדה חשמלי ומטען על דבורים

החוקר Warnke (1976) מציין במאמרו כי ניתן לחלק את גוף הדבורה לשניים מבחינה אלקטרוסטטית: הממברנות המראות שינוי גדול במתח בעוד החלקים האחרים בעלי מתח נמוך מ- $1V$ . קוטביות המשושים יכולה להשתנות בפחות משניה, ויתכן שיש לה תפקיד בהתמצאות ובניווט מאחר והשינוי מתרחש בעיקר לפני ההמראה. כמות המטען החשמלי על דבורה המנפנת בכנפיה תלוי במספר היונים ליחידת נפח של אוויר. מוליכות הקוטיקולה משתנה עם החשיפה לאור וניסויים מצביעים על תופעה פוטואלקטרית, פליטת אלקטרונים עקב חשיפה לקרינת אור. ככל שהסביבה יותר לחה היטענות הדבורה יורדת עקב התפרקות הנובעת מאליה במוליכות החשמלית של האוויר.

### 2.2.7 טכניקות טעינה אלקטרוסטטית

כיום משתמשים בשלוש טכניקות עיקריות לריסוס טיפות ואבקה בתעשייה ובחקלאות. השימושים העיקריים הינם צביעת משטחים כגון חלקי מכוניות, מקררים, תנורים וכיסוי נוף צמחי בחומרים להדברת מזיקים.

#### טעינת השראה (Induction charging)

טעינת השראה מתרחשת כאשר גוף או תווך נוזלי ומוארק נמצאים בקרבת אלקטרודת מתח גבוה. בכדי לשמור על פוטנציאל אפס בגוף המוארק, מטענים בעלי סימן מנוגד לאלה שעל האלקטרודה יזרמו מן האדמה אל קצה הגוף המוארק. החוקר Law (1978) פיתח מתקן המרסס טיפות טעונות בשיטה זו, הנוזל המוארק עובר דרך אלקטרודת מתח גבוה ומיד אחריו מרוסק לטיפות שבהן נותרו מטענים המוסעות אל המטרה. השיטה מתאימה במיוחד עבור ריסוס טיפות אך ניתן לטעון בה גם גרגרים (Cho 1964).

#### טעינת Corona

בטעינת קורונה נוצר ענן מעורב של יונים וגרגרים או טיפות טעונות הנע אל עבר המטרה. מנגנון הטעינה הינו: אלקטרודת מתח גבוה גורמת לינון האוויר סביבה, היונים נצמדים לטיפות התרסיס או גרגרי האבקה ומטעינים אותם עד אשר מטען החלקיקים הטעונים גדול דיו בכדי לגרום לדחיית היונים שבאוויר. בתחום זה נעשו מספר עבודות לחישוב וכימות המטען המרבי הנרכש על ידי גרגר או טיפה ומשך זמן היטענותו (Cobine 1958, Bright et al 1978).

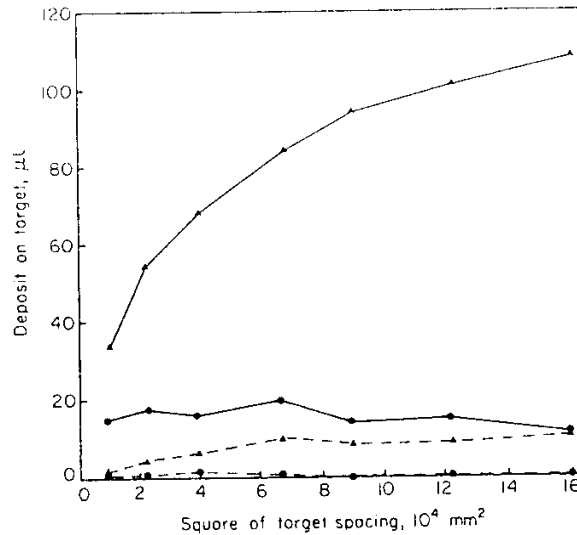
#### טעינת חיכוך (Tribo charging)

טעינת Tribo קורת כאשר חומר אחד מתחכך בחומר אחר או בעצמו ועקב כך נקרעים ממנו או מצטרפים אליו אלקטרונים המשנים את מטענו החשמלי. החוקרים Gan-Mor וחבריו (1995) מצאו כי פירפור כנפי דבורת הדבש גורם לטעינתה במטען חיובי הנגרם כנראה עקב קריעת אלקטרונים מכנפיה ומגופה אל האוויר שסביבה. במחקרם של Banerjee ו-Law (1995) נמצא כי גרגרי אבקת פרחים נטענים במטען חיובי בעברם בצינור טפלון ובמטען שלילי בעברם דרך צינור ניילון.

### **2.2.8 ניסויים בריסוס אלקטרוסטטי של טיפות**

בריסוס של חומרים הטעונים חשמלית הכוחות האלקטרוסטטיים משפרים את אחידות התרסיס את יעילות העברת המסה ואת כמות החומר המורבץ בהשוואה למקרה של ריסוס ללא טעינה אלקטרוסטטית (Cooper and Law 1990). בניסויים שנערכו נמצא כי גורם רב חשיבות בריסוס אלקטרוסטטי הוא יחס המסה/מטען אשר מושפע מפוטנציאל האלקטרודה, מרחקה זווית הנחיר, קוטרו והלחץ (Marchant 1985). Lake (1988) ערך ניסויים להשוואה בין ריסוס אלקטרוסטטי לריסוס ללא אלקטרוסטטיקה. הניסוי בוצע במנהרת רוח, בעזרת מרסס סובב אשר ריסס טיפות מים המכילות טרייסר פלורסנטי על מטרות דיסקה אופקיות. נבדקו ההבדלים בהרצת התרסיס במהירויות רוח שונות, מרחק שונה בין המטרות ובטעינה אלקטרוסטטית של הטיפות בפוטנציאל של 5 kV ובלעדיה. התוצאות מראות שטעינת הטיפות מגבירה את ההרצת

על המטרות בכל מצב ובמיוחד כאשר אין רוח (ציור מס' 2.8) וכאשר המטרות מופרדות זו מזו. ככל שהמרחק בין הדסקיות גדל כן גדלה הכמות המורבצת בחלק התחתון של המטרות. כאשר אין רוח, ההרבעה הכללית בתרסיס טעון גדלה עם הגדלת המרחק בין המטרות, בעוד שבתרסיס לא טעון אין הבדל (ציור מס' 2.8).

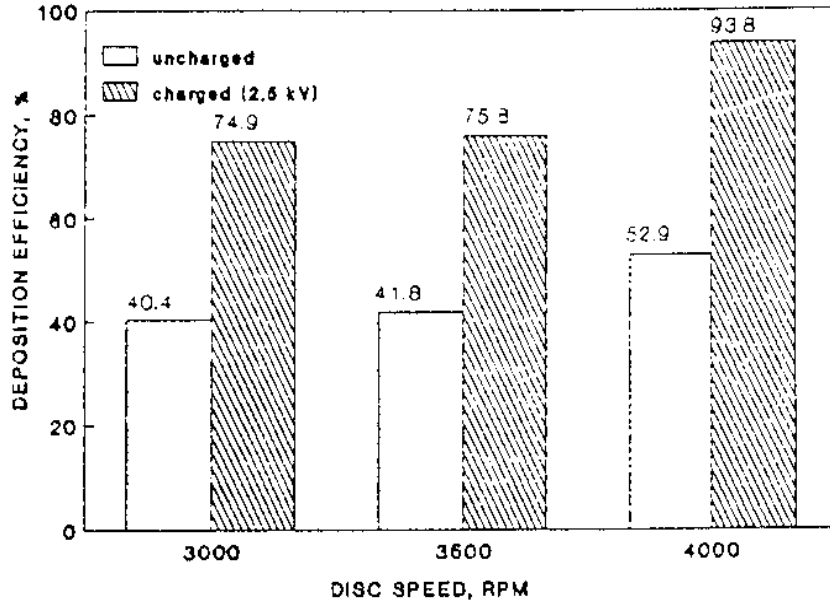


Effect of target spacing in still air.  $\blacktriangle$ — $\blacktriangle$ , charged spray, upper disc surfaces;  $\bullet$ — $\bullet$ , uncharged spray, upper disc surfaces;  $\blacktriangle$ — $\blacktriangle$ , charged spray, lower disc surfaces;  $\bullet$ — $\bullet$ , uncharged spray, lower disc surfaces

ציור מס' 2.8 : כמות הרבצת הטיפות כנגד ריבוע הרווחים בין המטרות בריסוס ללא רוח. מתוך (Lake 1988).

Fig 2.8: Deposition of droplets vs. square of target spacing in still air spraying. From (Lake 1988).

החוקרים Gupta ו-Dante (1991) מצאו כי בריסוס של טיפות מים בריכוז של 2% טרייסר פלורסנטי יחס המטען האלקטרוסטטי למסה גדל עם הקטנת הספיקה המסית והסל"ד. בריסוס על צמח מלאכותי עם העלייה במתח רמת הכיסוי גדלה לכל אורך הצמח למרות שבחלקו העליון הוא ספג כמות גבוהה יותר מאשר בחלקים הנמוכים. כמות החומר המורבץ גדלה פי 1.5 עד 2 בריסוס טעון לעומת ריסוס לא טעון עבור מהירויות סיבוב וספיקה שונות (ציור מס' 2.9).



ציור מס' 2.9: יעילות ההרבעה כנגד מספר הסל"ד במרסס דיסק עבור טיפות טעונות ובלתי טעונות במטען אלקטרוסטטי. מתוך (Gupta and Dante 1991).  
 Fig 2.9: The deposition efficiency vs. disk speed for electrostatic and not electrostatic charged drops. From (Gupta and Dante 1991).

## 2.3 שיטות ומודלים לחיזוי ומציאת השפעות ומאפיינים אלקטרוסטטיים בריסוס והאבקה

### 2.3.1 שיטות למדידת המטען החשמלי ומהירות חלקיקי תרסיס וגרגרי אבקה

חישת המעבר של חלקיקים זעירים דרושה בתחומים רבים במחקר החקלאי וביישומים טכניים. בלימודים אווירודינמיים פותח תהליך אשר חישב את משך הזמן הדרוש לגרגר בעל צורה אי רגולרית ליפול במרחק נתון. כאשר גוף טעון מובא לקרבת אלקטרודה מוארקת, מטען מסוים זורם מן האדמה אל האלקטרודה בכדי שהאלקטרודה תישאר בפוטנציאל אפס בנוכחות הגוף הטעון. המטען המושרה,  $Q$  יהיה שווה למטען הגוף במידה ואין גופים משפיעים בסביבה, אחרת המטען  $Q$  יהיה שונה ממטען הגוף. חלקיק טעון שלילי העובר דרך אלקטרודת טבעת מוארקת יוצר בה זרם חשמלי (ציור מס' 2.10 א) שנוסחתו:

$$i(t) = -\frac{Cq \cdot v^2 t}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{(r^2 + v^2 t^2)^{-3/2}} \quad [2.13]$$



כאשר

C - קיבול המערכת

q - מטען החלקיק

v - מהירות החלקיק

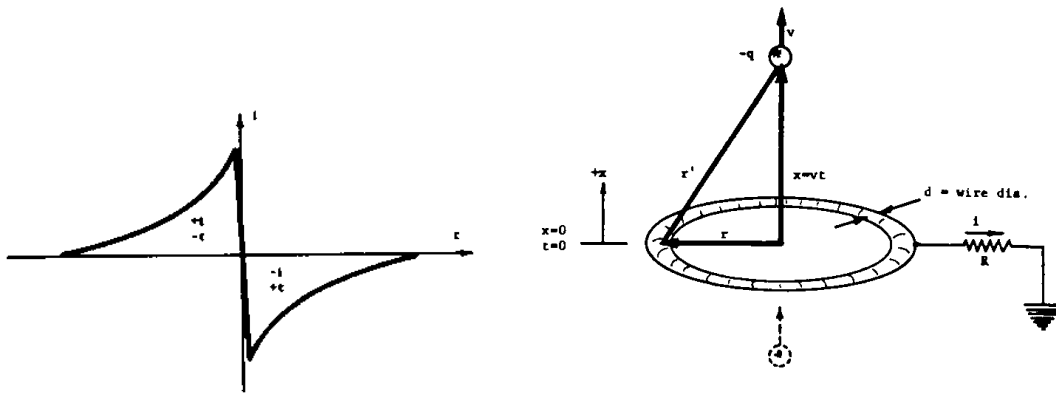
r - רדיוס הטבעת

t - הזמן.

ערכו המרבי של הזרם החשמלי בטבעת יהיה  $i_{\text{peak}} = 0.031 \cdot Cqv/r^2 \varepsilon$  כאשר הזמן  $t_{\text{peak}} = \pm 0.707 r/v$  (ציור מס' 2.10 ב).

(ב)

(א)



ציור מס' 2.10: תאור סכימתי של חלקיק טעון העובר דרך אלקטרודת טבעת מוארקת (א), והזרם העובר דרכה כתלות בזמן (ב).

Fig 2.10: Schematic description of charged particle moving through grounded ring electrode (A), and the current vs. time (B).

החוקר Law (1975) ערך ניסוי למדידת המהירות והמטען של חלקיקים טעונים. מערכת הניסוי כללה ספק כוח, מטען, אוסילוסקופ, אלקטרומטר, שתי אלקטרודות טבעתיות, מסוככות בכדי למנוע השפעה מן הסביבה, וכלוב פרדיי אשר קלט את החלקיקים (ציור מס' 2.11). החלקיק הנמדד נטען ועבר דרך שתי הטבעות. השינויים בזרם נרשמו והחלקיק נקלט במטרה. מהירות החלקיק חושבה בהתאם להפרש הזמן בו נרשמו שינויי הזרם בשתי הטבעות ומטען החלקיק חושב על סמך עוצמת הזרם שנמדדה.

החוקר Vercoulen וחבריו (1991) ערכו ניסויים דומים למדידת המהירות והמטען של חלקיקים טעונים. אך בעבודתם נבדקו שינויי המתח. מטען החלקיק חושב לפי נוסחת שינוי המתח של מכשיר מדידה עם התנגדות R וקיבוליות C לתנועת גוף טעון לאורך טבעת מוליכה:

$$u(t) = \frac{CC_r}{C + C_r} R \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \frac{-v^2 t}{(v^2 t^2 + r^2)^{1.5}} \quad [2.14]$$

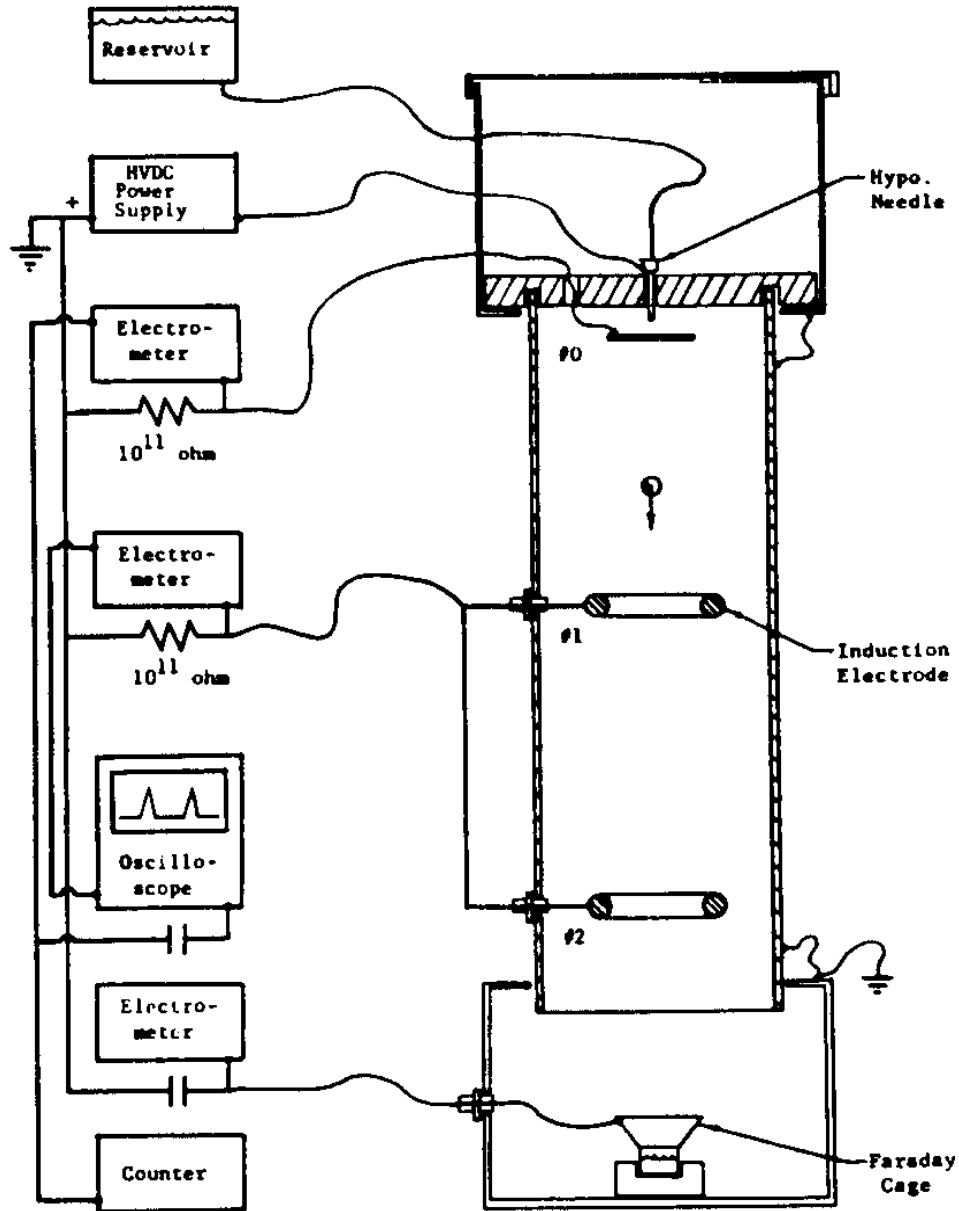
כאשר

C - קיבוליות מכשיר המדידה

-Cr קיבוליות הטבעת

q - מטען הגוף הטעון.

הניסויים בוצעו על חרוזי זכוכית בגדלים 200-3000 מיקרון, טיפות מים וגרגרי אבקת פירחי Dactylis ו-Betula (Vercoulen 1992).



ציור מס' 2.11: מערכת הניסוי למדידת המטען על חלקיק.

Fig 2.11: Experiment system for measuring the charge on particle.

במאמרו של Cho (1964) המתייחס לטעינת גרגרים מוליכים ומבודדים בקוטר 0.6 עד 30 מיקרון התקבל כי השדה החשמלי הממוצע על פני חלקיק כדורי גדול ב-65% מהשדה המשרה ולכן, לפי מטען נקודתי המרגיש שדה ממוצע של  $E_0 \cdot 1.65$  נוכל לומר כי המטען על החלקיק יהיה:

$$Q = 1.65 \cdot 4\pi\epsilon_0 r_p^2 E_0 \quad [2.15]$$

כאשר

$r_p$  - רדיוס החלקיק [m].

$E_0$  - השדה החשמלי המשרה [V/m].

$\epsilon_0$  - מקדם הרשיות של וואקום [f/m].

חלק מן האקדחים האלקטרוסטטיים לריסוס טוענים את האבקה או הטיפות בהשפעת יוניזציה (corona). אלקטרודת מתח גבוה מייננת את האוויר המקיף אותה, היונים נצמדים לטיפות או לחלקיקים ומטעינים אותם עד שהכוח הקולוני גדול מספיק להסטת יונים ממסלול ההתנגשות. לפי Pauthenier וחובריו (1932) המטען המקסימלי הנצבר על ידי גרגר כדורי הנמצא בשדה חשמלי יהיה:

$$Q = 4\pi\epsilon_0 r_p^2 B E_0 \quad [2.16]$$

$$B = 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \quad [2.17]$$

כאשר  $\epsilon_r$  היא הרשיות היחסית. ערכו של B עבור חומרים מבודדים הינו 1.5 ועבור מוליכים 3.

### 2.3.2 שיטות מתמטיות ונומריות לחישוב פרמטרים אלקטרוסטטיים במערכות מורכבות

מצב אלקטרוסטטי טהור לא קיים במציאות משום שהמטענים באים והולכים במהלך הזמן בבעיה, אך אם המוליכות שואפת לאפס בכל מקום אזי פתרון אלקטרוסטטי הינו מספיק ונכון לחלוטין. השדה החשמלי E יכול להימצא על ידי כל פתרון אלקטרוסטטי אם המתח והמטענים הקיימים באותו הרגע נתונים. אם המוליכות אינה אפס הפתרון האלקטרוסטטי יכול להיות לא מדויק. השדה החשמלי קשור במוליכות אם זמן הרילקסציה  $\epsilon/\sigma$  אינו גדול מזמן ההיטענות (Brauer 1989).

בעיות אלקטרוסטטיות ואלקטרומגנטיות מתחלקות לשתי קבוצות עיקריות, דטרמיניסטיות ובעיות ערכים עצמיים אליהן שייכים הפתרונות האנליטיים והמקרים הפרטיים. השיטות הנומריות לפתרון מתחלקות לשלוש קבוצות, בראשונה הפתרון ניתן באופן כמותי בנקודות דיסקרטיות המשמשות צמתים ועליה נמנת שיטת הפרשים הסופיים וקרוביה. השנייה נותנת את הפתרון כאוסף של ביטויים שכל אחד מהם מתאים לאזור מסוים כדוגמת שיטת האלמנטים הסופיים. הקבוצה השלישית נותנת את הפתרון בצורה של סדרות סופיות, התקפות בכל האזור שבו הפתרון דרוש ואליה משתייכות שיטות ה- least squares boundary residual, שיטת גלארקין ושיטת גלארקין-ריץ (Jovicevic and Stankovic 1990).

המודלים פותחו בכדי למצוא את הפרמטרים, להבהיר את המכניזם להסעת והרבצת תרסיס טעון ובכדי לקבל הערכה ללא הצורך בעריכת ניסויים רבים לבעיות קבועות או דומות. בכל

המודלים לריסוס והרבצה אלקטרוסטטיים, גודל הטיפה ויחס המטען למסה הם הגורמים המשפיעים ביותר על הרבצת התרסיס.

### שיטת אלמנטים סופיים

בשיטה זו אזור הבעיה מחולק לאלמנטים כאשר בכל אלמנט מוגדרים מספר צמתים, תנאי השפה של הבעיה מתורגמים לצמתים המתאימים והמשוואות השולטות שהותאמו לפתרון בשיטה זו, מיושמות בכל האלמנטים. חיבור כל האלמנטים הסופיים ייתן המשוואה המטריצית:

$$[K]\{\Psi\} = \{\rho\} \quad [2.18]$$

כאשר  $K$  הינה מטריצת ה"קשיחות" הנתונה,  $\Psi$  ווקטור הפוטנציאל ו- $\rho$  ווקטור צפיפות המטען אשר נעלמים בחלקם. המשוואה השלטת בבעיות אלקטרוסטטיקה ובבעיות מעבר חום היא משוואת פואסון אשר יושמה בתורת אלמנטים סופיים ברוב התוכנות עבור פתרון בעיות מעבר חום. על ידי המרת יחידות פשוטה ניתן לפתור בעיה אלקטרוסטטית בעזרת תוכנות אלו.

המשוואה השלטת בבעיות מעבר חום דו ממדיות ניראת כך:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q + \gamma \chi \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.19]$$

כאשר  $T$  הינה הטמפרטורה.

$k$  - מקדם הולכת החום.

$q$  - שטף החום ליחידת נפח.

$\gamma$  - הצפיפות המקומית.

$\chi$  - מקדם החום הסגולי.

$t$  - הזמן.

בשימוש במשוואות מקסוול לאלקטרוסטטיקה דיברגנט צפיפות השטף החשמלי  $D$  שווה לצפיפות המטען  $\rho$  כך:  $\nabla \cdot D = \rho$ . בתווד ליניארי ואיזוטרופי  $D = \epsilon E$ , כאשר  $E$  הוא עוצמת השדה החשמלי ומאחר ו-  $E = -\nabla V$  המשוואה יכולה להיכתב כך:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho \quad [2.20]$$

זו למעשה משוואת מעבר החום הקבועה בזמן כאשר הטמפרטורה  $T$  מוחלפת על ידי המתח  $V$ , מקדם הולכת החום  $k$  מוחלף על ידי מקדם הרשיות  $\epsilon$  ושטף החום ליחידת שטח  $q$  מוחלף על ידי צפיפות המטען  $\rho$ . בבדיקת היחידות נראה שיש החלפה בין מעלות חום לוולטים ובין ווטים וקולונים. אנלוגיה פשוטה זו מאפשרת לנו להשתמש בתוכניות המחשב הפשוטות למעבר חום תוך שינוי ביחידות בלבד, בהגדרות ובפרוש התוצאות. שינוי זה מאפשר פתרון טוב לתיאור קווים שווי פוטנציאל ולצפיפות השטף (Stremmer 1990).

מודלים מתמטיים לחישוב פרמטרים בריסוס אלקטרוסטטי

החוקרים Dix ו-Marchant (1984) פיתחו מודל מתמטי איטרטיבי להסעת תרסיס טעון המחשב את השדה החשמלי על ידי ענן התרסיס הטעון, ואת ההשפעות על מסלול הטיפות. המודל מורכב משני חלקים, החלק הראשון בתחום שבין המרסס וצמרות הצמחים והשני בתוך סבך הצמחייה. המודל מתאר התנהגות תרסיס הנוצר במרסס דיסקה סובבת אך מוגבל למצבים בהם המהירות ההתחלתית אופקית בלבד. עבור שני חלקי המודל נמצאו ביטויים חסרי ממד בכדי לתאר את התנהגות התרסיס פרופורציונלית למהירות הטיפה ההתחלתית, ליחס מטען/מסה ולמתח האלקטרודה. נמצא שיחס מטען/מסה הוא החשוב ביותר בהגדרת התנהגות התרסיס. המודל בתוך הסבך הוא דו ממדי, מסלולי הטיפות מושפעים מכוחות הגרר המחושבים על ידי חוק סטוקס וכוחות אלקטרוסטטיים הנקבעים על ידי השדה החשמלי ומטען הטיפה. השדה החשמלי נובע מהאלקטרודה והמטענים בטיפות עצמן ומחושב מפתרון משוואת פואסון בטכניקת הפרשים סופיים. נמצא כי זמן הרילקסציה שבו הטיפה מגיעה למנוחה הינו  $\tau = 18\rho d^2/\mu$ . התנהגות התרסיס מעל לסבך הינה פונקציה של מקדם הרשיות  $\epsilon_0$ . שטף המסה, מקדם הגרביטציה, יחס המסה/מטען, זמן הרילקסציה, מהירות תנועת המרסס וגובהו ומהירות הטיפות במרסס ובכניסה לסבך.

המודל של Lake ו-Marchant (1984) מבוסס על מקרה של תרסיס הנופל אנכית לאזור התחום בין שני לוחות אנכיים. המודל פותח במקביל למדידות הרבצת תרסיס על מטרות מלאכותיות ביבול שעורה. מכיוון שהגיאומטריה של הצמח מסובכת וקשה למידול, נעשתה הצגה פשוטה שבה פלטה מוארכת יוצגה כשורת המטרות המאונכות ופלטה נוספת ייצגה את שורת השעורה. למרות שנעשו הנחות רבות ניתן להשתמש במודל לקבלת סדר הגודל של הכמות המורבצת במצבים יותר מורכבים. המודל התבסס על משוואות אלקטרוסטטיות ומשוואות זרימה (Lake 1988). משוואת

$$\text{פואסון שולטת בשדה החשמלי ובמקרה זה: } \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{ולאחר אינטגרציה:}$$

$$E = \left( \frac{\rho x}{\epsilon_0} \right) + C \quad [2.21]$$

כאשר הכוח החשמלי הפועל על הטיפה יהיה  $EQ$ . בהנחה שגרר האוויר מתנהג לפי חוק סטוקס הגרר יהיה  $D = 3\pi\mu dU_h$  נגד כיוון התנועה,  $U_h$ . ניתן לכתוב את פתרון המשוואה המקורבת:

$$X = \frac{afq^2}{2h\epsilon_0} \frac{Y^2}{U_v^2} \quad [2.22]$$

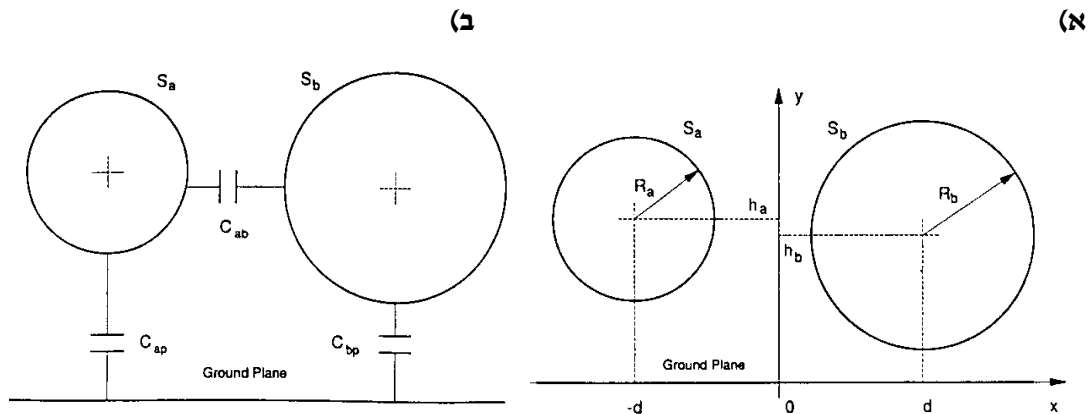
אם  $Y$  מוגדר כגובה המטרה האנכית, כמות התרסיס המורבצת על המטרה ליחידת אורך היא :

$$2fX = \frac{a}{h\epsilon_0} \left( \frac{fqY}{U_v} \right)^2 \quad [2.23]$$

בניסויים מאוחרים שנערכו בעזרת מרסס דיסק סובב התקבלו תוצאות שונות מאשר במודל במהירויות סיבוב של 2000 ו-4000 סל"ד (Hadfield 1987).

#### שיטה לקביעת פרמטרים חשמליים בתצורות רבות גופים

שיטה זו יכולה לשמש כמודל למצב שבו גרגרי אבקה או טיפות תרסיס מתקרבים לצמח מוארק. החוקר Kucerovsky וחבריו (1992) פיתחו מודל לחישוב הפרמטרים של בעיית שני כדורים מעל משטח מוארק. נעשה שימוש בהנחות הבאות: (1) המשטח המוארק והכדורים מוליכים ועל פניהם הפוטנציאל אחיד. (2) הגיאומטריה אינה משתנה במהלך החישוב. (3) פוטנציאל המשטח הינו אפס והכדורים מבודדים זה מזה ומהמשטח. (4) משיקולי סימטריה הכדורים מוחלפים בשני גלילים (ציור מס' 2.12 א). במודל הכדורים מחוברים זה לזה בקבל וכן כל כדור מחובר למשטח בקבל (ציור מס' 2.12 ב). מוצאים את קיבול שלושת הקבלים על ידי כך שמניחים שהמטען בכדור I הוא אפס ובכדור II הוא 1 ובמקביל מניחים שהמטען בכדור II הוא אפס ובכדור I הוא 1. חישוב הפרמטרים של הבעיה מתבצע בשיטת Electrostatic images. לאחר חישוב הקיבולים ההתחלתיים מקבלים רשימה של מטענים לכדור I ומהם רשימה של מטענים מדומים, באופן דומה מקבלים גם עבור כדור II, המטענים משפיעים על המשטח וחוזר חלילה עד להתכנסות.



ציור מס' 2.12: בעיית שני כדורים מעל משטח מוארק (א) ומודל חשמלי של אותה הבעיה (ב).  
Fig 2.12: Two spheres and grounded surface problem (A) and the electrical model of it (B).

טכניקת הדמיה (Corson et al. 1962)

בטכניקה זו משתמשים בהתמרת שדה חשמלי מורכב לשדה אקוויולנטי הפשוט יותר לחישוב. הטכניקה יעילה במיוחד עבור מטענים נקודתיים הממוקמים בקרבת מוליכים. המוליכים שבמערכת מוחלפים על ידי מטענים נקודתיים, כך שהמשטחים שווי הפוטנציאל נשארים כפי שהיו בבעיה. תנאי הגבול אינם משתנים ולכן השדה החשמלי מחוץ למוליכים זהה לזה שבבעיה. פיתוח נוסף של שיטה זו היא טכניקת ה- Images by Successive Approximations שבה

משתמשים בפתרונות שיטת ההדמיה כבסיס לפתרון בעיות מורכבות יותר. טכניקה זו מתקדמת בצעדים כאשר כל צעד פותר חלק ממרחב הבעיה אך מסיט את הפתרון סביב גורמים אחרים במערכת והצעד שאחריו מתקן זאת. הפתרון מתקדם עד להתכנסות לדיוק הרצוי.

## 2.4 סיכום

מתוך הסקר הספרותי עולה כי :

- תהליך ההאבקה הינו שלב במחזור החיים של הצמח ותפקידו העברת גרגרי אבקת פרחים מן האבקנים אל הצלקות.
- במקרים רבים נעשה שימוש בדבורת הדבש להאבקה אך הדבר אפשרי במספר גידולים בודדים בלבד, ויעילות הדבורה מושפעת מתנאי מזג האוויר, תנאי הסביבה ו"נורמות התנהגותיות" מסוימות.
- האבקה מלאכותית מיושמת בכדי להגדיל את כמות היבול ואיכותו או כאשר ההאבקה הטבעית אינה מספקת ומתאימה. עם זאת ההאבקה המלאכותית לוקה בעלות גבוהה, עבודת ידיים רבה, וטיפול אישי בכל פרח בחלק מן המקרים.
- ניתוח תהליך ההאבקה המלאכותית באופן הנדסי מראה כי התהליך מורכב משלושה שלבים : (א) שחרור גרגרי האבקה מאבקני הפרח ואיסופם. (ב) אחסון האבקה ושינועה לאמצעי ההאבקה. (ג) פיזור גרגרי האבקה והיקלטותם בצלקת.
- במחקרים רבים שבוצעו בדבורים וגרגרי אבקה נמצא כי דבורים הנטענות במטען חשמלי במהלך מעופן מצליחות למשוך אליהן גרגרי אבקה ללא מגע פיזי. הועלו השערות כי יתכן ולאלקטרוסטטיקה יש תפקיד בתהליך ההאבקה הטבעית.
- בשנים האחרונות מתפתחת טכנולוגיה של שימוש בכוחות אלקטרוסטטיים במקרים בהם יש לשנע ולהצמיד למטרה מדויקת חלקיקים כמו אבקות וטיפות זעירות. בענף החקלאות יושמה טכנולוגיה זו לתחום של ריסוס חומרי הדברה נגד מזיקים ונעשו מספר עבודות המראות את יתרון הריסוס האלקטרוסטטי על פני הריסוס הרגיל.
- קיימת סבירות גבוהה כי ניתן יהיה לנצל טכנולוגיה זו לפיזור גרגרי אבקה על צלקות פרחים במספר גידולים. יתרון ההאבקה המלאכותית באמצעות טכנולוגיה אלקטרוסטטית תהיה חוסר התלות במאביקים, בתנאי הסביבה, חסכון בידיים עובדות ובכמות האבקה.
- הכלים התאורטיים והנומריים להערכת פרמטרים הנדסיים בשדה אלקטרוסטטי נוסחו במספר עבודות. כמו כן ניסוח הבעיה הספציפית המוצגת בעבודה הנוכחית ודרכי פתרונה ויישומה הנומרי לצורכי העבודה נראת אפשרית.

### פרק 3: מודל ממוחשב לתיאור האבקה אלקטרוסטטית

#### 3.1 אלמנטים סופיים כאמצעי לפתרון בעיה אלקטרוסטטית

הסימולציות במחקר זה בוצעו באמצעות התוכנה המסחרית ANSYS 5.1 במחשב ALFA (DEC 3000) של DIGITAL. התוכנה מבוססת על שיטת אלמנטים סופיים. בשיטה זו המרחב הגיאומטרי של הבעיה מחולק לצורות או גופים הנקראים אלמנטים סופיים. בכל אלמנט מוגדרים מספר צמתים המהווים את קודקודי האלמנט. המשוואות השולטות ברצף (שיוצגו בהמשך) מותאמות לצורת הישוב נומרית לפי עקרונות האלמנטים הסופיים, תנאי השפה של הבעיה הנפתרת באלמנטים סופיים מתורגמים לתנאים בצמתי האלמנטים. חיבור כל האלמנטים נותן את המשוואה המטריצית הבאה:

$$[K]\{\Phi\} = \{\rho\} \quad [3.1]$$

כאשר:  $K$  - הינה מטריצת ה"קשיחות" המבטאת את התכונות הפיסיקליות של החומר,  $\Phi$  - ווקטור הפוטנציאל ו- $\rho$  - ווקטור צפיפות המטען. משוואה 3.1 הינה כללית לפתרון בעיות פוטנציאל. לפרטים נוספים על עקרונות השיטה, במיוחד לשימוש בבעיות חום, פוטנציאל ושדה משמר ניתן למצוא במספר מקורות כגון (1976) Segerling, (1972) Desai & Abel.

השוני בגילום הפתרון לשימושים השונים הינו בהצגת משוואות הרצף. לדוגמה, במעבר חום המשוואה השלטת היא משוואת פואסון. בבעיות מעבר חום דו ממדיות ובלתי קבועות בזמן משוואת השדה תראה כך:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q + \gamma \chi \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.2]$$

כאשר:  $T$  - הטמפרטורה,  $k$  - מקדם הולכת החום,  $q$  - שטף החום ליחידת נפח,  $\gamma$  - הצפיפות המקומית,  $\chi$  - מקדם החום הסגולי ו- $t$  - הזמן. עבור בעיית חום דו ממדית קבועה בזמן המשוואה תראה כך:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q \Rightarrow \nabla^2 T = -\frac{q}{k} \quad [3.3]$$

המשוואות השולטות באלקטרוסטטיקה הינן משוואות מקסוול. במשוואות אלו דיברגנט צפיפות השטף החשמלי  $D$  שווה לצפיפות המטען  $\rho$ :  $\nabla \cdot D = \rho$ . בתווך ליניארי ואיזוטרופי  $D = \epsilon E$ , כאשר  $E$  הוא עוצמת השדה החשמלי ו- $\epsilon$  הוא מקדם הרשיות. מאחר ו- $E = -\nabla V$  משוואת הרצף יכולה להיכתב באופן הבא:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho \quad \Leftrightarrow \quad \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad [3.4]$$

זו למעשה משוואה זהה למשוואת מעבר החום הקבועה בזמן כאשר הטמפרטורה  $T$  מוחלפת על ידי המתח  $V$ . מקדם הולכת החום  $k$  מוחלף על ידי מקדם הרשיות  $\epsilon$  ושטף החום ליחידת שטח  $q$  מוחלף על ידי צפיפות המטען  $\rho$ . בבדיקת היחידות נראה שיש החלפה בין מעלות חום לוולטים ובין ווטים וקולונים. אנלוגיה פשוטה זו מאפשרת לנו להשתמש בהגדרות ובפרוש התוצאות בתוכניות המחשב המסחריות למעבר חום תוך שינוי ביחידות בלבד (Stremmer 1990). בעבודה



הנוכחית בוצעו סימולציות מעבר חום כאשר בעיבוד התוצאות נערכה המרה מתאימה בכדי לקבל פתרון עבור בעיה באלקטרוסטטיקה. בתחילה נפתרו בעיות בעלות פתרון ידוע לשם אימות הסימולציה באמצעות תוכנת האלמנטים הסופיים. בהמשך נבנו מודלים דו ותלת ממדיים עבור דמוי פרח תמר. גאומטריית פרח התמר פשוטה ומודל דמוי הפרח אינו דורש הנחות והזנחות רבות הפוגעות בדיוק הפתרון הנומרי.

### 3.2 בחינת המודל מול פתרונות תאורטיים.

בכדי לבדוק האם התוכנה המסחרית ANSYS 5.1 נותנת פתרונות נכונים עבור הפוטנציאל והשדה חשמלי בעת פתרון בעיות מעבר חום תוך אנלוגיה חשמלית, נבחנה בעיה דו ממדית ובעיה תלת ממדית של פילוג הפוטנציאל והשדה החשמלי בקבל לוחות עבורו יש פתרונות אנליטיים ידועים.

#### הפתרון האנליטי לקבל לוחות אינסופי

הפתרון האנליטי משתמש בחוק גאוס ובחישובי סופרפוזיציה של השדה החשמלי. עבור קבל בעל לוחות בממדי אורך ורוחב אינסופיים, נקבל:

$$E = \begin{cases} 0 & \text{field outside the plates} \\ \frac{\sigma}{\epsilon_0} & \text{field betwin the plates} \end{cases} \quad [3.5]$$

כאשר  $\epsilon_0$  הוא מקדם הרשיות באוויר וערכו

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C}{m \cdot V} \quad [3.6]$$

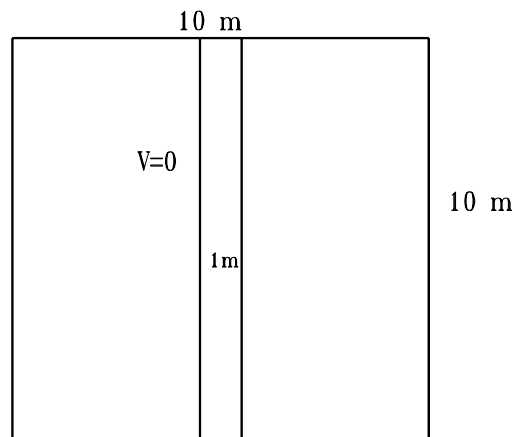
הערך  $\sigma$  הוא גודל צפיפות המטען על הלוחות, על אחד הלוחות סימנו חיובי ועל השני שלילי. בהנחה שהפוטנציאל החשמלי על הלוח השמאלי של הקבל ידוע, הפוטנציאל על הלוח הימני יהיה לפי הקשר הבא:

$$V_R = V_L + d \cdot E \quad [3.7]$$

כאשר  $V_L$  הוא הפוטנציאל בלוח השמאלי,  $-d$  המרחק בין הלוחות ו-  $E$  השדה החשמלי בין הלוחות. בפתרון אנליטי זה, בגלל תנאי האינסופיות לממדים, אין משמעות למרחק בין הלוחות כל עוד הוא ממשי. פתרון קלאסי זה נמצא בספרם של Halliday ו- Resnick (1978).

#### פתרון דו-ממדי של קבל באמצעות אנליזה נומרית ממוחשבת

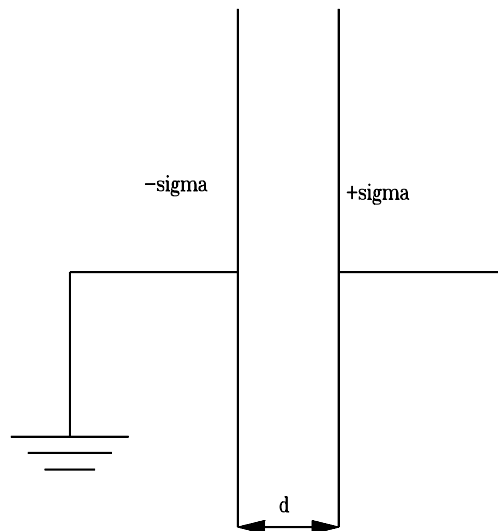
לשם בחינת נכונות הנחות המודל הנומרי, נבחנה בעיית הקבל כפי שהוצגה בפתרון האנליטי. לצורך הסימולציה נבנה מודל נומרי בהנחות הבאות: תחום המודל נקבע לגודל של  $10 \times 10$  מטרים. שני לוחות דו ממדיים במרחק 1 מ' זה מזה נמתחו מהפיאה העליונה של המודל לפיאה התחתונה, בזוית מקבילה (ראה ציור מס' 3.1).



ציור מס' 3.1 : מודל אלמנטים סופיים לקבל דו ממדי.

Fig 3.1: finite elements model for 2D capacitor.

צפיפות המטען על הפאות העליונה והתחתונה נקבעה ל-  $0 \text{ C/m}$  בכדי ליצור באופן תיאורטי אורך לוחות אינסופי. הלוח השמאלי בעל פוטנציאל חשמלי  $0\text{V}$  וצפיפות המטען עליו הינה  $-500 \text{ C/m}$ . על הלוח הימני צפיפות מטען  $+500 \text{ C/m}$  (ציור מס' 3.2). מרחב המודל חולק ל-  $2500$  אלמנטים מרובעים בעלי  $8$  צמתים. מספר דרגות החופש במקרה זה הינו  $7297$ . חלוקת האלמנטים היתה שווה בגודלה מאחר ותרומת כל המרחב היתה חשובה לא פחות מאשר האזור ליד הלוחות. בעיה ספציפית זו לא היוותה קושי בחלוקה לאלמנטים, לכן נותרה צפיפות אלמנטים גבוהה בכל התחום ( $2500$  אלמנטים).



ציור מס' 3.2 : סכימה של קבל דו ממדי.

Fig 3.2: Scheme of 2D capacitor.

עבור מודל הקבל חושב השדה החשמלי והפוטנציאל בכל התחום שהוצע לפתרון. בין הלוחות השדה החשמלי נשמר קבוע ושווה ל-  $50\text{V/m}$  ומחוץ לקבל נמצא ערכו אפס. תוצאה זו מתאימה לפתרון האנליטי כפי שמתארת משוואת השדה  $3.5$ . בין הלוח השמאלי של הקבל לצלע השמאלית

במרחב הבעיה, הפוטנציאל החשמלי הוא 0V, מהלוח הימני ועד הצלע הימנית הפוטנציאל הינו 50V, בהתאם למשוואה 3.7.

### פתרון תלת-ממדי של קבל באמצעות אנליזה נומרית ממוחשבת

לשם בחינת נכונות הנחות המודל הנומרי, נבדקה בעיה דומה עבור קבל תלת ממדי. לצורך הסימולציה נבנה מודל נומרי בהנחות הבאות: תחום המודל נקבע לגודל של 3X2X2 מטרים. שני לוחות מקבילים באורך 2X2 מטרים הונחו במרכז השטח ובמרחק 1 מטר זה מזה. הלוחות נמשכו מהפיאה העליונה של המודל לפיאה התחתונה, בדומה למודל הדו ממדי. צפיפות המטען על הפאות העליונה והתחתונה נקבעה ל-  $0 \text{ C/m}$  בכדי ליצור באופן תיאורטי אורך לוחות אינסופי. הלוח השמאלי בעל פוטנציאל חשמלי 0V וצפיפות המטען עליו הינה  $-500 \text{ C/m}^2$ , על הלוח הימני צפיפות מטען  $+500 \text{ C/m}^2$ . מרחב המודל חולק ל- 1500 אלמנטים קובייתיים בעלי 20 צמתים, מספר דרגות החופש במקרה זה הינו 5587 חלוקת האלמנטים היתה שווה בגודלה מאחר ותרומת כל המרחב היתה חשובה. בעיה ספציפית זו לא היוותה קושי בחלוקה לאלמנטים, לכן נותרה צפיפות אלמנטים גבוהה בכל התחום (1500 אלמנטים).

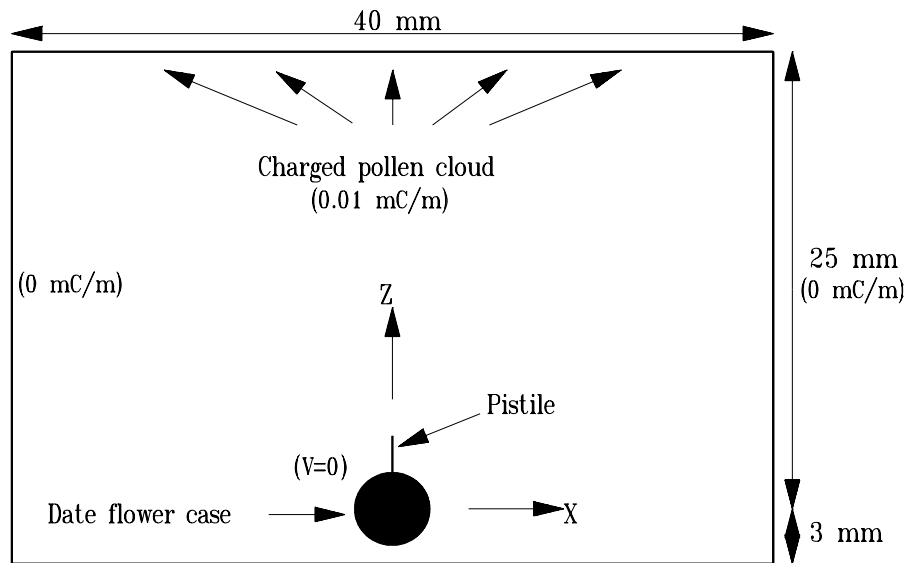
בשיטת אלמנטים סופיים חושבו הפוטנציאל והשדה החשמלי בכל תחום המודל. נתקבל מן האנליזה כי בין הלוחות, השדה החשמלי קבוע ושווה ל-  $50 \text{ V/m}$  ומחוץ לקבל הוא אפס. תוצאה זו מתאימה לחישוב האנליטי של משוואת השדה לפי 3.5. בין הלוח השמאלי של הקבל לצלע השמאלית במרחב הבעיה הפוטנציאל החשמלי הוא 0V, מהלוח הימני ועד הצלע הימנית הפוטנציאל הינו 50V, בהתאם למשוואה 3.7. המסקנה הכללית המתקבלת היא כי שיטת האלמנטים הסופיים לפתרון בעיות חום, בהתאמה נכונה, יכולה לשמש כמכשיר לפתרון בעיות באלקטרוסטטיקה.

### **3.3 פתרון שדה חשמלי במודל דו-ממדי של מערכת פרח תמר/אבקה טעונה אלקטרוסטטית**

#### בניית המודל

נבנה מודל דו ממדי למערכת פרח תמר / ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית עבור פרחים בעלי עלי באורכים שונים. צורת פרח התמר הוגדרה לצורך המודל כעיגול בקוטר 4 מ"מ אשר מרכזו נמצא בראשית הצירים X,Z ומראשו יוצא מלבן שרוחבו 0.4 מ"מ ואורכו משתנה לגדלים הבאים: 0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, או 5.0 מ"מ לאורך ציר Z לפי תנאי הבעיה. ענן האבקה רוכז על קו באורך 40 מ"מ ובגובה של 25 מ"מ מעל מרכז הפרח. שכבה זו הינה סטטית ואינה משתנה בזמן ובמקום. מידות מרחב הבעיה הינן 40X28 מ"מ כאשר הצלע העליונה מוגדרת כענן האבקה ומרכז הפרח ממוקם במרכז המרחב ושלושה מ"מ מעל לצלע התחתונה (ציור מס' 3.3). הנחות המודל נועדו לתאר מצב רגעי בלבד ביחסי הגומלין של ענן אבקה טעונה ופרח מוארק ולהסיק ממנו על השדה החשמלי על חלקי הפרח. שילוב של תוצאות העבודה הניסויית במעבדה במודל דומה,

עשויים להצביע על כמות האבקה המורבצת על חלקי הפרח השונים. (הפקודות לבניית המודל מפורטות ב- logfile אשר בנספח א').



ציור מס' 3.3: מערכת דו ממדית של פרח / ענן אבקה טעון. תנאי השפה האלקטרוסטטיים כתובים בסוגריים.

Fig 3.3: 2D flower/charged pollen cloud system. The electrostatic boundary conditions are written in parentheses.

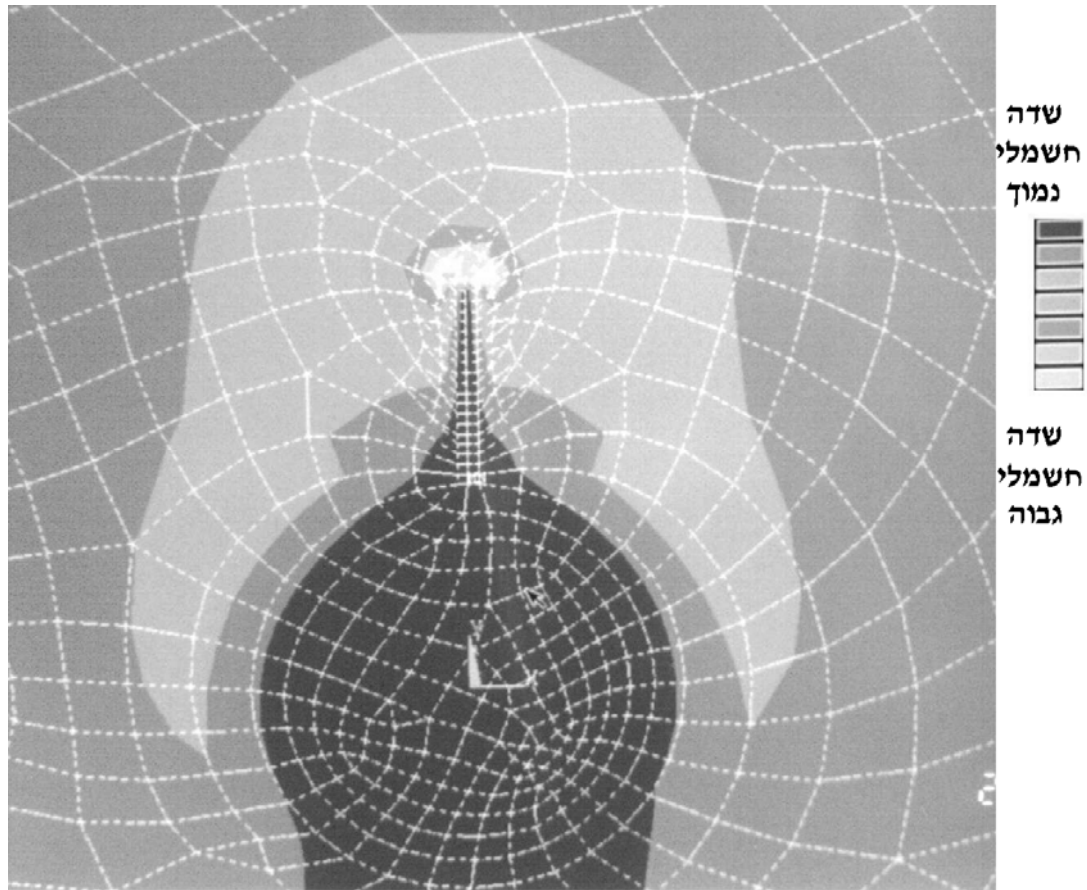
#### הגדרת הקבועים והנתונים

הנתונים לבחינת המערכת פרח תמר/ענן אבקה אלקטרוסטטית נלקחו מתוך תוצאות ניסוי מעבדה (שיפורטו בהמשך בפרק 4) בעזרת מערכת פיזור אבקה המתוארת בפרק 4.2. נמצא כי ענן אבקה בעל מטען של  $3 \mu\text{C}$  מתפזר בשטח של  $0.09 \text{ m}^2$ . לכן במודל הדו ממדי, צפיפות המטען בענן נקבעה כ-  $10 \mu\text{C/m}$ . הפוטנציאל החשמלי בפרח ובעלי הינו  $0 \text{ V}$ . צפיפות המטען בצלע השמאלית והימנית נקבעה לערך של  $0 \mu\text{C/m}$  בשל הסימטריות. מקדם הרשיות באוויר,  $\epsilon_0$  הינו  $8.85\text{E-}12$ . מאחר וזמן המעבר למצב המתמיד במקרה זה אורך מספר nsec (Dai and Law 1995), ניתן להניח שהבעיה סטטית באופייה והמערכת נמצאת במצב המתמיד מזמן  $t=0$ . בשל הנחה זו וההנחה שהפוטנציאל החשמלי בפרח קבוע, אין צורך לקבוע ערכי  $\epsilon$  שונים לכל חלק בבעיה, קרי לאוויר ולאזורי הפרח. המודל הנומרי חולק ל- 783 אלמנטים בפרח חסר עלי ועד 1508 אלמנטים במערכת פרח בעל עלי באורך 5 מ"מ. סוג האלמנטים שנבחר היה מסוג מרובעים ומשולשים בעלי 8 צמתים. מספר דרגות החופש הינו 1918 עבור פרח חסר עלי ו- 3477 עבור פרח עם עלי באורך 5 מ"מ. גודל האלמנטים לאורך גבולות המודל נקבע ל- 2 מ"מ, במעטפת הפרח לכ- 0.4 מ"מ ובעלי גודל האלמנטים היה 0.1 מ"מ. השינוי בגודל האלמנטים ובצפיפותם באזורים השונים בוצעה על ידי התוכנה באופן אוטומטי. דוגמה לרישות האלמנטים נמצאת בציור מס' 3.4.

#### תוצאות ודיון

עבור כל סימולציה חושב ווקטור השדה החשמלי בכל תחום המודל. מווקטור השדה ניתן לחשב את הכוח הפועל על מטען חשמלי ומסלול תנועתו. בציור מס' 3.4 מובא גודל השדה

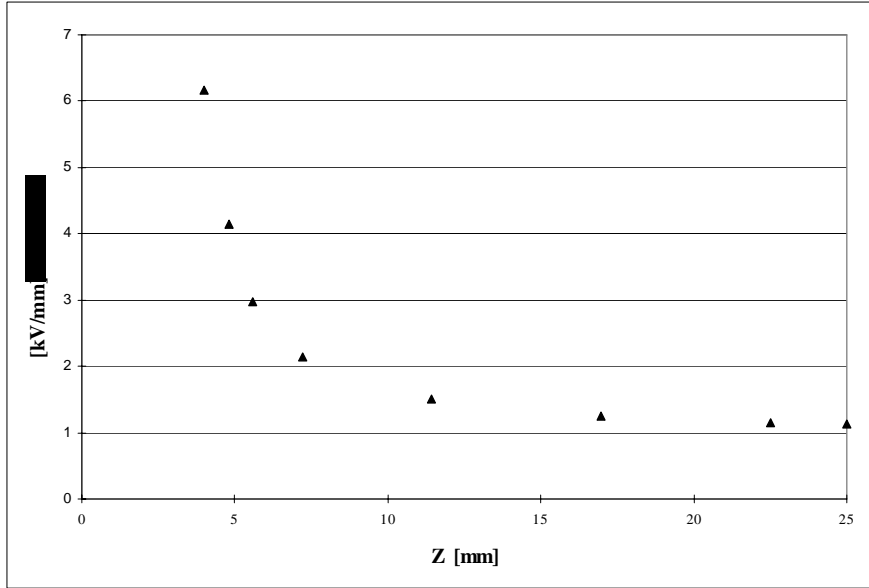
החשמלי עבור מודל פרח תמר בעל עלי באורך 2 מ"מ. כל צבע מתאר עוצמת שדה שונה. השדה המינימלי נמצא בתוך הפרח וצבעו הכהה ביותר. השדה המקסימלי נמצא בראש העלי וצבעו בהיר מאוד.



ציור מס' 3.4: פילוג עוצמת השדה החשמלי במודל פרח תמר בעל עלי באורך 2 מ"מ. הצבעים השונים מסמלים עוצמות שדה שונות. הרשת הלבנה מתארת את האלמנטים.

Fig 3.4: Electric field magnitude distribution in 2 mm pistil date flower model. The different colors represent the different field magnitude. The white net describe the elements.

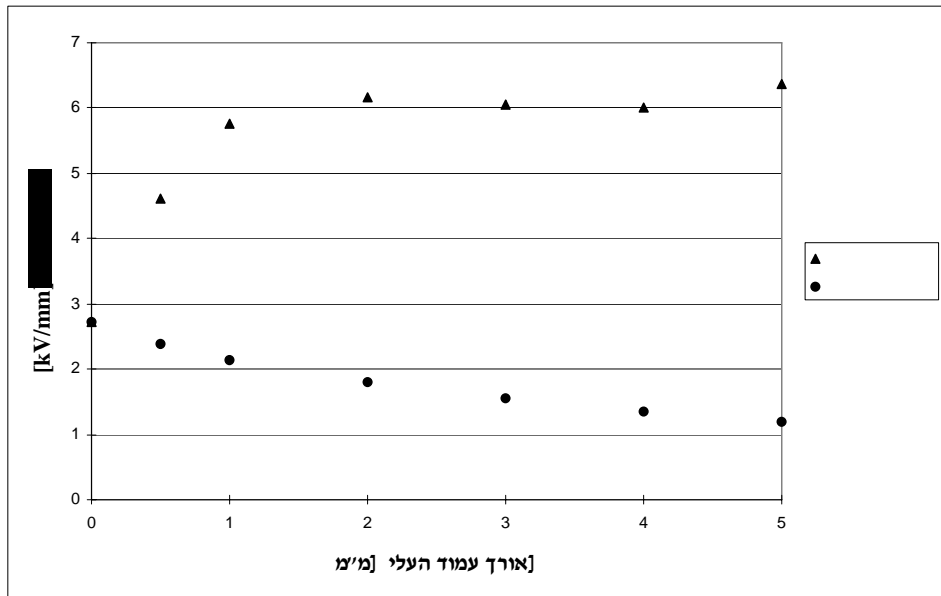
גודל השדה החשמלי כנגד מרחק לאורך ציר Z, ממרכז פרח בעל עלי באורך 2 מ"מ מתואר בציור מס' 3.5. השדה החשמלי המקסימלי נמצא בקצה העלי במרחק של 4 מ"מ ממרכז הפרח וערכו כ-61 kV/cm, עם העלייה במרחק, עוצמת השדה החשמלי קטנה באופן מהיר לערך של כ-18 kV/cm במרחק של 8 מ"מ ולאחר מכן בצורה מתונה עד לערך של 11 kV/cm במרחק של 25 מ"מ ממרכז הפרח. השדה החשמלי הגבוה בקצה העלי נובע ממבנהו הגיאומטרי הצר ומבליטתו מעל לפרח. תכונות אלו גורמות לריכוז מטענים גבוה בקצה העלי. ממרכז הפרח ועד קצה העלי השדה החשמלי הוא אפס מאחר ואזור זה נמצא בתוך הפרח שבו הפוטנציאל החשמלי קבוע.



ציור מס' 3.5 : השדה החשמלי לאורך ציר Z (ממרכז פרח ועד ענן האבקה) בפרח בעל עליו באורך 2 מ"מ.

Fig 3.5: The electric field along Z ordinate from the center of 2 mm pistil flower to the pollen cloud.

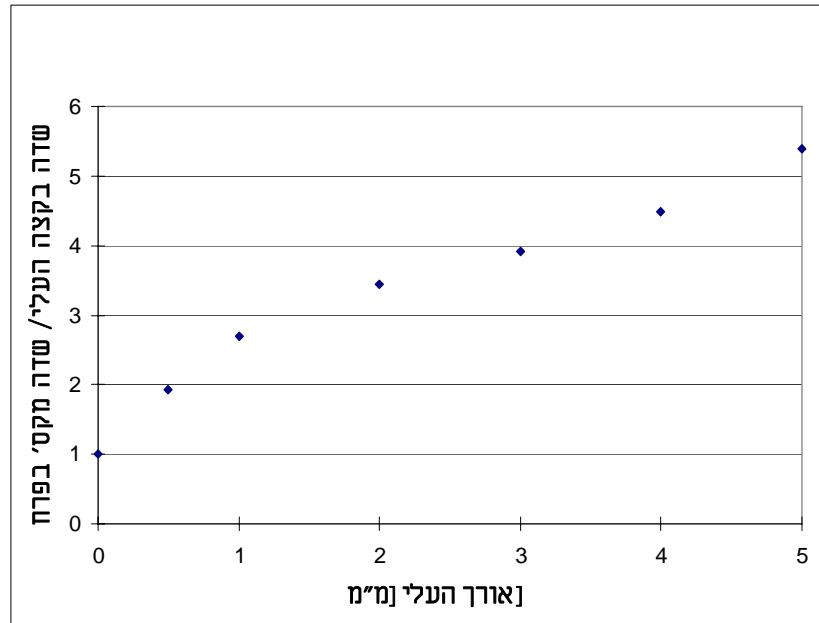
השדה החשמלי בקצה העליון גדל מערך של כ- 27 kV/cm עבור פרח חסר עליו ועד 61 kV/cm לעליו באורך 2 מ"מ. מעבר לאורך זה ועד ל- 5 מ"מ השדה החשמלי בקצה העליון קבוע וערכו כ- 62 kV/cm (ציור מס' 3.6). הסיבה לתוצאה נובעת כנראה מכך שעליו באורך 2 מ"מ ומעלה נחשב "מנותק" משאר הפרח מבחינה אלקטרוסטטית-גיאומטרית כך שהשפעת הפרח על השדה החשמלי בעליו זניחה וכמעט אינה מורגשת. לעומת זאת השדה החשמלי המקסימלי במעטפת הפרח קטן עם התארכות העליו מערך של כ- 27 kV/cm עבור פרח חסר עליו ועד לכ- 11 kV/cm עבור פרח בעל עליו באורך 5 מ"מ (ציור מס' 3.6) מאחר ומבחינה אלקטרוסטטית הוא מוסתר על ידי העליו.



ציור מס' 3.6 : השדה החשמלי בקצה העליו ובמעטפת הפרח כתלות באורך העליו.

Fig 3.6: The electric field in the stigma and flower envelope vs. the pistil length.

בבדיקת היחס בין השדה החשמלי בקצה העלי לבין השדה החשמלי המקסימלי במעטפת הפרח (ראה ציור מס' 3.7) כתלות באורך העלי, נמצא כי עם העלייה באורך העלי גדל היחס מ-1.0 עבור פרח חסר עלי ועד ליחס של 5.4 עבור פרח בעל עלי באורך 5 מ"מ (ציור מס' 3.7). יחס השדות מהווה מעין מדד לאטרקטיביות צלקת העלי עבור גרגרי אבקה טעונים במטען אלקטרוסטטי, ככל שהיחס יהיה גבוה יותר, מספר רב יותר של גרגרים ינועו לצלקת במקום למעטפת הפרח.



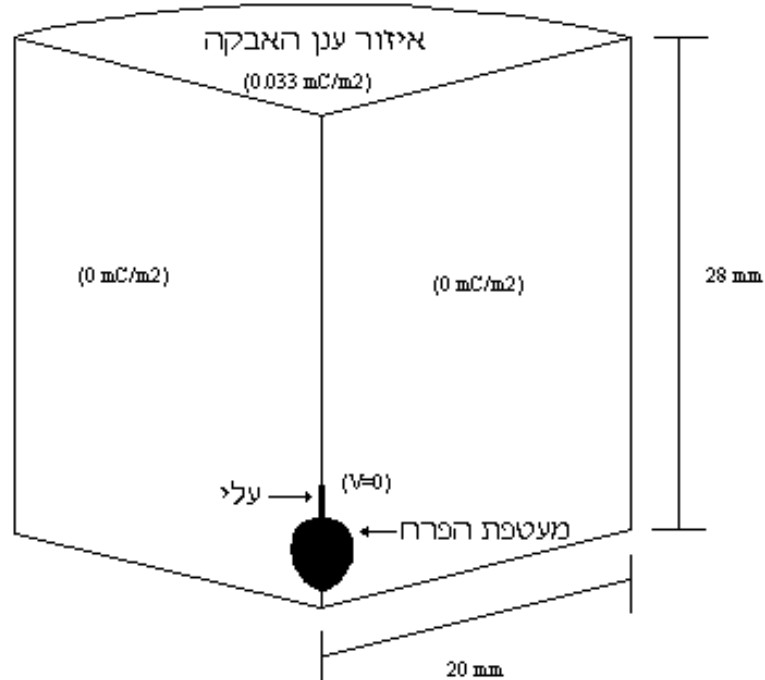
ציור מס' 3.7: היחס בין השדה החשמלי בקצה העלי לשדה החשמלי המרבי במעטפת הפרח כתלות באורך העלי.

Fig 3.7: The ratio between the electric field in the stigma and the max. electric field on the flower envelope vs. the pistil length.

### 3.4 פתרון שדה חשמלי במודל תלת-ממדי של מערכת פרח תמר-אבקה טעונה

#### בניית המודל

לחיזוק ממצאי המודל למקרה קרוב לאמיתי, נבנה מודל תלת ממדי למערכת פרח תמר - ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית עבור פרחים בעלי עליים באורכים שונים. צורת פרח התמר הוגדרה ככדור בקוטר 4 מ"מ אשר מרכזו נמצא בראשית הצירים X,Y,Z ומראשו יוצא גליל שקוטרו 0.4 מ"מ ואורכו 0.0, 0.5, 2.0, 3.0, או 4.0 מ"מ לאורך ציר Z. ענן האבקה רוכז בדיסקה בקוטר 40 מ"מ ובגובה של 25 מ"מ מעל מרכז הפרח (Z=25 מ"מ). מרחב הבעיה הינו צילינדר שקוטרו 40 מ"מ וגובהו 28 מ"מ כאשר הפיאה העליונה מוגדרת כענן האבקה ומרכז הפרח ממוקם במרכז המרחב ושלושה מ"מ מעל לפיאה התחתונה. בשל הסימטריות הרדיאלית של הבעיה, מרחב הבעיה נחצה לארבעה חלקים לאורך ציר Z והסימולציה נערכה על רבע אחד. מתאמי חיסכון במספר אלמנטים ובזמן ריצה, ומאחר והבעיה בעלת סימטרייה רדיאלית, הסימולציה נערכה על 1/4 מהמודל כפי שמופיע בציור 3.8 (פקודות מבנה המודל מופיעות ב- logfile אשר בנספח ב').



ציור מס' 3.8 : מערכת תלת ממדית של דמוי פרח / ענן אבקה טעון. תנאי השפה האלקטרוסטטיים כתובים בסוגריים.

Fig 3.8: 3D flower/charged pollen cloud system. The electrostatic boundary conditions are written in parentheses.

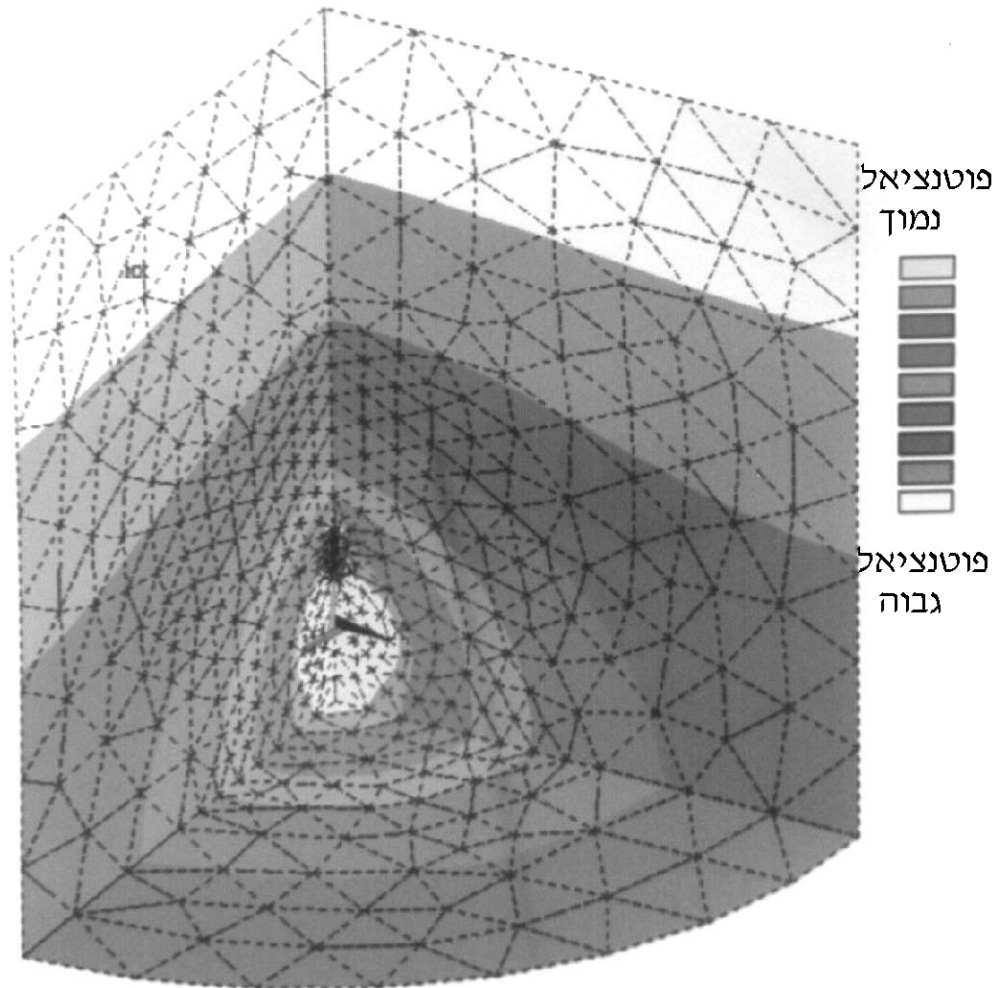
#### הגדרת הקבועים והנתונים

הנתונים לבחינת המערכת פרח תמר/ענן אבקה אלקטרוסטטית נלקחו מתוך תוצאות ניסוי מעבדה שיתואר בפרק 4. על סמך ניסויי מעבדה נקבע כי צפיפות המטען בענן במודל התלת ממדי היא  $33.3 \mu\text{C}/\text{m}^2$ . הפוטנציאל החשמלי בפרח ובעלי הינו  $0 \text{ V}$ , וצפיפות המטען בצלע השמאלית והימנית נקבעה לערך של  $0 \mu\text{C}/\text{m}$  בשל הסימטריות. מקדם הרשיות באוויר,  $\epsilon_0$  הינו  $8.85\text{E}-12$  וקבוע בכל המודל מאחר והפוטנציאל החשמלי בפרח קבוע. המודל חולק ל- 4115 אלמנטים בפרח חסר עלי ועד 16847 אלמנטים במערכת פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ. סוג האלמנט שנבחר היה מסוג פרמידה משולשת בעל 10 צמתים. מספר דרגות החופש הינו 5734 עבור פרח חסר עלי ו- 19662 עבור פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ. קביעת גודל האלמנטים בכל חלק במודל ואופן הרישות מתוארת ב- logfile אשר בנספח ב'. דוגמה לרישות האלמנטים נמצאת בציור מס' 3.9.

#### תוצאות ודיון

עבור כל סימולציה חושב ווקטור השדה החשמלי בכל שטח הבעיה. מתוצאות אלו ניתן לחשב את הכוח הפועל על מטען חשמלי ומסלול תנועתו. בציור מס' 3.9 מובאת עוצמת הפוטנציאל החשמלי עבור מודל פרח תמר תלת ממדי, כל צבע מתאר עוצמת פוטנציאל שונה. הפוטנציאל הנמוך ביותר נמצא בתוך הפרח, בעוד שהפוטנציאל הגבוה ביותר נמצא בענן האבקה, בחלק העליון של המודל.





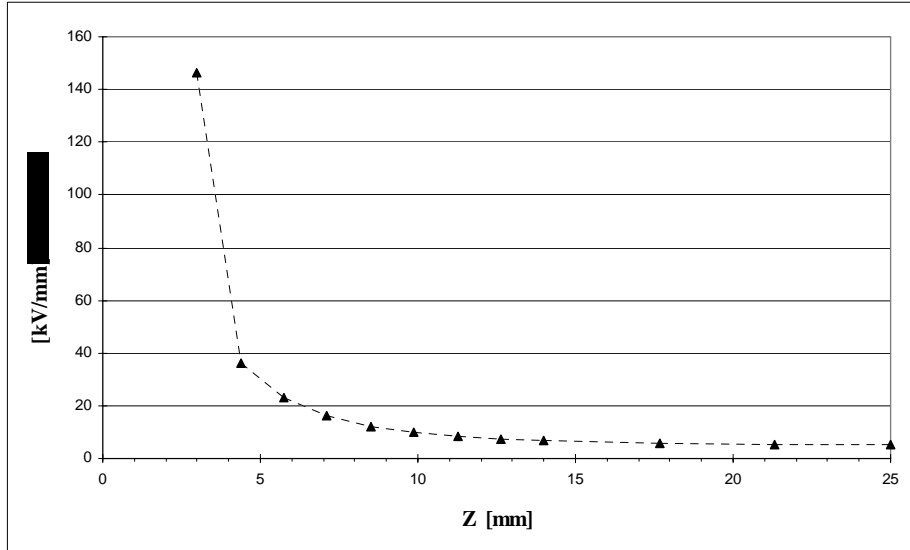
ציור מס' 3.9: הפוטנציאל החשמלי במודל פרח תמר תלת ממדי. הצבעים השונים מציינים פוטנציאל שונה. הרשת השחורה מציינת את האלמנטים.

Fig 3.8: The electric potential in a 3D date flower model. The different colors represent different potentials. The black net represent the elements.

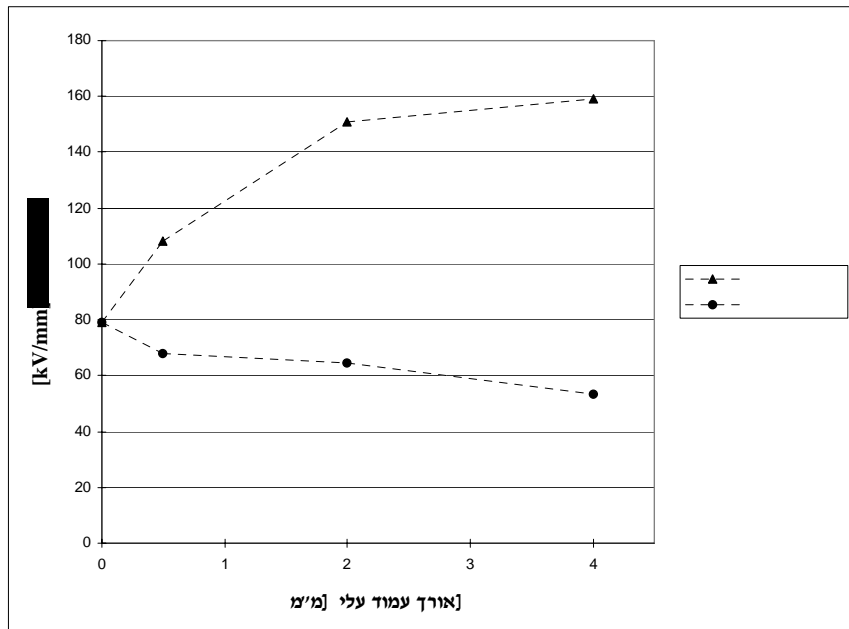
גודל השדה החשמלי כנגד מרחק לאורך ציר Z, ממרכז פרח בעל עלי באורך 0.5 מ"מ מתואר בציור מס' 3.10. השדה החשמלי המקסימלי נמצא בקצה העלי במרחק של 2.5 מ"מ ממרכז הפרח וערכו כ- 1480 kV/cm. עם העלייה במרחק, עוצמת השדה החשמלי קטנה פי 4 לערך של 383 kV/cm במרחק של כ- 4 מ"מ ולאחר מכן יורדת בצורה מתונה לערך של 50 kV/cm במרחק של 14 מ"מ ממרכז הפרח. השדה החשמלי הגבוה בקצה העלי נובע ממבנהו הגיאומטרי הצר, ומבליטתו מעל לפרח, תכונות אלו גורמות לריכוז מטענים גבוה בקצה העלי. ממרכז הפרח ועד קצה העלי השדה החשמלי הינו אפס מאחר ואזור זה נמצא בתוך הפרח שבו הפוטנציאל החשמלי קבוע.

בציור מס' 3.11 מתואר השדה החשמלי בקצה העלי והשדה החשמלי המרבי במעטפת הפרח עבור פרחים בעלי עלים באורכים שונים. השדה החשמלי בקצה העלי גדל מערך של כ- 800 kV/cm עבור פרח חסר עלי ועד כ- 1600 kV/cm לעלי באורך 4 מ"מ, אך העלייה החדה ביותר בשדה החשמלי מתרחשת עד לאורך עמוד עלי של 0.5 מ"מ ומעבר לעלי באורך 2 מ"מ העלייה בשדה החשמלי הינה מועטה. הסיבה לכך נובעת כנראה מכך שעלי באורך 2 מ"מ ומעלה נחשב "מנותק" משאר הפרח מבחינה אלקטרוסטטית-גיאומטרית כך שהשפעת הפרח על השדה החשמלי בעלי

זניחה וכמעט אינה מורגשת. השדה החשמלי המקסימלי אשר במעטפת הפרח קטן עם התארכות העלי באופן אחיד בקירוב מערך של כ-  $800 \text{ kV/cm}$  עבור פרח חסר עלי ועד לכ-  $530 \text{ kV/cm}$  עבור פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ (ציור מס' 3.11) מאחר ומבחינה אלקטרוסטטית הוא מוסתר על ידי העלי.



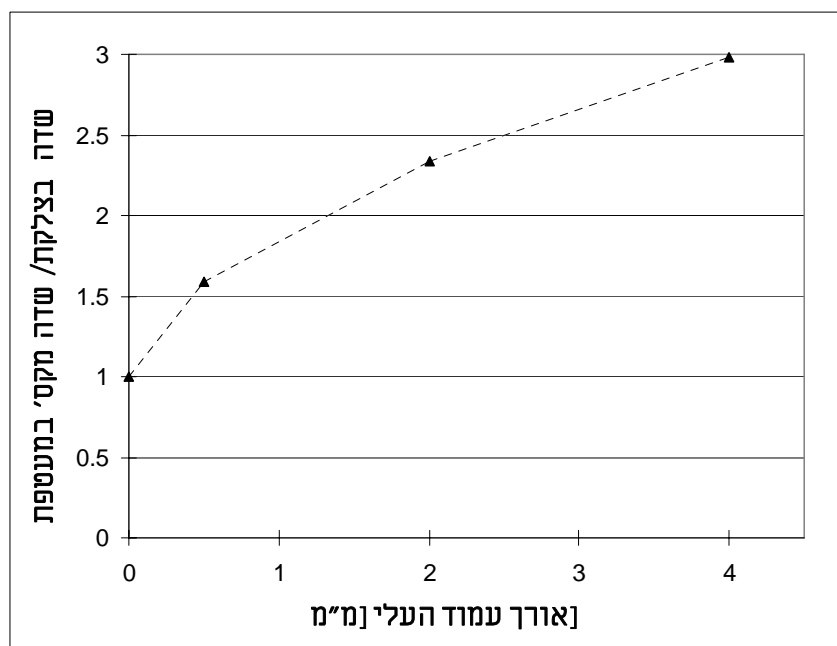
ציור מס' 3.10: השדה החשמלי לאורך ציר Z ממרכז הפרח עד לענן האבקה.  
 Fig 3.10: The electric field along Z ordinate from the flower center to the pollen cloud.



ציור מס' 3.11: השדה החשמלי בקצה העלי ובמעטפת הפרח כתלות באורך העלי.  
 Fig 3.11: The electric field in the stigma and flower envelope vs. the pistil length.

בבדיקת היחס בין השדה החשמלי בקצה העלי לבין השדה החשמלי המקסימלי במעטפת הפרח כתלות באורך העלי נמצא כי עם העלייה באורך העלי גדל היחס מ- 1.0 עבור פרח חסר עלי

ועד ל- 3 עבור פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ (ציור מס' 3.12). יחס השדות מהווה מעין מדד לאטרקטיביות צלקת העלי עבור גרגרי אבקה טעונים במטען אלקטרוסטטי, ככל שהיחס יהיה גבוה יותר, מספר רב יותר של גרגרים ינועו לצלקת במקום למעטפת הפרח.



ציור מס' 3.12: היחס בין השדה החשמלי בקצה העלי לשדה החשמלי המרבי במעטפת הפרח כתלות באורך העלי.

Fig 3.12: The ratio between the electric field in the stigma and the max. electric field on the flower envelope vs. the pistil length.

### 3.5 סימולציית מסלול תנועת גרגרים

נערכה סימולציה לחישוב מסלול תנועת הגרגרים במודל תלת ממדי של מערכת פרח דמוי

תמר/ ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית המתוארת בפרק 3.4. הסימולציה נכתבה בשפת Turbo Basic על מחשב אישי PC-586.

#### בניית המודל

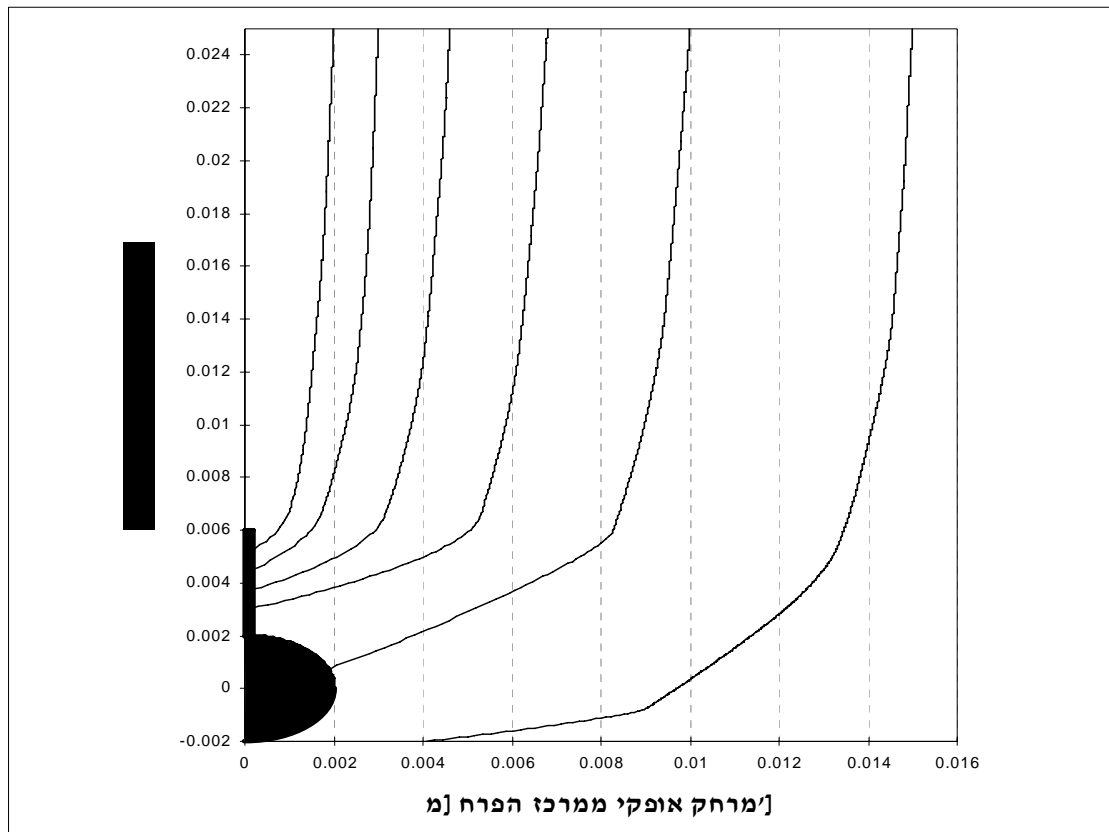
הסימולציה מדמה מצב שבו גרגרי אבקה בודדים ניתקים מענן אבקה טעון בקוטר 40 מ"מ, הנמצא בגובה של 25 מ"מ מעל פרח דמוי תמר בקוטר 4 מ"מ ובעל עלי גלילי באורך 4 מ"מ וקוטר 0.4 מ"מ. הגרגרים נעים בהתאם לוקטור הכוח האלקטרוסטטי הפועל עליהם לפי הנוסחה  $F=Eq$ , שדה הגרביטציה, שדה הזרימה המציפה וגרר הגרגר. המטען החשמלי של גרגרי האבקה מחושב לפי נוסחה 2.16 והשדה החשמלי נלקח מתוצאות פרק 3.4 עבור מערכת פרח תמר, בעל עלי באורך 4 מ"מ וענן טעון אלקטרוסטטית בצפיפות של  $33.3 \mu C/m^2$ . ווקטור השדה החשמלי ידוע בצמתי האלמנטים בלבד. מהירות האוויר הינה 0.5 m/s וגרר הגרגר מנוסח בנספח ג'. מאחר והבעיה הנדונה הינה אקסיסימטרית די לבדוק את מסלול תנועת הגרגרים כנגד המרחק הרדיאלי מציר Z. בעבודה הנוכחית חושבה תנועת הגרגרים במישור Z-X (Y=0 mm), מהירותם ההתחלתית היא 0.5 m/s ומיקומם ההתחלתי בענן הטעון (Z=25 mm) במרחקים שונים ממרכזו (X = 0 → 20 mm). בכל צעד זמן השדה החשמלי במיקום הגרגר נקבע כשווה בערכו ובכיוונו לשדה החשמלי הנתון בצומת הקרובה ביותר לגרגר. מחושב ווקטור התאוצות הפועל על הגרגר, ונמצא ווקטור המהירות

והמרחק שעבר. הסימולציה מסתיימת כאשר הגרגר מגיע אל הפרח או אל מחוץ לגבולות מרחב הבעיה. פירוט מבנה הסימולציה ומציאת ערכו של מטען הגרגר נמצאים בנספחים ג', ד'.

בבניית מודל הסימולציה המתואר לעיל נעשה שימוש במספר הנחות: השדה החשמלי במרחב הבעיה קבוע בזמן, מטען הגרגר קבוע, הזרימה המציפה הינה קבועה בכל מרחב המודל. לפי מבנה המודל, הגרגר הנחקר נמצא מחוץ לענן ולכן כוחות הדחייה בינו לבין שאר הגרגרים מחושבים באמצעות השדה החשמלי הכללי.

### תוצאות ודיון

תמונה של מסלול תנועת גרגרי האבקה מובאת בציר מס' 3.13. התמונה מהווה חתך במרחב הבעיה ומתארת את תנועת הגרגר הניתק מענן האבקה הטעון. נראה כי בכל מרחב הבעיה גרגרי האבקה מוסטים לכיוון הפרח וככל שהם קרובים יותר או ניתקים מנקודה קרובה יותר למרכז הענן ההטיה אל הפרח גוברת.

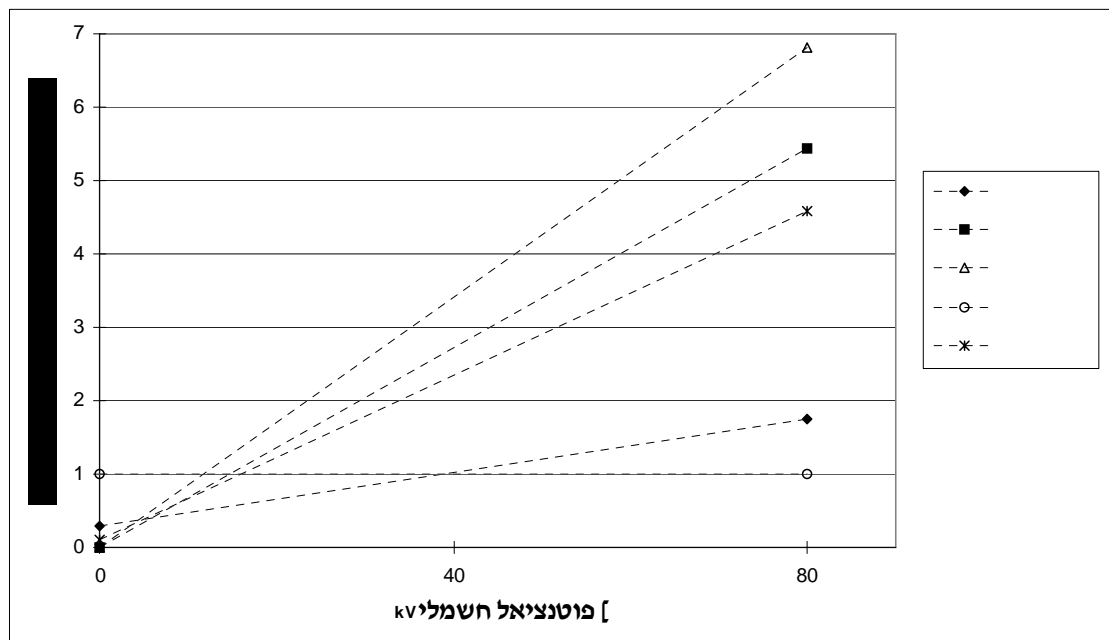


ציר מס' 3.13: סימולציית מסלול תנועת הגרגרים במרחקים שונים ממרכז ענן האבקה הטעון. הקווים הרציפים מציגים את מסלול תנועת הגרגרים הטעונים והקווים המרוסקים מראים תנועת הגרגרים ללא טעינה אלקטרוסטטית.

Fig. 3.13: The simulation of the pollen grain trajectory for a different distances from the center of the charged pollen cloud. The solid lines show the trajectory of the charged grains and the dashed lines show the trajectory of the grains without electrostatic charging.

במקרה ללא טעינה אלקטרוסטטית ובהנחה כי אין כוחות הצמדה/הדבקה, יורבצו על העלי גרגרי אבקה אשר מן הענן ברדיוס של עד 0.2 מ"מ ממרכזו, מאחר וזהו רדיוס העלי ועל

מעטפת הפרח גרגרי אבקה אשר ניתקו מן הענן ברדיוס של עד 2 מ"מ ממרכזו. במקרה הכולל טעינה אלקטרוסטטית יורבצו על ראש העלי (השליש העליון של העלי) גרגרים אשר ניתקו מן הענן ברדיוס של עד 3 מ"מ ממרכזו ועל כל העלי גרגרים אשר ניתקו מן הענן ברדיוס של עד 8.2 מ"מ ממרכזו. מהשוואת כמויות האבקה אשר יורבצו על הפרח עם וללא טעינה אלקטרוסטטית מתקבלת עליה של פי 225 בכמות גרגרי האבקה אשר יורבצו על ראש העלי, פי 1680 בכמות הגרגרים אשר יורבצו על כל העלי ופי 36 בכמות הגרגרים אשר יורבצו על מעטפת הפרח. היחס הגבוה במיוחד בכמות האבקה המורבצת על כל העלי נובעת מכך שבמקרה ללא טעינה אלקטרוסטטית לא הורבצה כל אבקה על קירות העלי אלא רק על המשטח שבראשו. כתוצאה מטעינת הגרגרים במטען חשמלי אטרקטיביות ראש העלי יחסית למעטפת הפרח גדלה פי 6.25. ציור מס' 3.14 מתאר את צפיפות הגרגרים המנורמלת בצפיפות הגרגרים על פני מעטפת הפרח עבור חמישה אזורים בפרח, במקרה ללא טעינה אלקטרוסטטית ובמקרה הכולל טעינה אלקטרוסטטית ברמה השווה ל-80 kV ונקבעה על סמך נתונים מניסוי המעבדה בפרק 4.4. אזור קצה, אמצע ותחתית העלי מוגדרים כשליש העליון, האמצעי והתחתון של העלי בהתאמה.



ציור מס' 3.14: צפיפות הגרגרים על חמישה אזורים במודל הפרח המנורמלת בצפיפות הגרגרים על פני מעטפת הפרח, במקרים האקוויולנטים לטעינה ב-0 kV ו-80 kV.

Fig. 3.14: pollen grains density on five regions in the flower model, normalize by the pollen grains density covering the flower envelope, in cases that are equivalent to 0 kV and 80 kV.

צפיפות הגרגרים המנורמלת בעלי נעה בין 1.76 בקצה העלי ל-6.82 בתחתית העלי, תוצאה זו נמוכה יחסית לתוצאות ניסוי המעבדה בפרק 4, שם הצפיפות הגבוהה ביותר היא בקצה העלי והנמוכה ביותר בתחתיתו. בהשוואת הצפיפות המנורמלת בכל העלי אנו מקבלים ערך של 4.6 בסימולציה וכ-30 בניסוי המעבדה. ההבדלים נובעים בשל מבנה האלמנטים ורישותם, מאופן קירוב ערכי ווקטור השדה החשמלי במיקום הגרגר, מהזנחת כוחות ההצמדה ושדה הזרימה באזור הפרח ומההנחה כי מיקום הענן וערכי השדה החשמלי במרחב הבעיה קבועים בזמן. עם זאת, הסימולציה נותנת פתרון כמותי מקורב למגמת הרבצת הגרגרים על פני הפרח. יש להניח כי מסלול תנועת הגרגרים במרחב הבעיה נכונה אך בסופו של המסלול ובגישה לפרח קיים אי דיוק

הגורם להבדל בין צפיפויות הגרגרים על חלקי הפרח השונים שהתקבלו בניסוי המעבדה לאלו שהתקבלו בסימולציה. פירוט החישובים מובא בנספח ג'.

### 3.6 סיכום

- הסימולציות בפרק זה בוצעו בשיטת אלמנטים סופיים. המודלים נבנו באופן דומה למודלים של בעיות מעבר חום, כאשר התוצאות עברו המרה מתאימה לאנלוגיה החשמלית. נעשה שימוש בתוכנת ANSYS 5.1 ובמחשב ALFA (DEC 3000) של DIGITAL.
- נערכה בדיקה האם התוכנה המסחרית ANSYS 5.1 נותנת פתרונות נכונים עבור הפוטנציאל והשדה חשמלי עבור בעיות מעבר חום תוך אנלוגיה חשמלית, במקרים דו ממדיים ותלת ממדיים. על סמך הפתרונות נראה שניתן להשתמש בתוכנה בצורה זו בתאמה נכונה.
- נבנה מודל אלמנטים סופיים דו ממדי ותלת ממדי למערכת ענן אבקה טעונה אלקטרוסטטית מעל פרח תמר. השדה החשמלי הגבוה ביותר נמצא בקצה העלי. בכל המקרים נראה יתרון ברור עבור הפרחים בעלי העלי הארוך ביותר, הן מבחינת עוצמת השדה והן מבחינת יחס השדות בקצה העלי לזה שבמעטפת הפרח.
- שיפור המודל מדו ממדי לתלת ממדי מאפשרת לערוך סימולציה על כל מורפולוגית פרח, סימטרית ושאינה סימטרית. בעזרת המודל התלת ממדי ניתן לקבל תוצאות מקורבות יותר למקרה האמיתי ולחשב על פיהן את התאוצות והכוחות השולטים במערכת. המודל הדו ממדי הינו פשוט יותר, צורך פחות זיכרון ומהיר בהרבה מאשר המודל התלת ממדי. שימוש העיקריים הם בדיקה איכותית ומהירה של מקרים מסוימים, השוואה בין מקרים שונים או בין ערכי השדה השונים במקרה מסוים.
- המודל תרם להבנת הקורה במיכלול הפרח והעלי בעת האבקה אלקטרוסטטית וניתן באמצעותו למצוא את השדה החשמלי על חלקי הפרח השונים.
- סימולציית מסלול תנועת הגרגרים נותנת הערכה כמותית מקורבת למספר גרגרי האבקה המורבצים על העלי והפרח, את השיפור בתוספת האבקה המורבצת בהשוואה למקרה ללא טעינה חשמלית ובאטרקטיביות העלי על פני מעטפת הפרח כתוצאה מהטעינה האלקטרוסטטית.
- הסימולציה חוזה באופן מגמתי את הקשר בין השדה החשמלי שהתקבל במודל האלמנטים הסופיים לבין תוצאות ניסוי המעבדה שבפרק 4.



## פרק 4 - ניסויי פיזור אלקטרוסטטי של אבקה

### 4.1 מבוא

הניסויים התמקדו בבדיקת השפעת הכוחות האלקטרוסטטיים לפיזור והרבצת גרגרי אבקה על צלקות הפרחים. עבור הניסויים ניבנו מתקנים ופותחו מכשירים ליצירת הכוחות האלקטרוסטטיים. הפרחים הנבחנים היו במצבם הטבעי בשדה ובתנאים דומים בניסויי המעבדה.

מאחר ואחת ממטרות המחקר הינה שיפור ההאבקה והיבול של עצי פרי על ידי האבקה אלקטרוסטטית, הניסויים התמקדו בגידולים בעלי בעיות בהאבקה. הגידולים שנבחרו לביצוע הניסויים הינם עצי שקד מזן נאפא ו-מ.ד. במטע של קיבוץ נחשון. כמו כן בוצע ניסוי בעצי תמר מזן חדראווי המצויים במכון וולקני.

### מבנה הניסויים

הורכבו שלוש קבוצות ניסויים לבדיקת הרבצת גרגרי אבקת פרחים :

א. ניסוי בתנאי מעבדה להרבצת אבקת תמרים על מודל פרח דמוי תמר: בניסוי זה נוצר ענן אבקת תמרים טעון אלקטרוסטטית מעל מודל דמוי פרח תמר על ידי מערכת פיזור אבקה המתוארת בסעיף 4.2. בניסוי זה נוסו פוטנציאלים חשמליים שונים ונבדקה צפיפות הגרגרים שנחתו על חלקי המודל השונים.

ב. ניסויי הרבצת אבקת תמר בתנאי שדה: פוזרה אבקת פרחי תמר טעונה ולא טעונה בעזרת מערכת פיזור אבקה המתוארת בסעיף 4.2, על פרחי תמר במצבם הטבעי בעץ. בוצעו שלושה סוגי האבקה שונים על מספר עצים. נבדקו אחוז החנטה ואיכות הפירות.

ג. ניסויי הרבצת אבקת שקדים בתנאי שדה: פוזרה אבקת פרחי שקד טעונה ולא טעונה בעזרת מערכת פיזור אבקה המתוארת בסעיף 4.2, על פרחי שקד במצבם הטבעי בעץ, בוצעו חמישה טיפולי האבקה שונים על מספר עצים בתקופת שיא הפריחה ונבדקו השפעות הטיפולים בתקופת סוף הפריחה. נבדקו אחוז החנטה, איכות הפירות.

### 4.2 שיטות ואמצעים

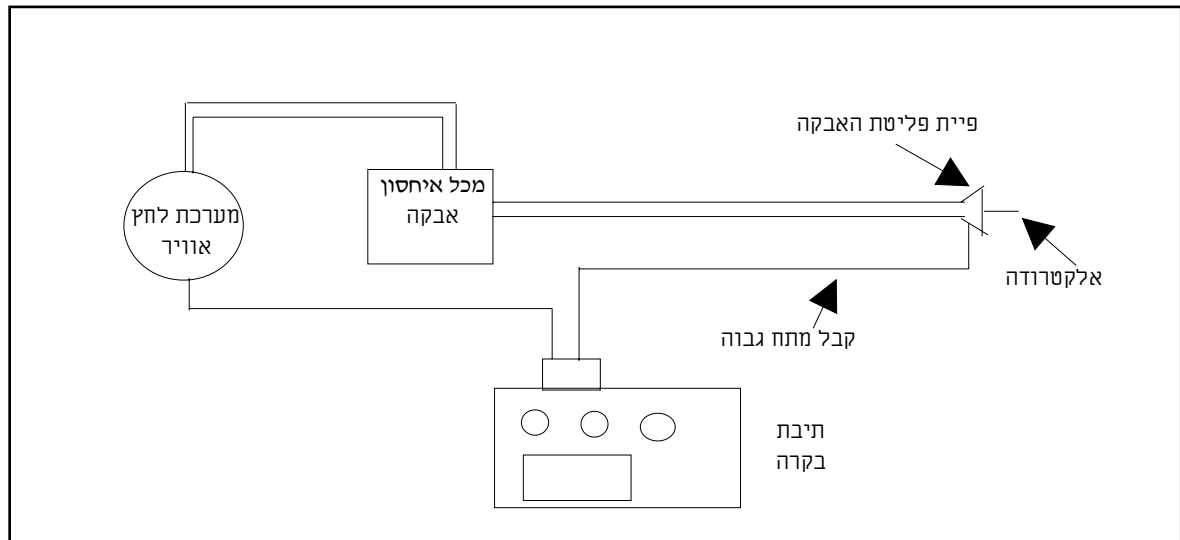
#### 4.2.1 מערכת לפיזור אבקת פרחים טעונה אלקטרוסטטית

במסגרת העבודה הנוכחית נוצר צורך לפתח מערכת לפיזור אבקת פרחים טעונה אלקטרוסטטית. המערכת שפותחה מבוססת על עיקרון טעינת corona, הנפוצה במכשירים תעשייתיים לפיזור אבקות צבע לציפוי משטחים.

המערכת מורכבת ממיכל לאחסון האבקה בנפח 500 cc המחובר בצינור לפייט פליטה בעלת קוטר 50 mm. במרכז פיית הפליטה מותקנת אלקטרודת מתח גבוה הגורמת לטעינה אלקטרוסטטית של האבקה היוצאת מן הפייטה. האלקטרודה מקבלת מתח בין 0 kV עד 80 kV מספק כוח של חברת Hipotronics. תנועת האבקה ממיכל האחסון אל הפייטה מתבצעת דרך שסתום באמצעות מערכת לחץ אוויר בלחצים שבין 0.2 ועד 5 אטמוספרות. תיבת בקרה שולטת על הפעלת



ספק הכוח של האלקטרודה, על לחץ האוויר במערכת ועל השסתום בין מיכל האבקה לפיית הפליטה. מהירות האוויר במתקן זה הינה 0.5 - 2.0 מ"ש. סכימה כללית של המערכת מתוארת בציר מס' 4.1.



ציר מס' 4.1 : תאור סכימטי של המערכת לפיזור אבקה טעונה אלקטרוסטטית.

Fig. 4.1: Schematic description of device for deposition of electrostatic charged pollen.

## 4.2.2 מערכות נילוות להערכת איכות ההאבקה

### הערכה איכותית במיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM)

בוצעו צילומים של גרגרי אבקת פרחים על צלקות פירחי תמר ושקד לשם הערכה איכותית של כמות הגרגרים המורבצים בתנאים השונים. הצילומים בוצעו בהגדלות שבין פי 100 לפי 1000 במיקרוסקופ SEM במחלקה לבוטניקה באוניברסיטת תל אביב.

### הערכה כמותית במיקרוסקופ בינוקולר

בוצעו ספירות של גרגרי אבקה על פני שטחים ידועים וקבועים לשם קבלת תוצאה כמותית של מספר וצפיפות גרגרי אבקה המורבצים. הספירות התבצעו בהגדלה של פי 30 בבינוקולר EMC-2 של חברת MEIJI.

## שקילת פירות

שקילת פירות נעשתה במאזניים חצי אנליטיים. תחום המדידה היה בין 0 ל- 5 ק"ג, בדיוק של 0.1 גרם בכל תחום השקילה.

השימוש בשיטות ובאמצעים נעשה בהתאם לדרישות הניסוי ומטרותיו.

### **4.3 ניסוי מעבדה בהרבצת אבקה על מודל דמוי פרח תמר**

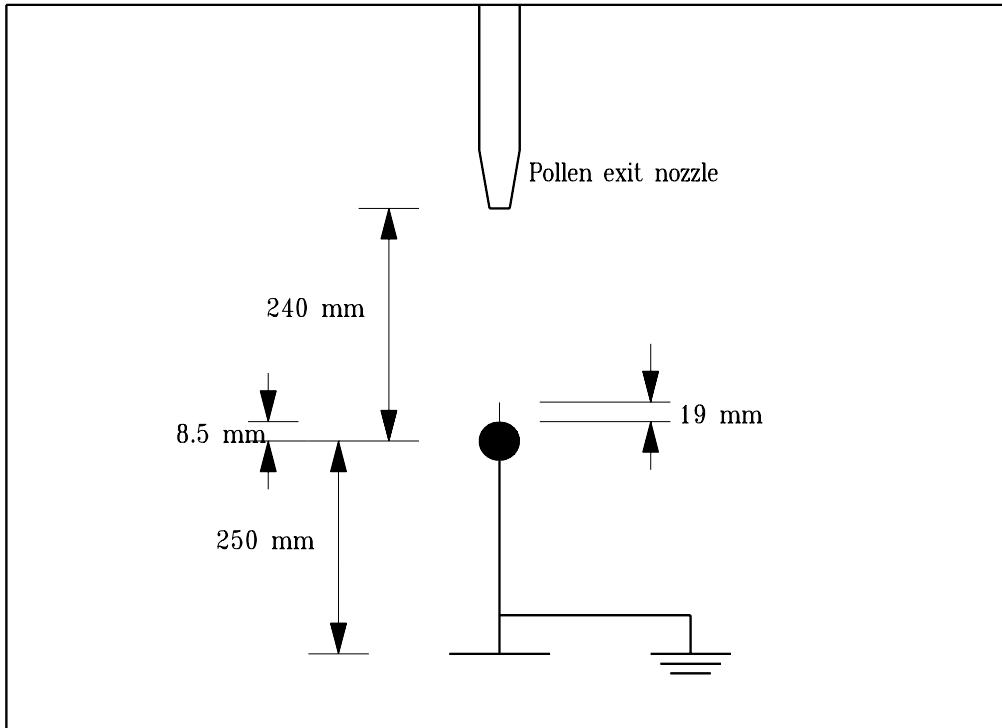
#### **4.3.1 תאור הניסוי**

הניסוי בוצע לשם מדידת כמות האבקה המורבצת על חלקים שונים של מודל הפרח בתנאים אלקטרוסטטיים שונים. תוצאות הניסוי אמורות להצביע על מספר הגרגרים המורבצים על כל חלק וכן להצביע על היתרון הטמון בכוחות האלקטרוסטטיים לשם בקרה של כמות האבקה ולשם חיסכון בכמות האבקה הנדרשת.

#### מערכת הניסוי

מערכת הניסוי נבנתה בקנה מידה (בהגדלה) של 1: 4.75 ביחס למודל הנומרי התלת ממדי (ANSYS) שבפרק 3.4. כל היחסים בין המידות השונות נשמרו בדיוק של עד 10%. בבדיקת דמיות של הנוסחאות האלקטרוסטטיות ובפתרון המודל הנומרי שתואר בפרק 3.3, נמצא כי כאשר נשמרות פרופורציות הבעיה וצפיפות המטען בענן, אזי פילוג השדה החשמלי זהה לזה שבבעיה המקורית.

מערכת הניסוי מורכבת מכדור פלדה בקוטר 19 מ"מ. הכדור מחובר למוט מתכת בקוטר 1.9 מ"מ ובאורך 19 מ"מ. מצידו השני הכדור מחובר למוט בקוטר 4 מ"מ המשמש כמעמד וחיבור להארקה. המערכת המדמה פרח תמר מחוברת למסגרת עץ, מעליו בגובה 24 ס"מ ממרכזו מקובעת פיית פליטת האבקה (ראה ציור מס' 4.2). המודל נבנה כך שהכדור מדמה את מעטפת פרח התמר בעוד שהמוט מדמה את עמוד העלי. פיית מערכת פיזור האבקה הוצבה במרחק כזה שגרמה ליצירת ענן בקוטר 19 ס"מ בגובה של 12 ס"מ מעל מרכז הכדור. בכדי להקטין את השפעת הקרקע על יצירת הענן ותכונותיו האלקטרוסטטיות מוקם הכדור כ- 25 ס"מ מעל הקרקע. מערכת פיזור האבקה תוארה בסעיף 4.2.



ציור מס' 4.2: מערכת ניסוי המעבדה במודל דמוי פרח תמר.  
 Fig 4.2: Lab. experiment system with date flower model.

#### מהלך הניסוי

בניסוי נבדקו שלושה מיקרים שונים של פיזור אבקה. הראשון ללא אלקטרוסטטיקה, השני בפוטנציאל של 40 kV וזרם חשמלי של  $11 \mu\text{A}$  והשלישי בפוטנציאל של 80 kV וזרם של  $27 \mu\text{A}$ . בכל מקרה בוצעו ארבע חזרות וזמן הפיזור היה 0.2 שניות. ספיקת האבקה הממוצעת היתה כ- 100 mg/sec אך בזמני הפעלה קצרים קיימת אי אחידות מסוימת בספיקה. לאחר פיזור האבקה נלקח מודל הפרח תחת המיקרוסקופ ונספרו הגרגרים במספר שטחים אקראיים שגודלם הכולל היה  $0.068 \text{ mm}^2$  לאזור מדידה. מדידות אלו נערכו על שלושה אזורים - קצה העלי, תחתית העלי ומרכזו. במעטפת הפרח נסרקו מספר שטחים אקראיים שגודלם הכולל היה  $4.55 \text{ mm}^2$ . בגמר הספירה נשטף המודל במים, יובש ונבדק לאי המצאות גרגרים בכדי להכינו לחזרה הבאה. לכל אחד משלושת המקרים שנבחנו נערכו 4 חזרות.

#### הרכב האבקה

אבקת התמרים לניסוי זה היתה חסרת חיוניות והתקבלה מתחנת הניסיונות בצמח). האבקה היתה נקייה לחלוטין והכילה גרגרי אבקת פירחי תמר בלבד.

#### **4.3.2 תוצאות ודיון**

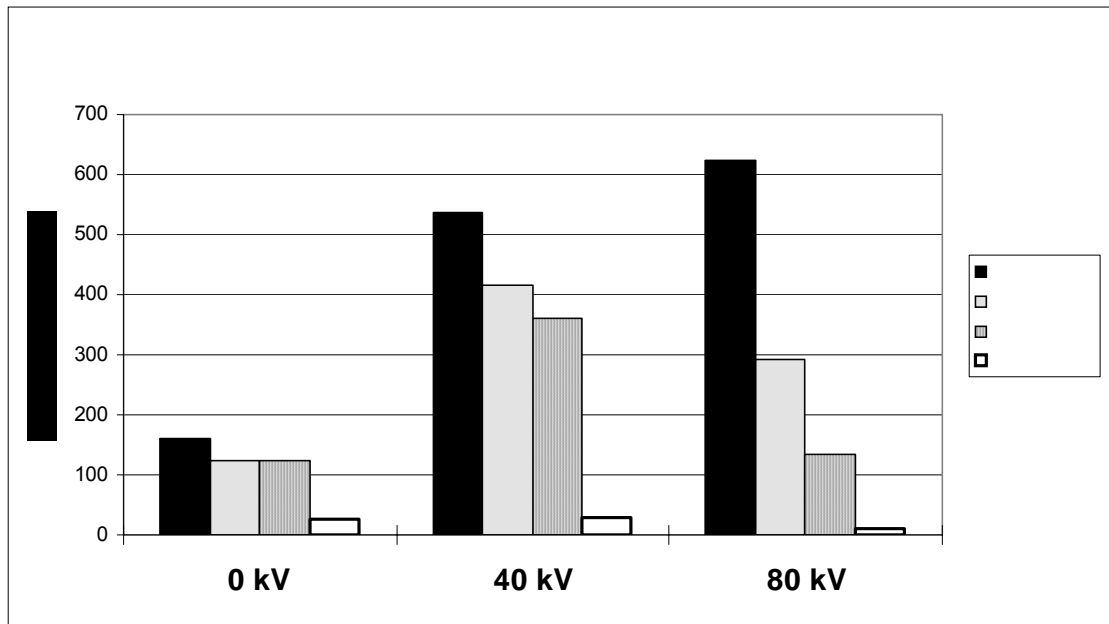
בכל חזרה הופעלה המערכת למשך 0.2 שניות. חושב כי בפוטנציאל של 80 kV מטען הענן שפוזר היה  $5.4 \mu\text{C}$  וצפיפות המטען  $190 \mu\text{C}/\text{m}^2$ , בפוטנציאל של 40 kV, המטען הינו  $2.2 \mu\text{C}$  וצפיפות המטען  $78 \mu\text{C}/\text{m}^2$ . בטבלה 4.1 מובאות תוצאות הניסוי. התוצאה בחזרה שלישית בפוטנציאל 80 kV חריגה ונובעת מספיקת אבקה גבוהה מאוד באופן רגעי שנגרמה על ידי מערכת הזנת האבקה. בעיבוד התוצאות חזרה זו לא נלקחה בחשבון.

טבלה 4.1: מספר הגרגרים ליחידת שטח בחלקי הפרח השונים עבור הטיפולים השונים.

Table 4.1: Number of grains per area on different flower parts for several treatments.

סטיית תקן	ממוצע	חזרה 4	חזרה 3	חזרה 2	חזרה 1	
49.0	159.4	148.3	163.2	222.5	103.8	קצה העלי
50.5	122.4	103.8	192.8	118.7	74.2	אמצע עלי
53.3	122.4	133.5	89.0	192.8	74.2	תחתית עלי
5.5	26.6	29.8	22.9	32.7	21.1	מעטפת פרח
65.6	537.7	578.5	489.5	608.2	474.7	קצה העלי
121.1	415.3	534.0	326.3	504.3	296.7	אמצע עלי
107.9	359.7	459.8	400.5	370.8	207.7	תחתית עלי
4.6	29.2	33.6	31.8	28.3	23.1	מעטפת פרח
68.0	623.0	563.7	1661.3	608.2	697.2	קצה העלי
126.2	291.7	148.3	682.3	341.2	385.7	אמצע עלי
39.2	133.5	118.7	474.7	178.0	103.8	תחתית עלי
1.6	10.7	9.6	311.5	10.0	12.5	מעטפת פרח

בציור מס' 4.3 מוצגים הערכים הממוצעים של מספר הגרגרים למ"מ רבוע בכל חלק בפרח וברמות אלקטרוסטטיקה שונות. בקצה העלי התקבלה רמה של כ- 620 גרגרים לממ"ר במקרה של 80 kV אשר יורדת עד ל- 160 גרגרים לממ"ר ללא אלקטרוסטטיקה. לאורך העלי קיימת ירידה הדרגתית במספר הגרגרים לממ"ר מן הקצה ועד לתחתית העלי ולאחריה נפילה גדולה בצפיפות הגרגרים שעל גבי מעטפת הפרח. בחלק מן האזורים נראה כי יש יתרון לטיפול ב- 40 kV מבחינת צפיפות הגרגרים אך הדבר נובע כנראה מחוסר אחידות בספיקת האבקה בפרקי זמן הפעלה קצרים כגון אלה שבהם נערך הניסוי (ראה ערכי גרגרי האבקה שנמדדו על קצה העלי ב- 40 kV בהשוואה ל- 80 kV). יש לזכור כי כמות הגרגרים שסופקה על ידי המערכת היתה שונה בכל חזרה ולכן בציור מס' 4.3 יש להביט על כל רמת פוטנציאל כניסוי נפרד. כדי לנטרל השפעה זו יש לנתח את התוצאות לפי היחס בין הכמות באיזור מסוים לכמות באיזור אחר, כפי שיבוצע להלן.

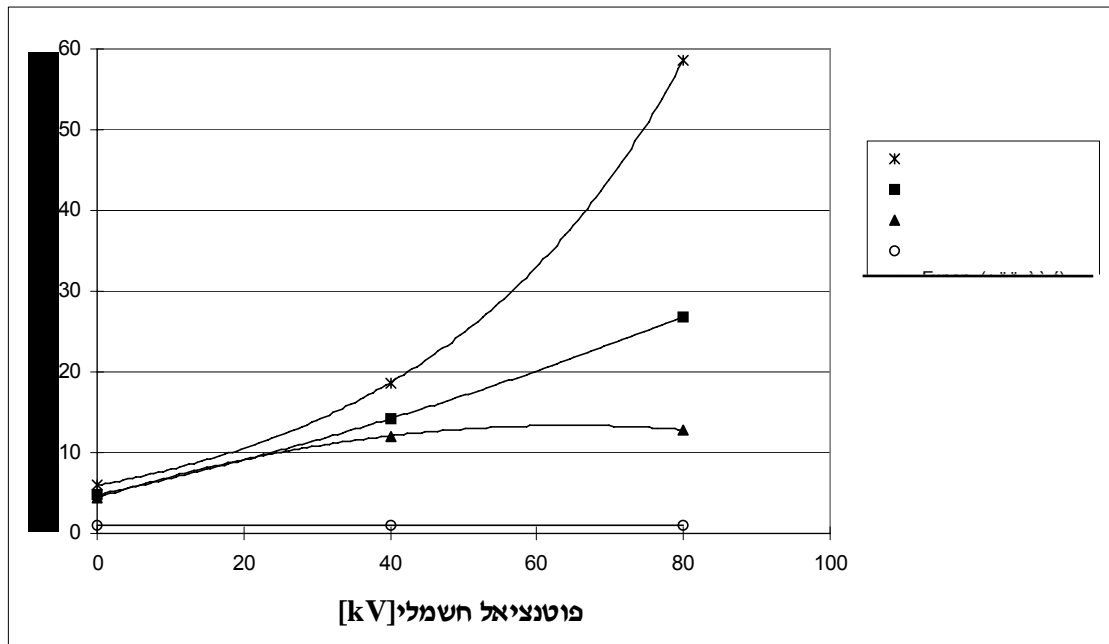


ציור מס' 4.3: הצפיפות הממוצעת של גרגרי האבקה על חלקי המודל השונים וברמות אלקטרוסטטיות שונות.

Fig. 4.3: The average density of pollen grains on the model parts for different potential levels.

בפוטנציאל 80 kV צפיפות הגרגרים בקצה העלי גבוהה פי 60 מצפיפות הגרגרים במעטפת הפרח ובכל העלי פי 30 בממוצע בעוד שבמקרה ללא אלקטרוסטטיקה היחס הינו בערך פי 5 בלבד. עם העלייה בפוטנציאל החשמלי וצפיפות המטען בענן האבקה היחס שבין צפיפות הגרגרים על חלקי העלי השונים לבין צפיפות הגרגרים על מעטפת הפרח גדל (ציור מס' 4.4). התוצאות הללו מתיישבות היטב עם סימולציית האלמנטים הסופיים שבוצעו עבור המודל דמוי פרח תמר עם עלי באורך 4 מ"מ. השדה החשמלי בקצה העלי במקרה זה גבוה פי 2.5 מאשר השדה המרבי על מעטפת הפרח ויותר מפי 2.5 בשאר חלקי המעטפת. יחסי צפיפות הגרגרים על חלקי המודל השונים תואמים איכותית את פילוג השדה החשמלי שחושב בפרק 3. השינוי בצפיפות במקרה ללא אלקטרוסטטיקה נובע משדה הזרימה הגורם לתנועת הגרגרים סביב הכדור. ניתן לראות כי הניתוח של כמות הגרגרים באיזור מסוים באופן יחסי לכמות הגרגרים שעל המעטפת מראה מגמות עקביות התואמות את ממצאי המודל המחושב.

הצלקת בתמר היא על כל העלי וחשיבות ההאבקה היא בהרבצת אבקה לכל אורכו, לכן נלקחו ערכי צפיפות ממוצעת בכל העלי בנוסף לערכי הצפיפות על פני כל חלק בעלי.



ציור מס' 4.4: היחס שבין צפיפות הגרגרים על חלקי הפרח השונים לבין צפיפות הגרגרים על מעטפת הפרח.

Fig. 4.4: The ratio of grains density on the flower parts to the grains density on the flower case.

## 4.4 ניסויי שדה בהרבצת אבקה בתמרים

### 4.4.1 תאור הניסוי

בוצעו שני ניסויים בתמרים מזן חדראווי בכדי למצוא את הקשר בין צורת ההאבקה לבין אחוז חנטת הפרחים וכמות היבול המתקבלת. הניסויים התקיימו בשדרת עצי תמר במכון וולקני. נעשה שימוש באבקת פירחי תמר נקיה המכילה גרגרי אבקה בלבד.

#### ניסוי I - ניסוי האבקת תמרים בעזרת מערכת פיזור אבקה אלקטרוסטטית.

הניסוי התבצע בשלושה עצים והכיל שלושה טיפולים לעץ. כל טיפול כלל שני אשכולות. בשניים מן הטיפולים נעשה שימוש במערכת פיזור אבקת פרחים המתוארת בפרק 4.2. כל האשכולות כויסו בתחילת העונה, כשבוע לפני תחילת ההאבקה בשקיות נייר בכדי למנוע האבקה לא רצויה ולא מבוקרת. פירוט הטיפולים שנערכו:

(א) האבקה אלקטרוסטטית - האבקה פוזרה על ידי מערכת פיזור האבקה, בפוטנציאל חשמלי של 80 kV, כל אשכול הואבק ממרחק של 15 ס"מ. לאחר ההאבקה, הענף כוסה בשקית נייר אשר מנעה האבקה נוספת בלתי מבוקרת. הפרחים בטיפול זה קיבלו אבקה מן המכשיר בלבד.

(ב) האבקה לא אלקטרוסטטית - זהה לטיפול א' מלבד הפוטנציאל החשמלי אשר נקבע ל-0 kV (האבקה לא טעונה אלקטרוסטטית).

(ג) האבקת טבעית - הפרחים בטיפול זה היו חשופים כל שעות היממה. האשכולות לא כויסו מלבד בזמן האבקת הטיפולים האחרים.

האבקת העצים התבצעה בתאריכים 30/3/95 ו-7/4/95 בשעות הבוקר. כל אשכול בטיפולים א' ו-ב' הואבק במשך שניה וחצי כל פעם בספיקה של כ-103 mg/sec. סה"כ כל אשכול הואבק בכ-310 מ"ג אבקה. בין האבקת טיפול א' לטיפול ב' חלפו מספר דקות בכדי לאפשר לאבקה לשקוע ולמנוע האבקת טיפול ב' באבקה שיועדה לטיפול א'. כאשר צלקות הפרחים חדלו להיות רצפטיביות הוסרו שקיות הנייר מן האשכולות.

#### **ניסוי II - ניסוי האבקת תמרים בעזרת מערכת פיזור אבקה אלקטרוסטטית בתוספת מפוח וצינור.**

מיכשור הניסוי כלל מפוח בעל ספיקה של  $3.0 \text{ m}^3/\text{min}$  אשר חובר לצינור PVC באורך 4 מ' וקוטר 4". לקצה הצינור הורכבה פיית הפליטה של מכשיר ההאבקה האלקטרוסטטי. המערכת סיפקה סילון אוויר יציב עד למרחק של 1.2-1.5 מ' מקצה הפיה במהירות של 1.5 מ"ש, מעבר למרחק זה החלה התבדרות הסילון וטורבולנציה. תוספת זו באה להקל פעולת ההאבקה בעצים גבוהים ולבדוק התכונות ההאבקה ממרחק. הניסוי התבצע בשני עצים והורכב משלושה טיפולים לעץ, כל טיפול כלל שלושה אשכולות פרחים. בשניים מן הטיפולים נעשה שימוש במערכת ההאבקה המתוארת בפרק 4.2. כל האשכולות כויסו כשבוע לפני תחילת ההאבקה בשקיות נייר בכדי למנוע האבקה לא רצויה ולא מבוקרת. פירוט הטיפולים שנערכו:

א) האבקה אלקטרוסטטית - האבקה פוזרה על ידי מערכת ההאבקה, בפוטנציאל חשמלי של 80 kV, כל אשכול הואבק ממרחק של 80 ס"מ. לאחר ההאבקה, האשכול כוסה בשקית נייר אשר מנעה האבקה נוספת בלתי מבוקרת. הפרחים בטיפול זה קיבלו אבקה מן המכשיר בלבד.

ב) האבקה לא אלקטרוסטטית - זהה לטיפול א' מלבד הפוטנציאל החשמלי אשר נקבע ל-0 kV  
ג) האבקה טבעית - הפרחים בטיפול זה היו חשופים כל שעות היממה. האשכולות לא כויסו מלבד בזמן האבקה הטיפולים האחרים.

האבקת העצים התבצעה בתאריכים 5/4/95 ו-13/4/95, 20/4/95. כל האשכולות בטיפולים א' ו-ב' הואבקו בפולסים שכללו סה"כ כ-10 מ"ג אבקה. בין האבקת טיפול א' לטיפול ב' חלפו מספר דקות בכדי לאפשר לאבקה לשקוע ולמנוע האבקת טיפול ב' באבקה שיועדה לטיפול א'. ההאבקה בוצעה בשעות הבוקר. כאשר צלקות הפרחים חדלו להיות רצפטיביות הוסרו שקיות הנייר מן האשכולות.

#### **4.4.2 תוצאות ודיון**

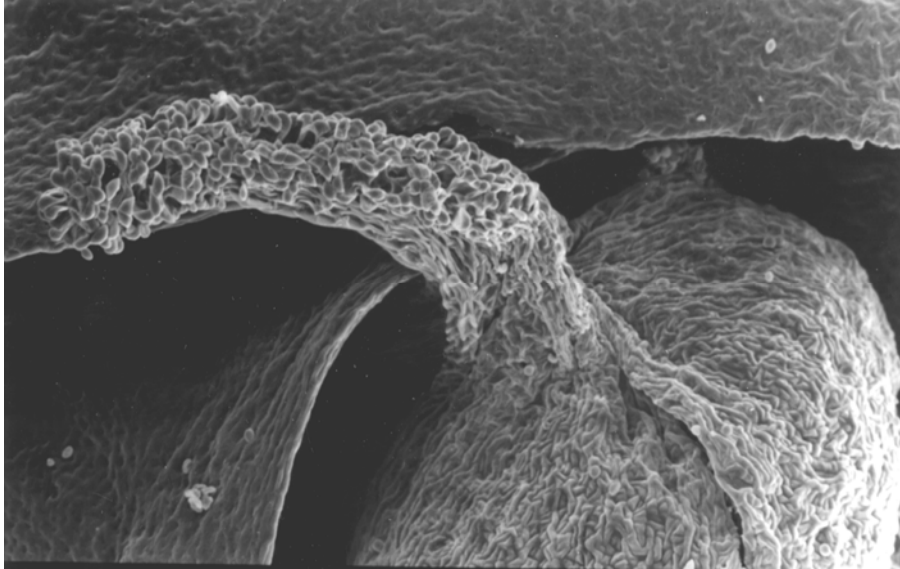
##### **ניסוי I -**

בניסוי נבדקו כ-42,900 פרחים על פי הערכה מספירת כמות הפרחים בחמישה סנסנים (ענפים) בכל אשכול. מספר הסנסנים הממוצע לאשכול היה 82 וסטיית התקן עמדה על 18 סנסנים. מספר הפרחים הממוצע לסנסן הינו 34.5 וסטיית התקן היא 8.6 פרחים. קטיפת אשכולות התמרים ובדיקתם נערכה בתחילת אוקטובר. האשכולות של טיפול ההאבקה הלא אלקטרוסטטית בעץ 2 נפגמו, לא ניתן היה לבדקם והם אינם מופיעים בתוצאות.

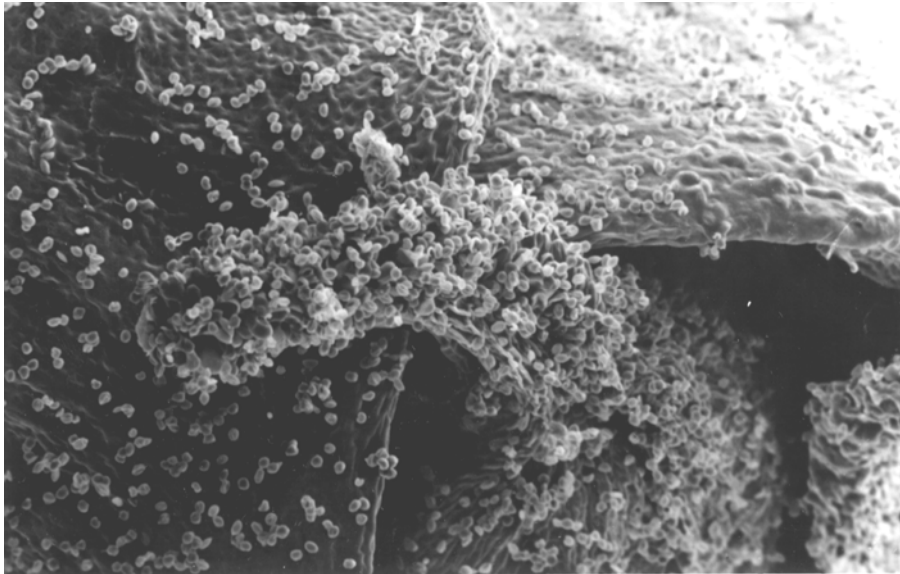
בציור מס' 4.5 נראות צלקות פירחי תמר לאחר פיזור אבקה פרחים רגילה (ציור מס' 4.5 א') ואבקה פרחים הטעונה במטען חשמלי של 80 kV (ציור מס' 4.5 ב'). בשני המקרים הפרחים היו מוארקים ופוזרה אותה כמות אבקה. הצלקת בציור מס' 4.5 א' קלטה גרגרי אבקה בודדים, בעוד

שהצלקת בציוור מס' 4.5 ב' מצופה כמעט לחלוטין בגרגרי אבקה. גם לעלי הכותרת דבקו גרגרים אך לא באותו יחס ובאותה כמות כמו שעל גבי הצלקת. צורתו הגיאומטרית של הפרח והארקתו לאדמה גורמת למשיכת הגרגרים הטעונים אל הצלקת ומגבירה את יעילות ההאבקה.

(א)



(ב)



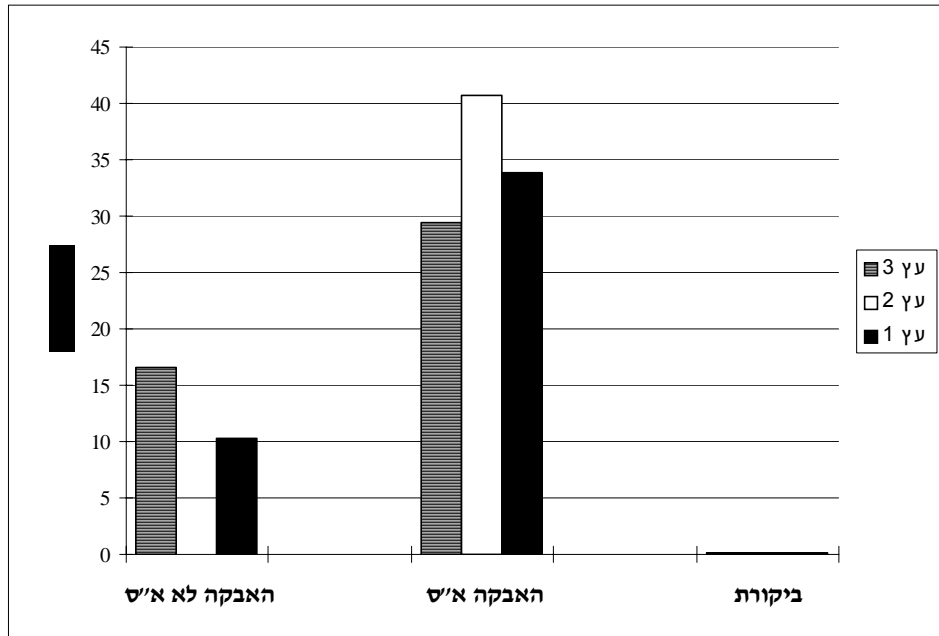
ציור מס' 4.5 : עלי פרח תמר לאחר פיזור אבקת פרחים רגילה (א) ואבקת פרחים הטעונה במטען חשמלי מאלקטרודת 80 kV (ב). הגדלה פי 100.

Fig 4.5: Date flower pistile after deposition of uncharged pollen (A) and a charged pollen from 80 kV electrode. Magnitude X100.

טיפול ההאבקה הלא אלקטרוסטטית הניב בין 10% ל- 17% פירות מכלל הפרחים בכל עץ. אחוז הפרי בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית הינו הגבוה ביותר ונע בין 29% ל- 41% עקב ניצול הכוחות האלקטרוסטטיים להצמדת גרגרי אבקה רבים יותר לצלקת התמר. התקבל שיפור של 157% בממוצע באחוז הפרי בטיפול האבקה האלקטרוסטטית בהשוואה להאבקה לא



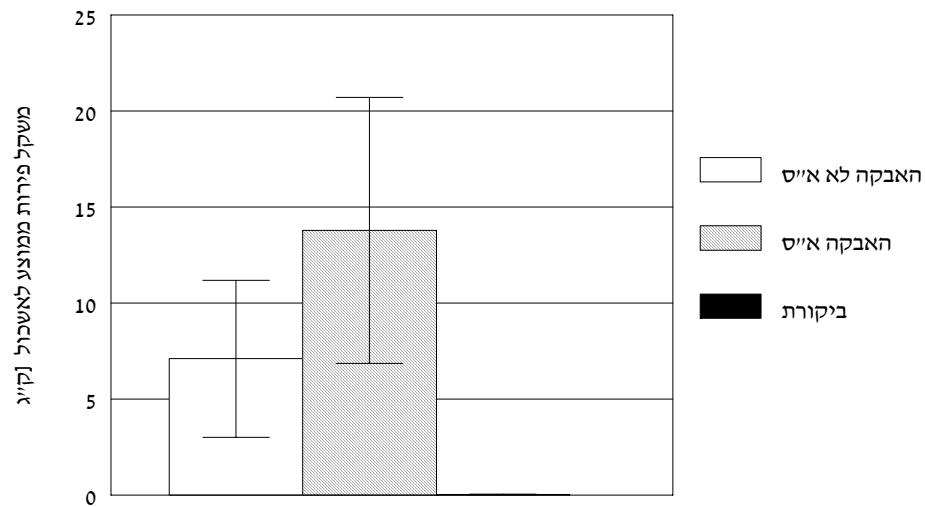
אלקטרוסטטית עבור אותה כמות אבקה, באותה מערכת ואותה טכניקת האבקה. בטיפול הביקורת אחוז הפרי היה 0.1% בממוצע מכיוון שהפריים בטיפול זה לא הואבכו באופן מלאכותי והפירות הבודדים שהתפתחו כאן כתוצאה מהאבקה לא מכוונת (ציור מס' 4.6) אחוז הפירות הנמוך בטיפול זה מראה את יעילות כיוס האשכולות כאמצעי נגד האבקה לא מבוקרת. במבחנים סטטיסטיים התקבלה מובהקות של 99% בבדיקת השוני בין כל הטיפולים השונים.



ציור מס' 4.6: אחוז הפרי עבור הטיפולים השונים.

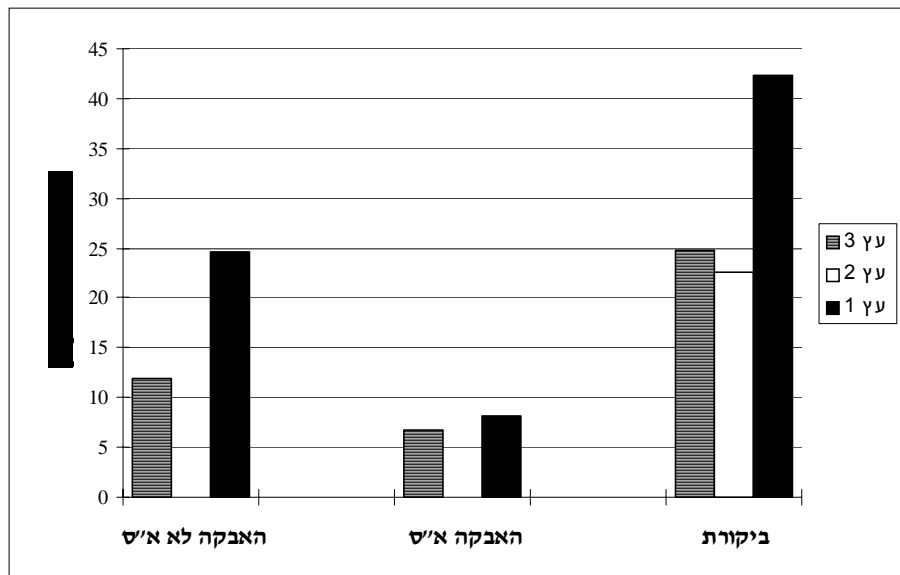
Fig 4.6: Fruit percentage for the different treatments.

בניסוי הופק יבול של 90.5 ק"ג תמרים. משקל הפירות לאשכול בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית הינו 13.8 ק"ג בממוצע לעומת 7.1 ק"ג בטיפול האבקה לא אלקטרוסטטית. משקל הפירות לסנסן בטיפול הביקורת הוא עשרות גרמים בלבד (ציור מס' 4.7). תוצאות אלו מתאימות לאחוז הפירות הגבוה בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית יחסית להאבקה לא אלקטרוסטטית. סטיות התקן גבוהות ונובעות מהשוני הרב בין העצים. משקל הפירות בסנסן הינו 155.3 גרם בממוצע עבור טיפול ההאבקה האלקטרוסטטית והוא גבוה ב- 76% ממשקל הפירות לסנסן בטיפול האבקה לא אלקטרוסטטית. הפירות חסרי זרע הנוצרים עקב האבקה לא מספקת, אינם רצויים עבור העץ והחקלאי. אחוז פירות אלה הינו הגבוה ביותר בטיפול הביקורת - 30% בממוצע, ובטיפולי האבקה האלקטרוסטטית הינו הנמוך ביותר - 5% בממוצע. אחוז הפירות חסרי הזרע בהאבקה לא אלקטרוסטטית גדול פי 3.6 בממוצע מאשר בהאבקה האלקטרוסטטית (ציור מס' 4.8). נתון זה הינו אינדיקטור נוסף לכך שהאבקה האלקטרוסטטית היתה היעילה ביותר בניסוי זה.



ציור מס' 4.7: משקל הפרי בטיפולים ועצים שונים.

Fig. 4.7: Fruit weight in different treatments and trees.



ציור מס' 4.8: אחוז הפירות חסרי הזרע בכל טיפול.

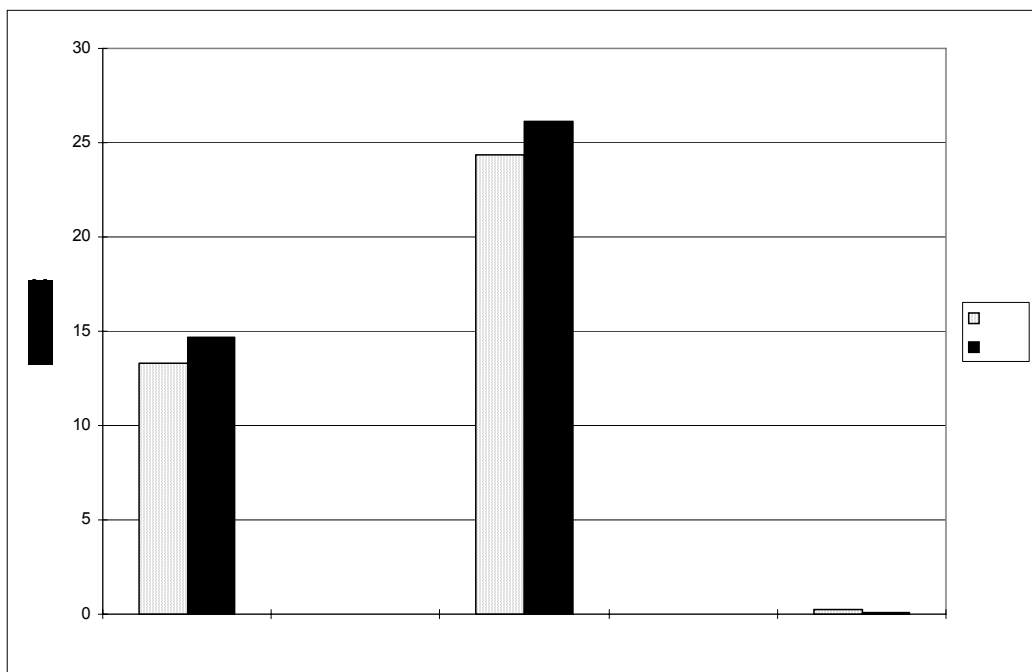
Fig 4.8: Partenocarpic fruit percentage.

## ניסוי II -

בניסוי נבדקו כ- 45,000 פרחים על פי הערכה מספירת כמות הפרחים בחמישה סנסנים בכל אשכול. מספר הסנסנים הממוצע לאשכול היה 86 וסטיית התקן עמדה על 24 סנסנים. מספר

הפרחים הממוצע לסנסן הינו 40.4 וסטיית התקן היא 7.1 פרחים. קטיפת אשכולות התמרים ובדיקתם נערכה בתחילת אוקטובר.

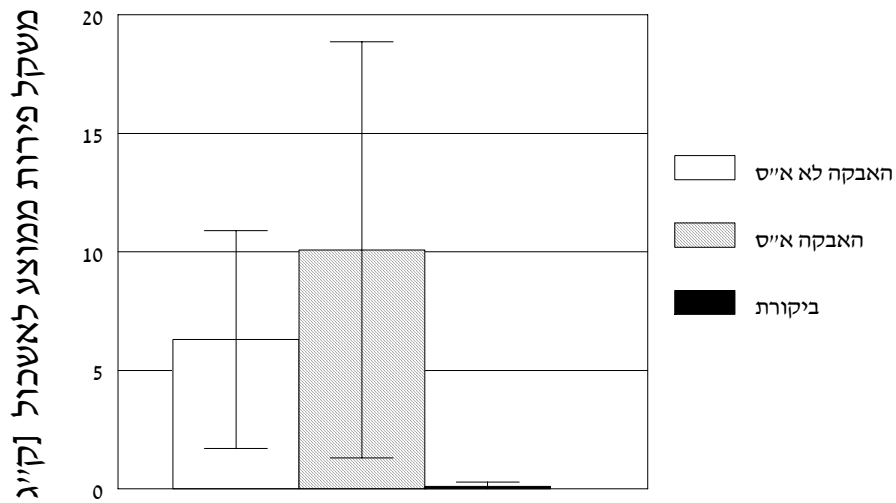
טיפול ההאבקה הלא אלקטרוסטטית הניב בין 13% ל- 14% פירות עבור העצים השונים, אחוז הפרי בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית הינו הגבוה ביותר ונע בין 24% ל- 26%. מתקבל שיפור של כ-85% בממוצע בטיפול האבקה אלקטרוסטטית בהשוואה להאבקה לא אלקטרוסטטית עבור אותה טכניקת האבקה. בטיפול הביקורת אחוז הפירות עומד על 0.15% בממוצע מכיוון שהפרחים בטיפול זה לא הואבכו באופן מלאכותי והפירות הבודדים שהתפתחו נבעו מהאבקה לא מכוונת (ציור מס' 4.9). במבחן t-test שנערך נמצא שהשוני בין הטיפולים קיים ברמת מובהקות של 99%.



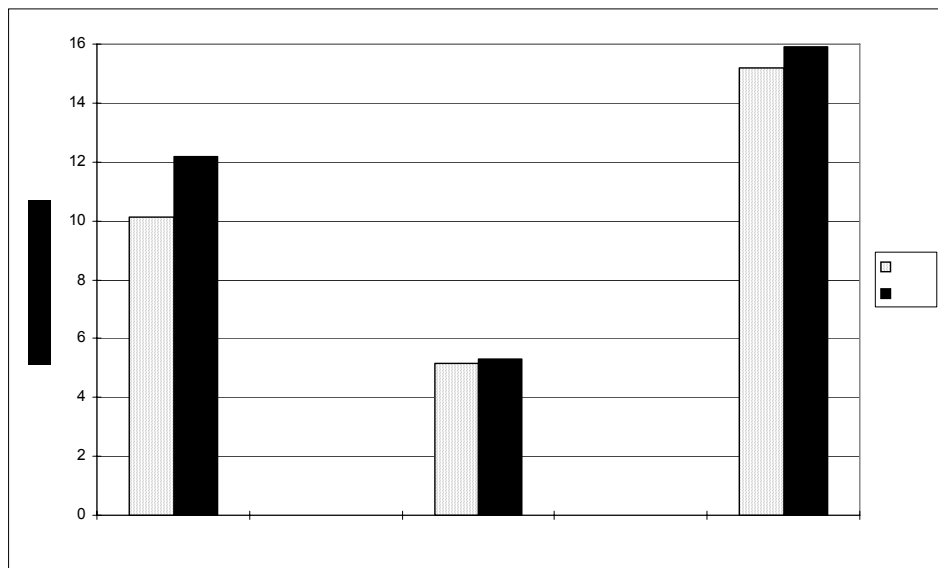
ציור מס' 4.9: אחוז הפרי עבור הטיפולים השונים.

Fig 4.9: Fruit percentage for the different treatments.

משקל הפירות לאשכול בטיפול האבקה אלקטרוסטטית גבוה ב- 77% מאשר בטיפול האבקה לא אלקטרוסטטית (ציור מס' 4.10). אחוז הפירות חסרי זרע הינו הגבוה ביותר בטיפולי הביקורת ועומד כל כ- 15.5% בממוצע. ערך אחוז הפירות חסרי הזרע הנמוך ביותר הוא בטיפולי האבקה אלקטרוסטטית - 5% בממוצע. אחוז הפירות חסרי הזרע בהאבקה לא אלקטרוסטטית גדול פי 2.1 בממוצע מאשר בהאבקה אלקטרוסטטית (ציור מס' 4.11).



ציור מס' 4.10 : משקל הפירות ממוצע לאשכול עבור הטיפולים השונים.  
 Fig 4.10: Average fruit weight per cluster.



ציור מס' 4.11 : אחוז הפירות חסרי הזרע בכל טיפול.  
 Fig 4.11: Partenocarpic fruit percentage.

בניסוי הופק יבול של 110.5 ק"ג תמרים, משקל הפירות לאשכול בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית הינו 12.9 ק"ג בממוצע, 6.7 ק"ג בטיפול האבקה לא אלקטרוסטטית ו- 113 גרם בלבד בטיפול הביקורת.

בהשוואה בין שני הניסויים נמצא יתרון ברמת מובהקות של 95% בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית בין ניסוי I לניסוי II באחוז הפרי. בניסוי I אחוז הפרי היה 35% לעומת 25% בניסוי II. ההבדל נובע מכך שבניסוי II אשכולות הפרחים הואבקו בעזרת מפורח ממרחק גדול יותר וכמות האבקה הנצרכת היתה קטנה פי 30 מאשר בניסוי I. בערכי המשקל לפרי לא היה הבדל משמעותי בין הניסויים השונים.

## 4.5 ניסויי שדה בהרבצת אבקה בשקדים

### 4.5.1 תאור הניסויים

במסגרת ניסויי השדה בשקדים בוצעו שני ניסויים על מנת לברר אם קיים קשר בין השיטה ומועד ההאבקה לבין אחוז חנטת הפרחים המתקבל ומשקל הפירות. הניסויים התקיימו במטע שקדים של קיבוץ נחשון.

#### הרכב האבקה

אבקת השקדים בניסוי הינה מזן Price ונרכשה מחברת Paramount בארה"ב. בשל שיטת איסוף האבקה הנהוגה בחברה זו לא התקבלה אבקת שקדים נקיה אלא תערובת של גרגרי אבקה וחלקי פרח שונים (בעיקר אבקנים) בגדלים של עד 800 מיקרון. נפח האבקה הנקיה הינו כ- 15% מנפח התערובת. הספיקה המסית של האבקה עמדה על כ- 200 mg/sec.

#### ניסוי I - ניסוי האבקת שקדים באמצע תקופת הפריחה.

הניסוי התבצע בשלושה עצי שקד מזן מ.ד. ושלושה מזן נאפא. בכל עץ נערכו חמישה טיפולים, כל טיפול כלל ענף אחד. המרחק בין עץ לעץ היה לפחות עץ אחד והעצים הקיצוניים היו במרחק של לפחות 3 עצים מקצה השורה, לא נבחרו עצים בשורות קיצוניות. בחלק מן הטיפולים נעשה שימוש במערכת פיזור אבקת פרחים שתוארה בפרק 4.2. הניסוי נערך במועד של שיא הפריחה ובמשך השבועיים שלאחריו. ההאבקה המלאכותית התקיימה בתאריכים: 14/2/95, 19/2/95, 24/2/95 ו- 28/2/95.

פירוט הטיפולים שנערכו:

א) האבקה אלקטרוסטטית - האבקה פוזרה על ידי מערכת פיזור האבקה, בפוטנציאל חשמלי של 80 kV, כל קבוצת פרחים הואבקה במשך כשניה, הפרחים כוסו בשק רשת כל העת מלבד בשעת ההאבקה, הרשת מנעה כניסת חרקים מאביקים ובלמה חלק מהרוח באזור הפרחים. הפרחים בטיפול זה קיבלו אבקה מן המכשיר בלבד.

ב) האבקה לא אלקטרוסטטית - זהה לטיפול א' מלבד הפוטנציאל החשמלי שנקבע ל-0 kV (האבקה לא טעונה אלקטרוסטטית).

ג) האבקת דבורים - הפרחים בטיפול זה היו חשופים כל שעות היממה להאבקה על ידי דבורים מכוורות שפוזרו במטע, הענפים בטיפול זה לא כויסו ולא נעשה שימוש במערכת פיזור האבקה.

ד) האבקה אלקטרוסטטית + האבקת דבורים - הענפים בטיפול זה לא כויסו והיו חשופים כל העת להאבקת דבורים, בנוסף בוצעה האבקה אלקטרוסטטית בפוטנציאל חשמלי של 80 kV בעזרת מערכת פיזור האבקה, כאשר כל קבוצת פרחים הואבקה במשך כשנה.

ה) האבקה ספונטנית (ביקורת) - הענפים בטיפול זה כויסו כל משך הפריחה, לא בוצעה שום האבקה והפרחים לא קיבלו אבקה משום מקור חיצוני.

#### ניסוי II - ניסוי האבקת שקדים בסוף תקופת הפריחה.

בוצעו שני טיפולים בשני עצי שקדים מזן מ.ד. במרכז המטע, טיפול אחד - האבקה אלקטרוסטטית (א"ס) והשני, האבקת דבורים. הניסוי התרחש בסוף הפריחה כאשר נותרו כ- 10% מן הפרחים. ההאבקה אלקטרוסטטית בוצעה פעם אחת בתאריך: 28/2/95.

### 4.5.2 תוצאות ודיון

#### ניסוי I -

בניסויים נבדקו 2410 פרחים בששת העצים, בדיקת החנטים וספירתם נעשתה חודש לאחר מועד ההאבקה האחרון ב- 28/3/95. קטיפת הפירות ושקילתם נעשתה ביולי עבור זן מ.ד. ובאוגוסט עבור זן נאפא. גרעין השקד והזרע נשקלו לאחר ייבוש בתנור בטמפרטורה של 65°C במשך 24 שעות.

טבלה 4.2: מספר הפרחים לפי טיפול ועץ שהשתתפו בניסוי.

Table 4.2: Number of flower per treatment and tree that participate in the experiment.

האבקה	האבקה א"ס +	האבקת	האבקה לא	האבקה	עץ מספר	זן
ספונטנית	דבורים	דבורים	א"ס	א"ס		
134	55	94	82	87	1	
56	46	43	52	71	2	נאפא
171	132	167	213	107	3	
103	29	75	22	35	1	
54	32	99	43	105	2	מ.ד.
78	46	52	49	78	3	

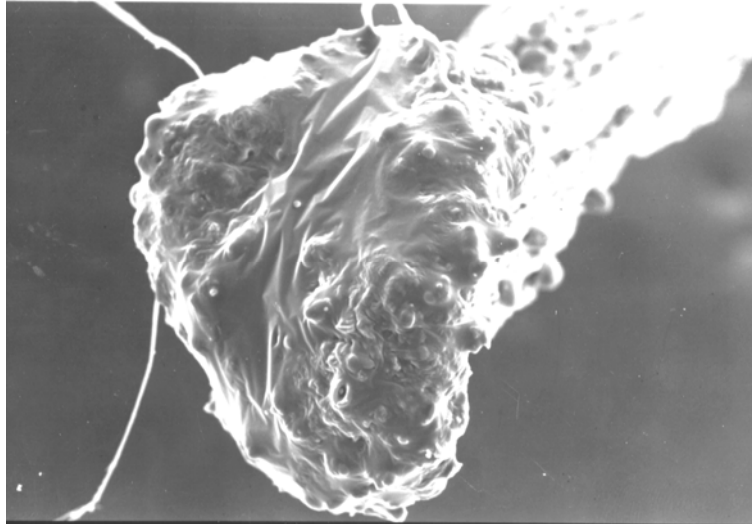
בטבלה 4.3 מובאים אחוזי החנטה הסופיים וכן הממוצע וסטיית התקן בכל טיפול וזן. עבור זן נאפא, טיפול האבקה האלקטרוסטטית הניב אחוז פירות גבוה יותר מאשר טיפול האבקה לא אלקטרוסטטית. ניתן להסביר תוצאה זאת בכך שגררי אבקה רבים יותר נצמדים לעלי עקב הכוחות האלקטרוסטיים. תוצאה זו תועדה ומובאת בצירור מס' 4.12. ניתן לראות ההגדלה תחת מיקרוסקופ אלקטרוני את צפיפות גררי האבקה על צלקת שקד שלאחר האבקה ללא אלקטרוסטטיקה (א) ולאחר האבקה אלקטרוסטטית (ב). נתקבל מן הניסוי שהאבקה באמצעות אלקטרוסטטיקה היתה יעילה מהאבקת דבורים, למרות שבטיפול זה הפרחים היו חשופים כל שעות היממה לדבורים. האבקת הדבורים תלויה בגורמי סביבה והתנהגות הדבורים אשר פוגעים

ברמת ההאבקה ויעילותה. השילוב של האבקה אלקטרוסטטית + האבקה דבורים נתן את האחוזים הגבוהים ביותר בין כל הטיפולים אך נמוכים מסכום אחוזי החנטה בטיפול האבקה אלקטרוסטטית ובטיפול האבקה דבורים. ניתן להסביר תוצאה זו כנראה בשל מגבלת פוטנציאל החנטה של העץ. סטיית התקן של טיפול ההאבקה האלקטרוסטטית נמוך ועומד על 10% מהממוצע. תוצאה זו מצביע על אפשרויות בקרת ההאבקה הטמונות בשימוש בהאבקה אלקטרוסטטית בזן זה. בזן מ.ד. התוצאות דומות וניראה שוב יתרון להאבקה האלקטרוסטטית על פני האבקה דבורים והאבקה לא אלקטרוסטטית. סטיית התקן גבוהה ומגיעה עד לערכים של עד 50% מן הממוצע. יש לשייך תוצאה זו כנראה בשל מצבם הירוד של העצים והפגמים הרבים שבפרחי זן זה בהשוואה לזן נאפא. בכל העצים אחוז החנטה בטיפולי ההאבקה הספונטנית עומד על אחוזים בודדים מאחר והשקד אינו יכול להאביק את עצמו. הפירות הבודדים שנוצרו נבעו מהאבקה לא מכוונת או מפגם במנגנון אי ההתאם העצמי. במבחנים סטטיסטיים (t-test) לא נמצאה מובהקות בשוני בין האבקה אלקטרוסטטית להאבקה לא אלקטרוסטטית עבור זן נאפא אך נמצא כי אחוז החנטה בהאבקה אלקטרוסטטית גבוה מאשר זה שבהאבקה לא אלקטרוסטטית במובהקות של 85%. אחוז החנטה בטיפול האבקה אלקטרוסטטית + דבורים גבוה מאשר בהאבקה לא אלקטרוסטטית במובהקות של 90%. כמו כן נמצאה באופן דומה מובהקות בטיפול האבקה אלקטרוסטטית בהשוואה להאבקה דבורים. בזן מ.ד. אין מובהקות בין הטיפולים השונים אך הממוצע מראה על יתרון להאבקה האלקטרוסטטית ולהאבקה אלקטרוסטטית + דבורים על פני האבקה לא אלקטרוסטטית והאבקה דבורים בלבד.

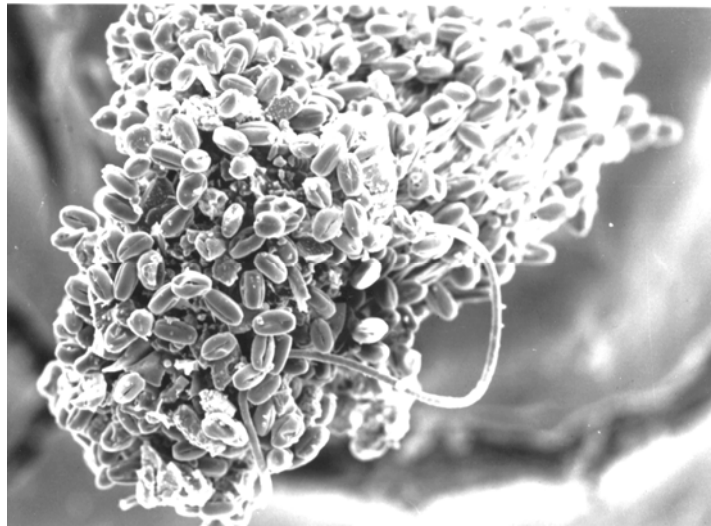
טבלה 4.3 : אחוז החנטה הסופי עבור הטיפולים, העצים והזנים השונים.

Table 4.3: Final fruit set percentage for the different treatments and trees.

האבקה ספונטנית	האבקה א"ס + דבורים	האבקה דבורים	האבקה לא א"ס	האבקה א"ס	עץ מספר	זן
3.0	65.5	38.3	45.1	46.0	1	נאפא
3.6	73.9	25.6	38.5	39.4	2	
1.8	32.6	17.4	16.4	47.7	3	
2.8	57.3	27.1	33.3	44.4	ממוצע	
0.9	21.8	10.5	15.0	4.3	סטיית תקן	
3.9	58.6	22.7	68.2	80.0	1	
0.0	37.5	13.1	39.5	37.1	2	מ.ד.
1.3	56.5	51.9	22.4	35.9	3	
1.7	50.9	29.2	43.4	51.0	ממוצע	
2.0	11.6	20.2	23.1	25.1	סטיית תקן	



(ב)



ציור מס' 4.12: צלקת פרח שקד לאחר פיזור אבקת פרחים רגילה (א) ואבקת פרחים הטעונה אלקטרוסטטית (ב). הגדלה פי 100.

Fig. 4.12: Almond flower stigma after deposition of uncharged pollen (א) and electrostatic charged pollen.

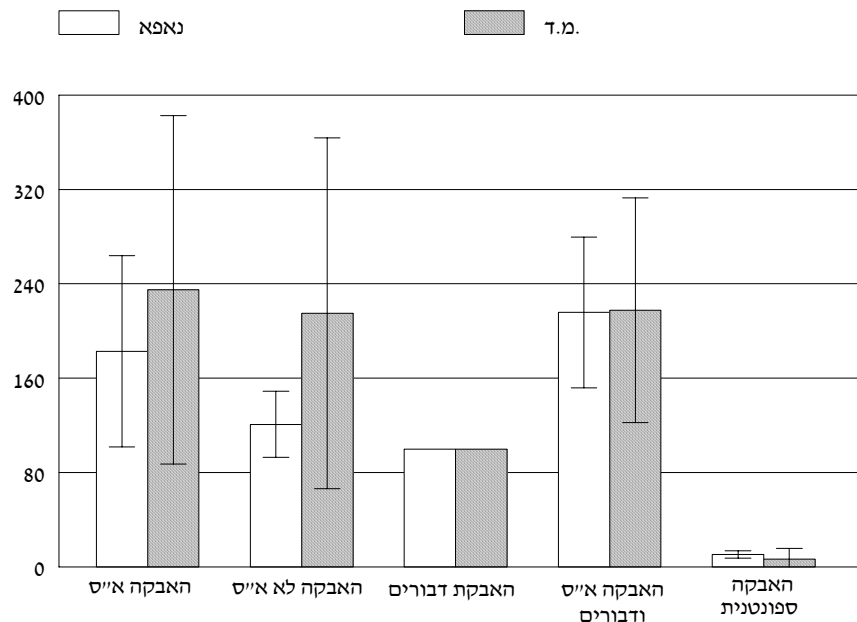
בציור מס' 4.13 נראים אחוזי השיפור הממוצעים בחנטה בטיפולים השונים בהשוואה לאחוז החנטה בטיפול האבקת דבורים, שהיא ההאבקה הנפוצה והמקובלת ביותר כיום במטעי שקדים. בזן נאפא מתקבל שיפור ממוצע של 83% בהאבקה אלקטרוסטטית ושיפור של כ- 116% בהאבקה אלקטרוסטטית + האבקת דבורים, ואילו האבקה לא אלקטרוסטטית משפרת רק ב- 20% בלבד בהשוואה להאבקת דבורים. בזן מ.ד. אחוזי שיפור החנטה עבור הטיפולים בהאבקה אלקטרוסטטית, האבקה לא אלקטרוסטטית והאבקה אלקטרוסטטית + האבקת דבורים נעים בין 115% ל- 135% בהתאמה. סטיית התקן בזן מ.ד. גבוהה בהרבה מאשר לזו שהתקבלה בזן נאפא ומגיעה לערכים של עד פי 5. סטיית תקן זו ניתן ליחס כאמור עקב מצבם הירוד של העצים מזן זה. בשלושת טיפולים אלה פוזרה אותה כמות אבקה ונראה יתרון ברור בזן נאפא לטיפולים שכללו האבקה אלקטרוסטטית. בטבלה 4.4 מפורטים תוצאות מבחני ANOVA ו- Fisher PLSD לבדיקת השוני בין הטיפולים השונים ברמת מובהקות של 95% עבור זני נאפא ומ.ד.



טבלה 4.4: השוני בשיעור החנטה בין הטיפולים השונים בזן נאפא במבחני ANOVA ו-Fisher PLSD ברמת מובהקות של 95%.

Table 4.4: The difference between the treatment according to Anova and Fisher PLSD tests with significance of 95%.

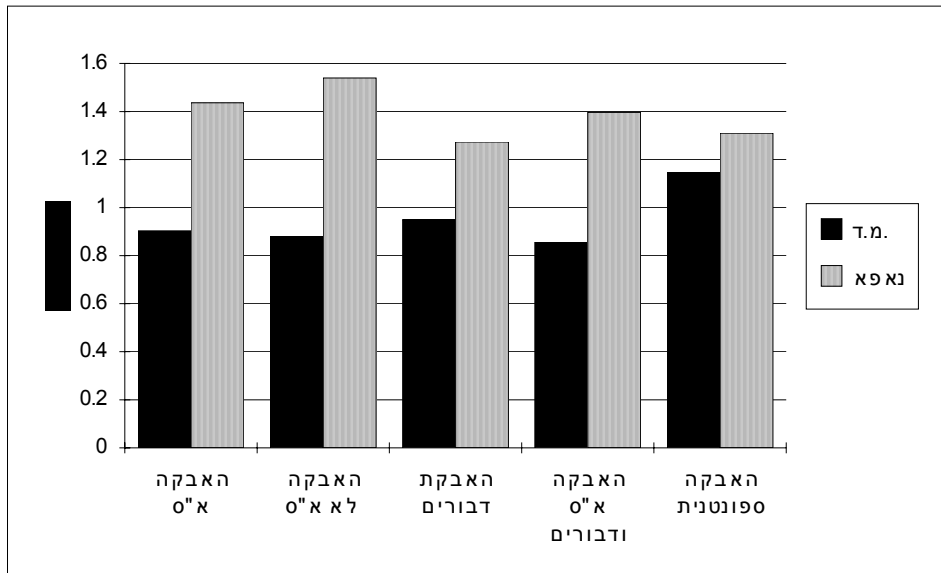
האבקה ספונטנית	האבקה א"ס + דבורים	האבקה דבורים	האבקה לא א"ס	האבקה א"ס	
				-	האבקה א"ס
			-	לא מובהק	האבקה לא א"ס
		-	לא מובהק	מובהק	האבקה דבורים
	-	מובהק	מובהק	לא מובהק	האבקה א"ס + דבורים
-	מובהק	מובהק	מובהק	מובהק	האבקה ספונטנית



ציור מס' 4.13: שיעור החנטה (באחוזים) יחסית לטיפול של אבקה דבורים בזני "נאפא" ו"מ.ד." Fig 4.13: Fruit set (in percentage) for Napa and M.D. comparing to bees pollination.

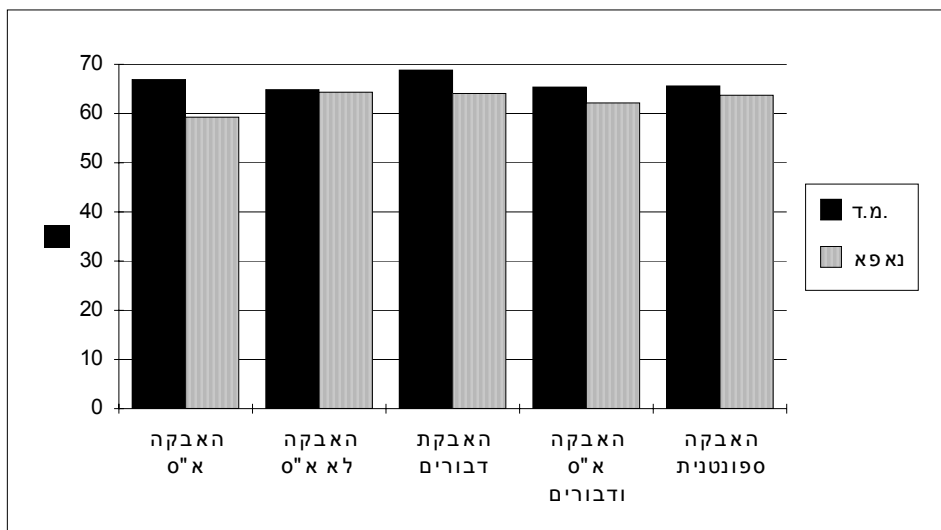
בחינת תוצאות איכות הפירות נבדקה לאחר חמישה חודשים מיום ההאבקה (ציור 4.14). בציור זה רואים כי משקל זרע ממוצע בזן מ.ד. הינו 0.9 גרם עם סטיית תקן כללית של 9%. סטיית התקן לטיפול נעה בין 1.5% ל-11%. בזן נאפא משקל הזרע הממוצע הינו 1.47 גרם, סטיית התקן הכללית 32% וסטיית התקן לטיפול נעה בין 10% ל-35%. סטיית התקן הגבוהה בזן נאפא נובעת משכיחות גבוהה יחסית של הזרעים הכפולים ביבול אשר משקלם גבוה ממשקל זרע יחיד. ציור מס' 4.14 מתאר את משקל הזרע הממוצע בכל טיפול. ניתן להבחין כי משקל הזרעים הממוצע דומה בכל הטיפולים מאותו זן ואין עדיפות משקלית לאחד מהם. היחס בין משקל הזרע למשקל

הגרעין, אחיד ונע בין 59% ל-68% בכל הטיפולים (ציור מס' 4.15). לא נמצאה מובהקות לשוני במשקל הזרעים והפירות בין הטיפולים השונים. תוצאות אלו מצביעות על כך שלמרות השיפור בחנטה כתוצאה מהאבקה אלקטרוסטטית, לא ניכרת ירידה במשקל הזרע ומכאן שאין ירידה באיכות הפרי.



ציור מס' 4.14: ממוצעי משקל הזרעים בזנים ובטיפולים השונים.

Fig 4.14: Seed weight averages for different treatments and almond species.



ציור מס' 4.15: ממוצעי אחוז משקל הזרע ממשקל גרעין השקד.

Fig 4.15: The average of the ratio in percentage of the seed weight to the core weight.

## ניסוי II-

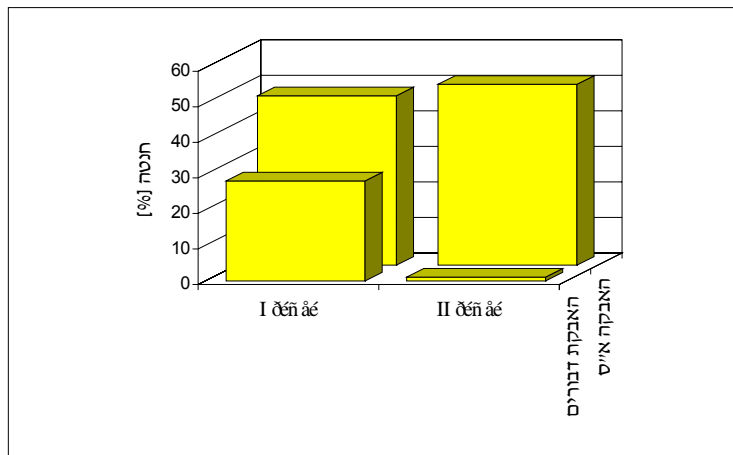
בניסויים נבדקו 110 פרחים בשני עצים מזן מ.ד., בדיקת החנטים וספירתם נעשתה חודש לאחר מועד ההאבקה ב- 28/3/95. בטבלה 4.5 מפורט מספר הפרחים בכל טיפול ועץ שנבדקו בניסוי.

טבלה 4.5 : מספר הפרחים ואחוז החנטה לפי טיפול ועץ.

Table 4.5: Number of flower and fruit set percentage for treatments and trees.

האבקה אלקטרוסטטית	האבקה דבורים		עץ מספר
30	47	מספר פרחים	1
63.3	2.1	אחוז חנטה	
13	20	מספר פרחים	2
38.5	0.0	אחוז חנטה	

מעיון בטבלה 4.5 ובציור מס' 4.16 ניראה כי אחוז החנטה בטיפול האבקה הדבורים בסוף תקופת הפריחה עומד על כ- 1% והוא נמוך בצורה משמעותית מאותו טיפול בניסוי I שהתקיים באמצע תקופת הפריחה (28% חנטה בממוצע). נמצא כי בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית אין כמעט שינוי באחוז החנטה בין הניסוי השני לראשון: 51% בניסוי השני לעומת 48% בניסוי הראשון. הירידה באחוז החנטה בהאבקה דבורים נובעת מירידת אטרקטיביות הפרחים עבור הדבורים עקב מספר הפרחים הקטן, ריכוזם הנמוך, ופריחת גידולים מתחרים ההופכים את ביקור הדבורים בפרחים והאבקתם לאי כדאית. בהאבקה האלקטרוסטטית אין שינוי מאחר והיא אינה תלויה בתנאי הפריחה ובגורמים הסביבתיים. בוצע מבחן ANOVA ומצביע ברמת מובהקות של 95% על השוני בין טיפול ההאבקה האלקטרוסטטית להאבקה דבורים.



ציור מס' 4.16: אחוזי חנטה ממוצעים בניסוי I, II עבור טיפול האבקה דבורים וטיפול האבקה אלקטרוסטטית.

Fig 4.16: The averages fruit set percentage in experiment I and II for the bees pollination and electrostatic pollination treatments.

## פרק 5: דיון ומסקנות

### 5.1 מודל פרח תמר/אבקה טעונה אלקטרוסטטית

השדה החשמלי המרבי נמצא בקצה העלי, ונובע מהמבנה הגיאומטרי הצר של העלי ומבליטתו מעל לפרח. תכונות אלו גורמות לריכוז מטענים גבוה בקצה העלי. ממרכז הפרח ועד קצה העלי השדה החשמלי הוא אפס מאחר ואזור זה נמצא בתוך הפרח המשמש כמוליך שם הפוטנציאל החשמלי קבוע.

במודל הדו-ממדי, השדה החשמלי המרבי גדל מערך של כ-  $27 \text{ kV/cm}$  עבור פרח חסר עלי ועד  $61 \text{ kV/cm}$  לעלי באורך 2 מ"מ. מעלי באורך של 2 מ"מ ועד לאורך של 5 מ"מ השדה החשמלי בקצה העלי קבוע וערכו כ-  $62 \text{ kV/cm}$ . השדה החשמלי המקסימלי על פני מעטפת הפרח, קטן ב-60% עם התארכות העלי ממצב של פרח ללא עלי ועד פרח בעל עלי באורך 5 מ"מ. עם התארכות העלי השדה החשמלי שבראשו גדל בהשוואה לשדה שעל פני מעטפת הפרח מיחס של 1.0 עבור פרח חסר עלי ועד ליחס של 5.4 עבור פרח בעל עלי באורך 5 מ"מ.

לתוצאה שהתקבלה משמעות רבה שכן היא מסווגת את הפרחים, לכאלה שבהם עשויה להיות תרומה גדולה להאבקה האלקטרוסטטית בהגדלת היעילות והקטנת כמות האבקה, ולפרחים שעקב מורפולוגיה מסוימת לא יתקבל יתרון בהאבקה זו.

לחיזוק ממצאי המודל ולקרוב מדויק יותר, נבנה מודל תלת ממדי למערכת דמוי פרח תמר / ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית, עבור פרחים בעלי עלי באורך שונה. השדה החשמלי המרבי גדל פי 2 במודל דמוי פרח חסר עלי בהשוואה למודל דמוי פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ. בדומה למודל הדו ממדי, במודל תלת ממדי של פרח בעל עלי באורך גדול מ- 2 מ"מ, קצב העלייה בערך השדה החשמלי בראש העלי מתמתן עם התארכות העלי. יתכן שהסיבה לכך נובעת מכך שעלי באורך 2 מ"מ ומעלה נחשב "מנותק" משאר הפרח מבחינה אלקטרוסטטית-גיאומטרית, ולכן השפעת הפרח על עוצמת השדה החשמלי בעלי זניחה וכמעט אינה מורגשת. השדה החשמלי המקסימלי על פני מעטפת הפרח קטן ב- 34% עם התארכות העלי ממצב של פרח ללא עלי ועד פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ מאחר וכאמור מבחינה אלקטרוסטטית הוא מוסתר על ידי העלי. עם התארכות העלי השדה החשמלי שבראשו גדל בהשוואה לשדה שעל פני מעטפת הפרח מיחס של 1.0 עבור פרח חסר עלי ועד יחס של 3.0 עבור פרח בעל עלי באורך 4 מ"מ. יחס השדות מהווה מדד לאטרקטיביות צלקת העלי עבור גרגרי אבקה טעונים במטען אלקטרוסטטי, ככל שהיחס יהיה גבוה יותר, מספר רב יותר של גרגרים ינועו לצלקת במקום למעטפת הפרח.

מניתוח התוצאות ניתן להסיק כי השדה החשמלי שבראש העלי יגבר עם התארכות העלי עד ל- 2 מ"מ. מעבר לאורך עלי זה השדה החשמלי המרבי כמעט לא ישתנה אך אטרקטיביות העלי תמשיך לגדול מאחר והשדה החשמלי שעל פני מעטפת הפרח קטן עם התארכות העלי אף מעבר ל- 2 מ"מ. ניתן לומר שבפרחים בעלי עלי באורך 2 מ"מ ומעלה יגיע מספר דומה של גרגרים לכל הפרח אך מספר רב יותר של גרגרים יגיעו לעלי על חשבון מעטפת הפרח.

## 5.2 סימולציית מסלול תנועת גרגרים

גרגרי האבקה הניתקים מענן האבקה הטעון מוסטים לכיוון הפרח. ככל שהגרגרים ניתקים מנקודה הקרובה יותר למרכז הענן ההטיה אל הפרח מוגברת. עבור סימולציה הכוללת טעינה אלקטרוסטטית יורבצו על ראש העלי גרגרים אשר ניתקו מן הענן ברדיוס של עד 3 מ"מ ממרכזו. על כל העלי גרגרי אבקה אשר ניתקו מן הענן ברדיוס של עד 8.2 מ"מ ממרכזו. מהשוואת כמויות האבקה אשר יורבצו על ראש העלי מתקבלת עליה של פי 225 במקרה עם טעינה אלקטרוסטטית בהשוואה למקרה ללא טעינה. אל מעטפת הפרח, תגיעה כמות גרגרים גדולה פי 36 במקרה עם אלקטרוסטטיקה בהשוואה למקרה ללא אלקטרוסטטיקה. אטרקטיביות העלי יחסית למעטפת הפרח גדלה פי 6.25 כאשר הגרגרים טעונים חשמלית. צפיפות הגרגרים על העלי גבוהה פי 4.6 מאשר על מעטפת הפרי, תוצאה זו נמוכה יחסית לתוצאות ניסוי המעבדה המובאות בפרק 4 ונובעת ממבנה האלמנטים ורישותם, מאופן קירוב ערכי ווקטור השדה החשמלי במיקום הגרגר, מהזנחת כוחות ההצמדה ושדה הזרימה באזור הפרח ומההנחה כי מיקום הענן וערכי השדה החשמלי במרחב הבעיה קבועים בזמן.

## 5.3 ניסויי מעבדה ושדה

### ניסוי מעבדה

מניתוח התוצאות שהתקבלו במערכת ניסוי המעבדה דמוי פרח תמר / ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית נמצא כי בפוטנציאל 80 kV צפיפות הגרגרים בצלקת גבוהה בערך פי 60 מצפיפות הגרגרים במעטפת הפרח בעוד שבמקרה ללא אלקטרוסטטיקה היחס הינו בערך פי 5 בלבד. עם העלייה בפוטנציאל החשמלי ובצפיפות המטען בענן האבקה, היחס שבין צפיפות הגרגרים בעלי לבין צפיפות הגרגרים על מעטפת הפרח גדל. התוצאות הללו מתיישבות היטב עם הסימולציה שבוצעה באמצעות שיטת האלמנטים הסופיים עבור המודל דמוי פרח תמר עם עלי באורך 4 מ"מ והן עבור סימולציית תנועת הגרגרים. השדה החשמלי בצלקת במקרה זה גבוה פי 3 מאשר השדה המרבי על מעטפת הפרח. יחסי צפיפות הגרגרים על חלקי המודל השונים תואמים את פילוג השדה החשמלי שחושב בסימולציה. ההתאמה הינה איכותית ולא כמותית שכן מחד, לא נלקחו בסימולציה כל התנאים בהם בוצע הניסוי כגון, שינוי מבנה השדה החשמלי בזמן, וקיום שדה הזרימה שבניסוי ומאידך תנאי הניסוי לא שמרו על תנאים קבועים. השינוי בצפיפות במקרה ללא אלקטרוסטטיקה נובע משדה הזרימה הגורם לתנועת הגרגרים סביב הכדור. ניתן לראות כי הניתוח של כמות הגרגרים באיזור מסוים באופן יחסי לכמות הגרגרים שעל המעטפת מראה מגמות עקביות התואמות את ממצאי המודל המחושב.

### ניסויי שדה בתמרים

בשני הניסויים טיפול באמצעות האבקה לא אלקטרוסטטית הניב כ- 14% פרי מכלל הפרחים בכל עץ, ובטיפול הביקורת אחוז הפרי היה 0.1% בממוצע. אחוז הפרי בטיפול האבקה האלקטרוסטטית הינו הגבוה ביותר והיה 35% בממוצע בניסוי I ו- 25% בממוצע בניסוי II. ההבדל נובע מכך שבניסוי II האשכולות הואבכו ממרחק גדול יותר בעזרת מפוח ובכמות אבקה קטנה פי

30 מאשר בניסוי I. במבחנים סטטיסטיים התקבלה מובהקות של 99% בבדיקת השוני בין הטיפולים השונים. בהשוואה בין שני הניסויים נמצא יתרון במובהקות של 95% בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית בין ניסוי I לניסוי II באחוז הפרי. במשקל לפרי לא היה הבדל משמעותי בין הניסויים השונים. מאחר והתוספת באחוז הפרי הינה זניחה בהשוואה לתוספת האבקה בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית בניסויים I ו-II נראה כי בניסוי I האשכולות הואבכו בעודף של אבקה עבור שיטת ההאבקה האלקטרוסטטית. יש להניח כי מאחר ופרח התמר מתאים להאבקה אלקטרוסטטית האבקה אלקטרוסטטית של 100 mg לסנסן בתוספת למפוח תיתן את אותן התוצאות כמו בניסוי I.

### ניסויי שדה בשקדים

בניסויי השקדים נמצא יתרון ברור לאחוז החנטה בהאבקה אלקטרוסטטית בהשוואה להאבקה לא אלקטרוסטטית ניתן להסביר תוצאה זאת בכך שהשדה החשמלי באזור הצלקת גבוה יחסית וגרגרי אבקה טעונים נצמדים אליו עקב הכוחות האלקטרוסטטיים. בניסוי I נתקבל שהאבקה באמצעות אלקטרוסטטיקה היתה יעילה מהאבקת דבורים. זאת למרות שבטיפול זה הפרחים היו חשופים כל שעות היממה לדבורים. האבקת הדבורים תלויה בגורמי סביבה והתנהגות הדבורים אשר פוגעים ברמת ההאבקה ויעילותה. השילוב של האבקה אלקטרוסטטית + האבקת דבורים נתן את האחוזים הגבוהים ביותר בין כל הטיפולים אך נמוכים מסכום אחוזי החנטה בטיפול האבקה אלקטרוסטטית ובטיפול האבקת דבורים. ניתן להסביר תוצאה זו כנראה בשל מגבלת פוטנציאל החנטה של העץ העומדת על כ- 55%. אחוז החנטה בטיפולי ההאבקה הספונטנית עומד על אחוזים בודדים מאחר והשקד אינו יכול להאביק את עצמו והפירות הבודדים שנוצרו נבעו מהאבקה לא מכוונת או מפני שהמנגנון של אי האבקה עצמית אינו מושלם.

בניסוי II אחוז החנטה בטיפול האבקת הדבורים עומד על כ- 1% והוא נמוך בצורה משמעותית מאותו טיפול בניסוי I (28% חנטה בממוצע). נמצא כי בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטית אחוז החנטה דומה בין שני הניסויים: 51% בניסוי II לעומת 48% בניסוי I. הירידה באחוז החנטה בהאבקת דבורים נובעת מירידת אטרקטיביות הפרחים עבור הדבורים עקב מספר הפרחים הקטן (איזיקוביץ ולופו 1989), ריכוז הנמוך, ופריחת גידולים מתחרים ההופכים את ביקור הדבורים בפרחים והאבקתם לאי כדאית. בהאבקה האלקטרוסטטית אין שינוי מאחר והיא אינה תלויה בתנאי הפריחה ובגורמים הסביבתיים. מבחן ANOVA מצביע על מובהקות של 95% בשוני בין טיפול ההאבקה האלקטרוסטטית להאבקת דבורים.

משקל הזרעים הממוצע דומה בכל הטיפולים מאותו זן ואין עדיפות משקלית לאחד מהם. היחס בין משקל הזרע למשקל הגרעין, אחיד ונע בין 59% ל-68% בכל הטיפולים. לא נמצאה מובהקות לשוני במשקל הזרעים והפירות בין הטיפולים השונים. תוצאות אלו מצביעות על כך שלמרות השיפור בחנטה כתוצאה מהאבקה אלקטרוסטטית, לא ניכרת ירידה במשקל הזרע ומכאן שאין ירידה באיכות הפרי. בעץ השקד אין קשר בין כמות היבול או אחוז החנטה לבין משקל פרי.

בבחינת תוצאות הניסויים נראה כי השימוש בהאבקה אלקטרוסטטית מגדיל את מספר גרגרי האבקה הנוחתים על צלקות הפרחים, באופן יחסי לשאר חלקי הפרח ולסביבה. עקב כך מתאפשרת הקטנת כמות האבקה המואבקת והגדלת אחוז החנטה והפרי ללא פגיעה בגידול ובאיכות היבול.

## פרק 6: סיכום והצעות להמשך

### 6.1 סיכום

בעבודה הנוכחית הוצג הצורך בהגברת יעילות ההאבקה. הוצע להשתמש לשם כך בהאבקה אלקטרוסטטית. בתחילת העבודה מובא סקר ספרות רחב הכולל תאור תכונות השקד והתמר שנבחרו כגידולים לעבודה זו. חלק נרחב מוקדש לסקירת השימושים באמצעים אלקטרוסטטיים בצמחים ובבעלי חיים. כמו כן מובאת סקירה של טכניקות וניסויים בריסוס אלקטרוסטטי בחקלאות. הסקר הספרותי מסתיים בסקירת שיטות מתמטיות ונומריות לחישוב פרמטרים אלקטרוסטטיים במערכות מורכבות ובשיטות ניסיוניות למדידת מטען חשמלי בחלקיקים. בהמשך מנוסח מודל נומרי המשתמש בשיטת אלמנטים סופיים לחישוב השדה החשמלי והכוחות הפועלים במערכת דמוי פרח תמר/ענן אבקה ונערכה סימולציה המחשבת את מסלול תנועת הגרגר ומקום נחיתתו על הפרח בהזנחת פרמטרים התלויים בזמן. בהמשך העבודה מדווח על ניסוי מעבדה לאימות המודל הנומרי. בחלק האחרון מדווחים ניסויי שדה שנערכו בתמרים ושקדים לבדיקת יעילות ההאבקה האלקטרוסטטית.

עיקרי ממצאי העבודה מסוכמים בנקודות הבאות:

1. נבחנו סימולציות בשיטת אלמנטים סופיים למודל האבקה אלקטרוסטטית. המודלים נבנו באופן דומה למודלים של בעיות מעבר חום, כאשר התוצאות עברו המרה מתאימה מפתרון בעיית חום לבעיה אלקטרוסטטית. נעשה שימוש בתוכנת ANSYS 5.1 ובמחשב (ALFA DEC 3000) של DIGITAL.
2. נבנה מודל אלמנטים סופיים דו-ממדי ומודל תלת-ממדי למערכת ענן אבקה טעונה אלקטרוסטטית מעל כדור דמוי פרח תמר ועלי. השדה החשמלי הגבוה ביותר נמצא בקצה העלי. בכל המקרים נראה יתרון ברור עבור הפרחים בעלי עלי ארוך ביותר, הן מבחינת עוצמת השדה והן מבחינת יחס השדות בקצה העלי בהשוואה לזה שבמעטפת הפרח.
3. שיפור המודל מדו-ממדי לתלת-ממדי מאפשר עריכת סימולציה על פרח בעל מורפולוגיה כל שהיא. בעזרת המודל התלת-ממדי ניתן לקבל תוצאות מקורבות יותר למקרה האמיתי ולחשב על פיהן את השדה החשמלי והכוחות השולטים במערכת. המודל הדו-ממדי הינו פשוט יותר, צורך פחות זיכרון ומהיר בהרבה מאשר המודל התלת-ממדי. שימושיו העיקריים הם בדיקה איכותית ומהירה של מקרים בעלי סימטריה והשוואה בין מקרים שונים או בין ערכי שדה שונים ללא צורך בעריכת ניסוי.
4. נערכה סימולציה לחישוב מסלול תנועת גרגרים הנותנת הערכה כמותית מקורבת למספר גרגרי האבקה המורבצים על העלי והפרח. הסימולציה מראה את השיפור בתוספת האבקה המורבצת בהשוואה למקרה ללא טעינה חשמלית ואת אטרקטיביות העלי לעומת מעטפת הפרח כתוצאה מהטעינה האלקטרוסטטית.
5. נערך ניסוי מעבדה על מודל דמוי פרח תמר/ענן אבקה טעון לאימות המודל הנומרי. מודל הניסוי נבנה באותן פרופורציות גיאומטריות של מודל הסימולציה. נמצא כי צפיפות הגרגרים על ראש הצלקת גדלה יחסית לצפיפות הגרגרים על מעטפת הפרח מפי 5 בפוטנציאל 0 kV ועד פי 60 בפוטנציאל 80 kV. תוצאות אלו מתאימות איכותית לתוצאות המודל הנומרי.



6. נערכו ניסויי שדה בתמרים לבדיקת יתרון ההאבקה האלקטרוסטטית. בניסוי הראשון כל אשכול הואבק ב- 300 mg אבקה ובשני ב- 10 mg. אחוז הפרי בטיפול ההאבקה האלקטרוסטטי היה גבוה ב- 157% בממוצע מטיפול האבקה הלא אלקטרוסטטי בניסוי הראשון, ובניסוי השני גבוה ב- 85%.
7. נערכו ניסויי שדה בשקדים לבדיקת יעילות ההאבקה האלקטרוסטטית בגידול נוסף שבו קיים קושי בהאבקה טבעית. הניסוי הראשון נערך בתקופת שיא הפריחה והשני בסופה. נמצא שיפור של כ- 70% באחוז הפרחים שחנטו לאחר קבלת טיפול באמצעות האבקה אלקטרוסטטית בהשוואה להאבקה דבורים בלבד. בטיפול שכלל האבקה דבורים + האבקה אלקטרוסטטית נמצא יתרון החנטה על פני טיפול בהאבקה אלקטרוסטטית בלבד. בשני הניסויים החנטה בטיפול האבקה אלקטרוסטטי היה כ- 50%, החנטה בטיפול האבקה הדבורים היה 28% בממוצע בניסוי הראשון ו- 1.0% בלבד בניסוי השני.
8. ניסויי השדה הראו את היתרון הטמון בהאבקה אלקטרוסטטית והאפשרויות הרבות הגלומות בפיתוח טכנולוגיות להאבקה אלקטרוסטטית באופן מסחרי בחקלאות המודרנית.
9. העבודה הוסיפה עוד נידבך וכלים להערכת הפוטנציאל של האבקה אלקטרוסטטית גם באופן כמותי.

## 6.2 הצעות להמשך

1. בעבודה הנוכחית נבנה מודל אלמנטים סופיים לבחינת יחסי הגומלין של פרח ואבקה בשדה אלקטרוסטטי כאשר השדה החשמלי במערכת הינו קבוע בזמן. מאחר ובבעיה האמיתית הענן נע ועוטף את הפרח, השדה החשמלי באזורים מסוימים גדל מאוד וכתוצאה מכך גם צפיפות האבקה המורבצת באזורים אלה תגדל. רצוי לפתח מודל נומרי דינמי הבודק את השתנות השדה החשמלי ותנועת ענן האבקה בזמן אשר יצפה טוב יותר את הגדלת כמויות האבקה באזורים השונים בפרח.
2. מומלץ לערוך סימולציה ולמצוא פתרון למודל נומרי משופר למקרה המתקרב לאמת, הכולל שדה זרימה קבוע, פועם, טורבולנטי וכוחות הצמדה.
3. עריכת ניסויים על מגוון רחב יותר של גידולים בהם יש יתרון צפוי להאבקה אלקטרוסטטית, באופן חצי מסחרי ומסחרי לבדיקת האפקט המלא המתקבל בהאבקה אלקטרוסטטית.
4. פיתוח מכשיר לקציבה מדויקת של אבקה לשם קבלת תוצאות סימולציה וניסוי מדויקות.
5. שיפור ציוד ההאבקה וניסויי בדיקה של שילוב האבקה אלקטרוסטטית בזרמי אוויר להגברת יעילות ההאבקה.

## נספחים

### נספח א' - מודל אלמנטים סופיים דו-ממדי של מערכת פרח דמוי תמר/ענן אבקה טעון אלקטרוסטטית

קובץ log של תוכנת ANSYS 5.1 לחישוב השדות החשמליים במערכת דו-ממדית של מודל דמוי פרח תמר בעל עלי באורך 2 מ"מ וענן אבקה טעון אלקטרוסטטית. התוכנה מספקת כפלט את הקואורדינטות והשדה החשמלי שבצמתים באופן גרפי ונומרי.

```

/BATCH
/COM,ANSYS REVISION 5.1          13:26:51  09/15/1996
/input,menust ,tmp ,             ,,,,,,,,,,,,,,1
BOPT,RV51,ON
/REPLOT,RESIZE
/PREP7
RECTNG,0.0002,-0.0002,0,0.004,
/AUTO, 1
/REP
L PLOT
PCIRC,0.002, ,0,360,
/AUTO, 1
/REP
RECTNG,0.02,-0.02,-0.003,0.025,
/VIEW, 1 ,,,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,3,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
APTN,P51X
/ZOOM,1,SCRN,0.004138,-0.457196,0.050644,-0.271218
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,6
AADD,P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,6
AADD,P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,6
AADD,P51X
ADELE, 4, , ,1
/VIEW, 1 ,,,1
/ANG, 1
/REP
FINI
/CLEAR,NOSTART
/COM,ANSYS REVISION 5.1          13:36:58  09/15/1995
/PREP7
PCIRC,0.002, ,0,360,
RECTNG,0.0001,-0.0001,0,0.003,

```

```

/AUTO, 1
/REP
LPLOT
RECTNG,0.02,-0.02,-0.003,0.025,
/AUTO, 1
/REP
FLST,2,3,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
APTN,P51X
/ZOOM,1,SCRN,-0.011364,-0.441697,0.093275,-0.329336
/VIEW, 1 ,,,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,6
AADD,P51X
FINI
/CLEAR,NOSTART
/COM,ANSYS REVISION 5.1          13:42:58  09/15/1995
/PREP7
PCIRC,0.002, ,0,360,
/AUTO, 1
/REP
LPLOT
RECTNG,0.0001,-0.0001,0,0.004,
/AUTO, 1
/REP
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
APTN,P51X
/AUTO, 1
/REP
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,5
AADD,P51X
/VIEW, 1 ,,,1
/ANG, 1
/REP
RECTNG,0.02,-0.02,-0.003,0.025,
/VIEW, 1 ,,,1
/ANG, 1
/REP
alist, all
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,4
APTN,P51X
/AUTO, 1
/REP
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
AGLUE,P51X

```

```

/ZOOM,1,SCRN,0.000263,-0.488192,-0.092750,-0.271218
SAVE
!*
ET,1,PLANE77
!*
!*
UIMP,1,EX, , , ,
UIMP,1,DENS, , , ,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , ,0.3,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , ,10,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , ,1,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,
!*
SAVE
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,13
FITEM,2,-14
LESIZE,P51X, , ,20,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,7
LESIZE,P51X, , ,2,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,-10
LESIZE,P51X, , ,1,1,
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
FITEM,2,15
FITEM,2,-16
LESIZE,P51X, , ,8,1,
/ZOOM,1,SCRN,-0.011364,0.689668,-0.162509,0.774908
/AUTO, 1
/REP
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,5
LESIZE,P51X, , ,20,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,6
LESIZE,P51X, , ,14,1,
SAVE
/ZOOM,1,SCRN,0.004138,-0.189852,-0.205139,-0.627675
FLST,2,3,5,ORDE,3

```

```

FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
AMESH,P51X
SAVE
/DIST,1,0.729000,1
/REP
/FOC,1,,-0.300000,,1
/REP
/FOC,1,,-0.300000,,1
/REP
/FOC,1,,-0.300000,,1
/REP
/DIST,1,0.729000,1
/REP
/DIST,1,0.729000,1
/REP
SAVE
FINISH
/SOLU
FLST,2,8,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
FITEM,2,7
FITEM,2,-10
DK,P51X,TEMP,0,,1
/AUTO,1
/REP
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,5
SFL,P51X,HFLUX,500,,
SAVE
/STAT,SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
/POST1
PLNSOL,TEMP,
/ZOOM,1,SCRN,0.000263,-0.391328,-0.185762,-0.120111
PLNSOL,TG,SUM
SAVE
FINI
/CLEAR,NOSTART
/COM,ANSYS REVISION 5.1          14:12:03  09/15/1995
/PREP7
FINI
/FILNAM,tamar4
/PREP7
PCIRC,0.002,,0,360,
RECTNG,0.02,-0.02,-0.003,0.025,
LPLOT
RECTNG,0.0001,-0.0001,0,0.006,
/ZOOM,1,SCRN,0.008014,-0.395203,-0.003613,-0.178229
FLST,2,3,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
APTN,P51X

```

נספח ב' - מודל אלמנטים סופיים תלת-ממדי של מערכת פרח דמוי תמר/ענן  
 אבקה טעון אלקטרוסטטית

קובץ log של תוכנת ANSYS 5.1 לחישוב השדות החשמליים במערכת תלת-ממדית של מודל דמוי פרח תמר בעל עלי באורך 2 מ"מ וענן אבקה טעון אלקטרוסטטית.

```

/BATCH
/COM,ANSYS REVISION 5.1          17:04:48  10/14/1995
/input,menust ,tmp ,             ,,,,,,,,,,,,,,1
BOPT,RV51,ON
/REPLOT,RESIZE
/PREP7
CYLIND,0.0002, ,0,0.004,0,90,
LPLOT
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
CYLIND,0.02, ,-0.003,0.025,0,90,
SPHERE,0.002, ,0,90,
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,0.037935,0.031032,0.206851,-0.051974
SAVE
FLST,2,3,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
VPTN,P51X
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
SAVE
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
VADD,P51X
/VIEW, 1 ,,-1
/ANG, 1
/REP
/ANG, 1 ,30.000000,YS,1
/REP
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,-0.245501,-0.721745,0.020757,-0.641602
/FOC, 1 ,0.300000,,1
/REP
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,18
FITEM,2,21
AADD,P51X
/AUTO, 1
/REP
/ANG, 1 ,,-30.000000,XS,1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,-0.176789,-0.126393,0.006442,-0.117806
FLST,2,2,5,ORDE,2

```

```

FITEM,2,18
FITEM,2,21
AADD,P51X
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
/AUTO, 1
/REP
SAVE
/VIEW, 1 ,,-1
/ANG, 1
/REP
/ANG, 1 ,30.000000,YS,1
/REP
/ANG, 1 ,30.000000,YS,1
/REP
/ANG, 1 , -30.000000,XS,1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,0.172495,-0.120668,0.364315,-0.069148
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,19
FITEM,2,22
AADD,P51X
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.00003,0,2,,5
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,19
FITEM,2,22
AADD,P51X
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.0003,0,2,,5
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,19
FITEM,2,22
AADD,P51X
FINI
/CLEAR,NOSTART
/COM,ANSYS REVISION 5.1          17:16:28  10/14/1995
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.003,0,2,,5
/PREP7
SPHERE,0.002, ,0,90,
CYLIND,0.0002, ,0,0.004,0,90,
LPLOT
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VPTN,P51X
/BATCH
/COM,ANSYS REVISION 5.1          17:18:18  10/14/1995
/input,menust ,tmp ,           ,,,,,,,,,,,,,,1
BOPT,RV51,ON
/PREP7
SPHERE,0.002, ,0,90,
LPLOT
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
/VIEW, 1 ,1,1,1

```

```

/ANG, 1
/REP
CYLIND,0.0002, ,0,0.004,0,90,
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VPTN,P51X
SAVE
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,5
VADD,P51X
SAVE
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,11
FITEM,2,18
AADD,P51X
/REPLOT,RESIZE
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,10
FITEM,2,17
AADD,P51X
SAVE
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
SAVE
CYLIND,0.02, ,-0.003,0.025,0,90,
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,4
VPTN,P51X
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
VGLUE,P51X
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
SAVE
!*
ET,1,SOLID87

```



```

!*
!*
UIMP,1,EX, , , ,
UIMP,1,DENS, , , ,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , , ,0.3,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , , ,10,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , , ,1,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,
!*
SAVE
/ZOOM,1,SCRN,-0.061088,-0.019137,0.157392,0.021099
/ZOOM,1,SCRN,0.042402,-0.047877,0.338501,-0.019137
FLST,2,3,4,ORDE,2
FITEM,2,21
FITEM,2,-23
LESIZE,P51X, , ,14,1,
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,10
FITEM,2,-11
FITEM,2,15
FITEM,2,-16
LESIZE,P51X, , ,2,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,17
LESIZE,P51X, , ,3,1,
VMESH, 4
SAVE
EPLOT
LPLOT
/DIST, 1 ,1.371742,1
/REP
/DIST, 1 ,1.371742,1
/REP
/DIST, 1 ,1.371742,1
/REP
/DIST, 1 ,1.371742,1
/REP
ESIZE,0.001,0,
VMESH, 1
SAVE
EPLOT
LPLOT
SAVE
/VIEW, 1 ,1,1,1

```

```

/ANG, 1
/REP
/AUTO, 1
/REP
!*
LDIV,4, , ,2,0
!*
LDIV,2, , ,2,0
!*
LDIV,20, , ,2,0
SAVE
FLST,2,7,4,ORDE,6
FITEM,2,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
FITEM,2,12
FITEM,2,-14
FITEM,2,20
LESIZE,P51X, , ,8,1,
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,4
FITEM,2,27
FITEM,2,-28
LESIZE,P51X, , ,3,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,7
FITEM,2,-8
LESIZE,P51X, , ,6,1,
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,0.076899,0.046965,0.217762,0.000981
/AUTO, 1
/REP
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
/VIEW, 1 ,,-1
/ANG, 1
/REP
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP
VMESH,    3
SAVE
EPlot
/VIEW, 1 ,,-1
/ANG, 1
/REP
/ANG, 1 ,30.000000,YS,1
/REP
/ANG, 1 ,-30.000000,XS,1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,-0.184702,-0.088114,0.019405,-0.039255
SAVE
LPlot
EPlot
/DIST, 1 ,1.371742,1
/REP

```

```

/AUTO, 1
/REP
LPLOT
/VIEW, 1, 1, 1, 1
/ANG, 1
/REP
SAVE
FINISH
/SOLU
FLST, 2, 1, 5, ORDE, 1
FITEM, 2, 4
SFA, P51X, 1, HFLUX, 500,
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 2
FITEM, 2, 10
SFA, P51X, 1, HFLUX, 0,
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 1
FITEM, 2, 11
SFA, P51X, 1, HFLUX, 0,
/ZOOM, 1, SCRN, -0.029466, -0.030633, 0.111396, 0.000981
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 14
FITEM, 2, -15
SFA, P51X, 1, HFLUX, 0,
/AUTO, 1
/REP
/VIEW, 1, ,, -1
/ANG, 1
/REP
/VIEW, 1, 1, 1, 1
/ANG, 1
/REP
FLST, 2, 1, 5, ORDE, 1
FITEM, 2, 6
SFA, P51X, 1, HFLUX, 0,
/ZOOM, 1, SCRN, 0.025154, 0.021099, 0.171766, 0.021099
FLST, 2, 10, 3, ORDE, 4
FITEM, 2, 1
FITEM, 2, -5
FITEM, 2, 8
FITEM, 2, -12
DK, P51X, TEMP, 0, , 1
/VIEW, 1, 1, 1, 1
/ANG, 1
/REP
SAVE
/STAT, SOLU
/AUTO, 1
/REP
/AUTO, 1
/REP
SOLVE
/BATCH
/COM, ANSYS REVISION 5.1          17:50:19  10/14/1995
/input, menust ,tmp ,           ,,,,,,,,,,,,,,1
BOPT, RV51, ON
RESUME
/REPLOT, RESIZE

```

```
LPLOT
DLLIST, ALL
DLLIST, ALL
SFALIS, ALL
DKLIST, ALL
/SOLU
/STAT,SOLU
SOLVE
SAVE
/AUTO, 1
/REP
/VIEW, 1,,-1
/ANG, 1
/REP
/ANG, 1,30.000000,YS,1
/REP
/ANG, 1,-30.000000,XS,1
/REP
FINISH
/POST1
PLNSOL,TG,SUM
/ZOOM,1,SCRN,-0.166701,-0.136095,0.104639,-0.072606
PLVECT,TG
PLNSOL,TG,SUM
/ZOOM,1,SCRN,-0.022371,0.302558,0.338454,0.741211
SAVE
FINISH
!/EXIT,NOSAV
```

דוגמה מקובץ פלט של סימולציית המודל הנ"ל הכולל את קואורדינטות הצמתים.

LIST ALL SELECTED NODES. DSYS= 0

NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX
1	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-03	0	0	0
2	6.12E-20	2.00E-04	1.99E-03	0	0	0
3	6.13E-21	5.01E-05	2.00E-03	0	0	0
4	1.84E-20	1.00E-04	2.00E-03	0	0	0
5	3.68E-20	1.50E-04	1.99E-03	0	0	0
6	2.00E-04	0.00E+00	1.99E-03	0	0	0
7	5.01E-05	0.00E+00	2.00E-03	0	0	0
8	1.00E-04	0.00E+00	2.00E-03	0	0	0
9	1.50E-04	0.00E+00	1.99E-03	0	0	0
10	1.93E-04	5.18E-05	1.99E-03	0	0	0
11	1.73E-04	1.00E-04	1.99E-03	0	0	0
12	1.41E-04	1.41E-04	1.99E-03	0	0	0
13	1.00E-04	1.73E-04	1.99E-03	0	0	0
14	5.18E-05	1.93E-04	1.99E-03	0	0	0
15	5.01E-05	5.01E-05	2.00E-03	0	0	0
16	8.67E-05	1.00E-04	2.00E-03	0	0	0
17	5.00E-05	1.37E-04	1.99E-03	0	0	0
18	1.37E-04	5.00E-05	1.99E-03	0	0	0
19	1.22E-20	2.00E-04	4.00E-03	0	0	0
20	1.40E-20	2.00E-04	3.93E-03	0	0	0

דוגמה מקובץ פלט של סימולציית המודל הנ"ל הכולל את השדה החשמלי בצמתים.

PRINT TG NODAL SOLUTION PER NODE

\*\*\*\*\* POST1 NODAL THERMAL GRADIENT LISTING \*\*\*\*\*

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1  
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	TGX	TGY	TGZ	TGSUM
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	-7.0664	45.585	125.65	133.85
4	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	36.264	-40	39.843	67.101
8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	-7.3859	-3.2364	-10.304	13.084
13	0.89876	45.025	18.629	48.735
19	50.563	1408.7	1419.6	2000.6

21	17.946	838.04	1.0246	838.23
23	24.766	1276.8	-3.7297	1277.1
25	22.851	936.17	6.5922	936.47
27	29.228	1119.1	14.506	1119.6
29	22.466	795.82	8.374	796.18
31	23.468	962.68	11.535	963.03
33	15.804	673.47	3.6842	673.66
35	19.813	787.9	11.615	788.24
37	4.8387	611.1	11.534	611.23
39	5.9341	580.27	0.19887	580.3
41	11.336	468.62	2.2562	468.76
43	4.0296	340.8	-3.01E-02	340.82
45	-2.6436	176.68	6.9015	176.83
47	1685.9	60.649	1563.2	2299.9
49	1484.6	631.12	1184.9	2001.5
51	959.24	1667.6	1357.5	2354.5
54	957.48	21.658	0.65407	957.72
56	1371.6	-1.3414	25.911	1371.8
58	932.28	15.049	-1.0483	932.4
60	1116.4	25.565	11.831	1116.7
62	794.26	18.632	5.3546	794.49
64	950.73	21.967	10.91	951.05
66	674.07	13.782	2.6912	674.22
68	801.52	16.379	6.6251	801.72
70	543.1	14.008	5.781	543.31
72	613.64	9.5158	1.6356	613.71
74	384.51	5.1433	-0.81581	384.55
76	352.49	-3.2116	9.2281	352.63
78	220.29	5.7337	16.28	220.97

## נספח ג' - חישובים ונוסחאות בסימולציית מסלול תנועת גרגרים

### חישוב מטען ותאוצות הגרגר

המטען החשמלי המקסימלי של חלקיק כדורי הנמצא בשדה חשמלי לפי Pauthenier וחובריו (1932) הינו:

$$q = 4\pi\epsilon_0 r^2 B E_0 \quad [a.1]$$

כאשר

$E_0$  - השדה החשמלי

$r$  - רדיוס החלקיק

$\epsilon_0$  - הרשיות היחסית

$B$  - מקדם טיב החומר

צורת גרגר אבקת פרח התמר הינה אליפסואיד, אך לשם הסימולציה הונח כי צורתו כדור בעל רדיוס של  $7\mu$ . גרגר האבקה מגיע לשיא טעינתו בענן האבקה, בו השדה החשמלי הינו 3.7 kV/mm. ערכו של  $B$  עבור חומרים מבודדים הוא 1.5. המטען החשמלי אשר יצבור הגרגר על סמך נתונים אלה יהיה 0.0302 pC.

ווקטור התאוצה הפועל על חלקיק טעון בשדה חשמלי הוא:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{E} \cdot q}{m} = \frac{4\pi\epsilon_0 r^2 B E_0}{m} \cdot \vec{E} \quad [a.2]$$

כאשר

$q$  - מטען החלקיק

$E$  - ווקטור השדה החשמלי הפועל על החלקיק

$F$  - ווקטור הכוח הפועל על החלקיק

$m$  - מסת החלקיק.

לפי מבנה המודל, הגרגר הנחקר נמצא מחוץ לענן ולכן כוחות הדחייה בינו לבין שאר הגרגרים מחושבים באמצעות השדה החשמלי הכללי.

כוח הגרר

כוח הגרר,  $D$ , על הגרר נוצר כתוצאה מזרימת אוויר על פניו. משוואת כוח הגרר הינה:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}}^2 \cdot A_p \cdot C_D \quad [a.3]$$

כאשר

$\rho_{\text{air}}$  - צפיפות האוויר

$V_{\text{air}}$  - מהירות האוויר על פני הגרר

$A_p$  - שטח חתך הגרר

$C_D$  - מקדם גרר הגרר

החוקרים Brodkey ו- Hershey (1988) מצאו כי מקדם הגרר,  $C_D$ , משתנה לפי מספר ריינולדס

באופן הבא:

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_D = \frac{24}{R_p} & 0 < R_p \leq 2 \\ C_D = \frac{18.5}{R_p^{0.6}} & 2 < R_p \leq 500 \\ C_D = 0.44 & 500 \leq R_p < 2 \cdot 10^5 \\ C_D = 0.2 & 2 \cdot 10^5 \leq R_p \end{array} \right. \quad [a.4]$$

$R_p$  הינו מספר ריינולדס ונוסחתו:

$$R_p = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}} \cdot 2r_p}{\mu} \quad [a.5]$$

כאשר

$r_p$  - רדיוס הגרר

$\mu$  - צמיגות האוויר

חישוב התוצאות

הגידול במספר הגררים המגיע אל העלי,  $\eta_s$ , ומעטפת הפרח,  $\eta_c$ , כתוצאה מהוספת

אלקטרוסטטיקה הינו:

$$\text{עבור העלי} \quad \eta_s = \left( \frac{r_{\text{ess}}}{r_s} \right)^2 \quad [a.6]$$



$$\text{עבור מעטפת הפרח} \quad \eta_c = \frac{r_{esc}^2 - r_{ess}^2}{r_c^2 - r_s^2} \quad [a.7]$$

כאשר

$r_s$  - רדיוס העלי

$r_c$  - רדיוס מעטפת הפרח

$r_{ess}$  - רדיוס ענן האבקה המגיע אל העלי

$r_{esc}$  - רדיוס ענן האבקה המגיע אל הפרח

השוואת צפיפות הגרגרים על ראש העלי לזו שעל מעטפת הפרח,  $\eta_p$ , מתקבל מהנוסחה הבאה:

$$\eta_p = \frac{\left( \frac{\pi \cdot r_{ess}^2}{\pi \cdot r_s^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot a} \right)}{\left( \frac{\pi \cdot r_c^2 - \pi \cdot r_{ess}^2}{4 \cdot \pi \cdot r_c^2 - \pi \cdot r_s^2} \right)} \quad [a.5]$$

כאשר  $a$  הינו אורך ראש העלי.

## נספח ד' - תוכנה לסימולציית מסלול תנועת הגרגרים

תוכנית המחשב לחישוב מסלול תנועת הגרגרים הניתקים מענן האבקה כפי שנידון בפרק 3.4. התוכנית מקבלת כקלט קובץ נתונים המכיל את מספר הצומת, הקואורדינטות ואת ווקטור השדה החשמלי שבה. כפלט התוכנית יוצרת קובץ המכיל את ווקטור התאוצות, המהירויות והמיקום של הגרגר בכל צעד זמן.

```

REM *****
REM      POLLEN GRAIN TRAJECTORY CALCULATING PROGRAM
REM *****
REM
REM      A - שטח חתך הגרגר
REM      ALFA - זווית מהירות הגרגר
REM      AX - X בכיוון תאוצת הגרגר
REM      AZ - Z בכיוון תאוצת הגרגר
REM      CD - מקדם גרר הגרגר
REM      D - כוח הגרר על הגרגר
REM      DELTA - המרחק בין הגרגר לצומת
REM      DMIN - המרחק המינימלי בין בגרגר לצומת
REM      DT - צעד זמן
REM      DX - המרחק בכיוון X בין הגרגר לצומת
REM      DZ - המרחק בכיוון Z בין הגרגר לצומת
REM      EF - ערך השדה החשמלי שבו נטען הגרגר
REM      EPSILON - מקדם הרשיות באוויר
REM      ESFX - שדה חשמלי בכיוון X
REM      ESFZ - שדה חשמלי בכיוון Z
REM      I - משתנה מניה
REM      K - מספר הצמתיים בסימולציה
REM      N - מספר צומת של השדה החשמלי
REM      MASS - מסת הגרגר
REM      MU - צמיגות האוויר בגובה פני הים
REM      PG - מרחק הגרגר מראשית הצירים
REM      PGX - X מיקום הגרגר בכיוון
REM      PGZ - Z מיקום הגרגר בכיוון
REM      Q - מטען הגרגר
REM      R - רדיוס הגרגר
REM      RHO - משקל סגולי של הגרגר
REM      RHOAIR - צפיפות האוויר בגובה פני הים
REM      RP - מספר ריינודס
REM      T15NTG.CSV - קובץ קלט
REM      T15RES98.CSV - קובץ פלט
REM      V - גודל המהירות
REM      VX - X מהירות הגרגר בכיוון
REM      VZ - Z מהירות הגרגר בכיוון
REM      W - משתנה מניה
REM      WIND - מהירות הזרימה המציפה
REM      X - קואורדינטת X של השדה החשמלי
REM      Z - קואורדינטת Z של השדה החשמלי
REM
REM      ***** תחילת התוכנית *****

```

```
DIM N(300),X(300),Z(300),ESFX(300),ESFZ(300)
```

```
REM ***** קביעת הפרמטרים *****
```

```

CLS
K=0
RHO=500
MU=1.7889e-5
RHOAIR=1.225
EPSILON=8.85*10^(-12)
R=7/1000000
A=3.14159*R^2
EF=3700000
Q=-4*3.14159*EPSILON*R^2*EF*1.5
DT=2E-6
MASS=RHO*4/3*3.14159*R^3
VX=0
VZ=0
D=0
WIND=0.5
RP=0.1
ALFA=0
OPEN "I",#1,"T15NTG.CSV"
OPEN "O",#2,"T15RES98.CSV"
? #2,"AX,AZ,VX,VZ,PGX,PGZ"

REM ***** קריאת נתונים - השדה החשמלי בצמתים *****

FOR I=1 TO 245
  IF EOF(1) THEN GOTO 2000
  K=I
  INPUT #1,N(I),X(I),Z(I),ESFX(I),ESFZ(I)
NEXT I
2000 CLOSE #1

REM ***** קביעת מיקום התחלתי של הגרגר *****

PGX=0.0145
PGZ=0.025
20 DMIN=1000

REM ***** לולאה למציאת הצומת הקרובה ביותר לגרגר *****

FOR I=1 TO K
  DX=PGX-X(I)
  DZ=PGZ-Z(I)
  DELTA=(DX^2+DZ^2)^0.5
  IF DELTA<DMIN THEN
    DMIN=DELTA
    W=I
REM ? W,N(W)
  END IF
NEXT I

REM ***** חישוב התאוצות המהירות והמיקום החדש של הגרגר *****

V=(VX^2+VZ^2)^0.5
RP=RHOAIR*2*R*V/MU
IF RP=0 THEN RP=0.01
CD=24/RP
IF RP>2 THEN CD=18.5/(RP^0.6)
IF RP>500 THEN CD=0.44

```

```
IF RP>200000 THEN CD=0.2
D=0.5*RHOAIR*V^2*A*CD
10  AX=(ESFX(W)*Q/MASS)+(D*COS(ALFA)/MASS)
    AZ=ESFZ(W)*Q/MASS-9.81+(D*SIN(ALFA)/MASS)
    VX=VX+AX*DT
    VZ=VZ+AZ*DT
12  ALFA=ATN(VZ/VX)
    PGX=PGX+VX*DT
    PGZ=PGZ+(VZ-WIND)*DT
```

```
REM ***** הדפסת תוצאות *****
? #2,AX;",";AZ;",";VX;",";VZ;",";PGX;",";PGZ

REM ***** בדיקה האם הגרגר הגיע אל גבולות המודל או הפרח *****

PG=(PGX^2+PGZ^2)^0.5
? PG,pgx,pgz
IF PG<=0.002 THEN GOTO 100
IF PGX<=0.0002 AND PGZ<0.006 THEN GOTO 100
IF PGX<0 THEN GOTO 100
IF PGZ<-0.003 THEN GOTO 100
GOTO 20
100  CLOSE #2
      END
```

## רשימת מקורות:

1. איזיקוביץ, ד. (1994) אקולוגיה של האבקה. הקורס, המחלקה לבוטניקה, אוניברסיטת תל-אביב.
2. איזיקוביץ, ד. (1995) תקשורת אישית.
3. איזיקוביץ, ד. ולופו ע. (1989) פרחי בר כגורם מתחרה בהאבקת שקדים בעמק יזרעאל. עלון הנוטע 12 : 1307-1312.
4. ברנשטיין, צ. (1995) תקשורת אישית.
5. גן-מור, ש., רילסקה, א., נהיר, ד., שפיגלמן, מ. וברס, ח. (1983) שיפור היבול בעגבניות חממה על ידי ניעור בסילון אוויר פועם. השדה ס"ד : 55-50.
6. מיכאל, א. (1994) התאמות השקד המצוי (*Amygdalus communis L.*) להאבקה ופריחה בתנאי החורף. עבודת גמר לקבלת תואר M.Sc. הפקולטה למדעי החיים, אוניברסיטת תל אביב.
7. שוורץ, י. (1992) אסיף גרגרי אבקת פרחים בטכניקות אלקטרוסטטיות ואווירודינמיות. חיבור להשלמת הדרישות לתואר M.Sc. הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון.
8. Banerjee, S. and Law, S. E. (1995) Characterization of chargeability of biological particulates by triboelectrification. IEEE/IAS Conf. record 2: 1295-1301.
9. Brauer, J. R., Kalfanian, H. and Moreines, H. (1989) Dynamic electric fields computed by finite elements. IEEE transaction on industry applications. vol 25(6): 1088-1092.
10. Bright, A. W., Corbett, R. P. and Hughes, J. F. (1978) Electrostatic engineering design guides no. 30, Oxford University Press.
11. Brodkey, R. S., Hershey, H. C. (1988) Transport past immerst bodies. Transport penomenon, 12. McGraw-Hill bool Company, Inc. New York. pp. 551-600.
12. Cho, A. Y. H. (1964) Contact charging of micron-sized particles in intense electric fields. Journal of Applied Physics, 35 (9), 2561-2564.
13. Cobine, J. D. (1958) Gaseous conductors: theory and engineering applications. Dover Pb. New York.
14. Cooper, S. C. and Law, S. E. (1990) Computer-based, charged transfer data acquisition from multiple targets undergoing electrostatic spraying. Trans. of the ASAE. 666-670.
15. Corbet, S. A., Beament, J. and Eisikowitch, D. (1982) Are electrostatic forces Involved in pollen transfer?. Plant, Cell & Enviroment, 5, 125-129.

16. Dai, Y. and Law, S. E. (1995) Modeling the transient-electric field produced by a charged pollen cloud entering a flower. IEEE/IAS Conf. record 2: 1935-1402.
17. Dante, E. T. and Gupta, C. P. (1991) Deposition studies of an electrostatic spinning disk sprayer. Transaction of the ASAE vol 34(5): 1927-1934.
18. Deasi, C. S. and Abel, J. F. (1972) Introduction to the finite element method. Van Nostrand Reinhold, New York.
19. Dix, A. J. and Marchant, J. A. (1984) A mathematical model of the transport and deposition of charged spray drops. J. agric. Eng. Res. 30, 91-100.
20. Edwards, D. K. (1962) Electrostatic charges on insects due to contact with different substrates. Canadian Journal of zoology. 40, 579-584.
21. Eisikowitch, D. (1981) Some aspects of pollination of oil-seed rape (*Brassica napus* L.). J. agric. Sci., Camb, 96, 321-326.
22. Erickson, E. H. (1975) Surface electric potential on worker honeybees leaving and entering the hive. J. of Agric. Res. 14, 141-147.
23. Faegri K. and Van der P. (1979) The principles of pollination ecology. Pergamon, Oxford, London.
24. Free J. B. (1993) Insect pollination of crops. Academic press. London.
25. Gan-Mor, S. and Law, S. E. (1992). Frequency and phase-lag effects on transport of particulates by an AC electric field. Transactions of the Institute for Electrical and Electronic Engineers, 28(2): 317-323.
26. Gan-Mor, S., Schwartz, Y., Bechar, A. Eisikowitch, D. and Manor, G. (1995) Relevance of electrostatic forces in natural and artificial pollination. Canadian agricultural engineering. vol 37 no. 3: 189-194.
27. Hadfield, D. J. (1987) The modeling of charged spray deposition on artificial targets. J. agric. Eng. Res 36, 45-56.
28. Halliday, D. and Resnick, R. (1978) Physics. Part 2, Wiley. New York.
29. Jones, C. E. and Buchmann, S. L. (1974) Ultraviolet floral patterns as functional orientantion cues in hymenopterous pollination system. Anim. Behav. 22: 481-485.
30. Jovicevic, S. and Stankovic, L. (1990) The least squares boundary residual method in electrostatic and eddy current problem. IEEE transactions on magnetic. vol 26(2): 1117-1122.

31. Kucerovsky, D., Kucerovsky, Z. and Greason, W. D. (1992) A method for determining electric parameters of multybody configurations. IEEE transaction on industry applications. vol 28(4): 742-747.
32. Lake, J. R. (1988) The deposit of electrostatically charged sprays on part of targets shaded from the spray. J. agric. Eng. Res. 39, 9-18.
33. Lake, J. R. and Marchant, J. A. (1984) Wind tunnel experiments and a mathematical model of electrostatic spray deposition in barley. J. agric. Eng. Res. 30, pp. 185-195.
34. Law, S. E. (1975) Electrostatic induction instrumentation for tracking and charge measurement of airborne agricultural particulates. Transaction of the ASAE. vol 18 (1): 40-45.
35. Law, S. E. (1978) Embedded-electrode electrostatic induction spray-charging nozzle: theoretical and engineering design. Transaction of the ASAE. vol 21 (6): 1096-1104.
36. Law, S. E. and Bowen, H. D. (1975) Theoretically predicted interactions of surface charge and evaporation on airborne pesticide droplets. Transaction of the ASAE. vol 18 (1): 35-39.
37. Law, S. E., Oetting, R. D., Manor, G., Gan-Mor, S. and Dubitzki, E. (1990) Aerodynamic dispersion and electric-force deposition of pesticide spray in greenhouses. Finel report, BARD, US-1282-87.
38. Lombard, P. B., Williams, R. R. and Legge, A. P. (1973) Artificial supplementary pollination trials on apples and pears in Britain. Oreg. Hort. Soc. (Proc) 64: 43-46.
39. MacDaniels, L. H. (1930) The possibilities of hand pollination in the on a commercial scale. Proceeding of the American society for horticultural science.
40. Marchant, J. A., Dix, A. J. and Wilson, J. M. (1985) The electrostatic charging of spray produced by hydraulic nozzles. Part I. Theoretical analysis. J. agric. eng. res. 31, 329-344.
41. McGregor, S. E. (1976) Insect pollination of cuktivated crop plants. Agriculture handbook no. 496. Agricultural research service. U.S. Department of agriculture. Washington D.C. Issued July.
42. Monselise, S. P. (1986) Handbook of fruit set and development. CRC press. Boca Raton, Florida.



43. Pauthenier, M. M. and Moreau Hanot, M. (1932) La Charge des particules spheriques dans un champ ionise. *J. Phys. Radium Series 7*, pp. 590-593.
44. Segerlind, L. J. (1976) *Applied finite element analysis*. Wiley .New York.
45. Stremler, F. G., Klein, S. A., Fan Luo, F. and Liao, Y. (1990) Numerical solutions and mapping of electrostatic fields using the apple Macintosh computer. *IEEE transaction of education*. vol 33(1): 104-110.
46. Thorp, R. W. (1978) Honeybee foraging behavior in California almonds orchards. *Proc. IV<sup>th</sup> Int. Symp. on Pollination*. Md. Agric Exp. Sta. Spec. Misc. Publ. 1: 385-392.
47. Vercoulen, P. H. W., Roos, R. A., Maeijnlssen, J. C. M. and Scarlett, B. (1991) An instument for measuring electric charge on individual aerosol particles. *J. Aerosol Sci.*, vol 22, suppl: s335-s339.
48. Vercoulen, P. H. W., Roos, R. A., Maeijnlssen, J. C. M. and Scarlett, B. (1992) Measuring electric charge on pollen. *J. Aerosol Sci.*, vol 23, suppl: s377-s380.
49. Warnke, U. (1976) Effects of electric charges on honeybees. *Bee world*, 57, 50-56.
50. Williams, R. R. and Legge, A. P. (1979) Pollen application by mechanical dusting in english apple orchards. *J. of Hort. Sci.* 54 (1): 67-74.
51. Y'eskov, Y. K. and Sapozhnikov, A. M. (1976) Mechanism of generation and perception of electric fields by honey bees. *Biophysics*, 21, 1124-1130.

In order to strengthen the findings of this research, more field experiments need to be conducted on many different types of plants in various sizes of fields. On the basis of the work's results, the simulation is able to predict the potential for success of improving artificial pollination by electrostatic charges. Future work may include checking the electric field variation and its' influence in a numerical model which is not stable in time, developing a simulation that contains flow field solutions and improving the pollinating equipment.

on the flower. The data for the simulation was taken from the 3D model results for the 4 mm pistil flower system. It was found that when adding electrostatic charges equal to 80 kV to the air flow and gravity, the amount of pollen on the top of the pistil increases by 225 times and on the flower envelope by 36 times. Therefore, for electrostatic pollination, the pistil is 6.25 times more attractive than the envelope. On average, the charged grain density on the pistil is 4.6 times higher than the density on the flower envelope. These models and simulations can be used to evaluate the electrostatically charged pollen deposition efficiency for different types of flowers. An experiment system was conducted in order to test the model and simulation versus laboratory tests. The system was identical to the 3D finite element model in scale 4.75:1. Results showed that for 80 kV charging the pollen grain density on the top of the pistil was 60 times higher than on the flower's envelope and on the whole pistil it was 30 times higher, on average. In another experiment, conducted for 0 kV, the pollen grain density on the pistil's top was only 5 times higher than on the envelope.

The second part of the work was focused on field experiments. An experiment designed to improve the pollination process and to increase the date crop by electrostatic pollination was conducted. An improvement of 85% and 150% in the fruit yield was accomplished in two experiments when comparing electrostatic to non-electrostatic pollination. The difference between the two experiments was the amount of pollination. A clear advantage to the electrostatic pollination as compared to the non-electrostatic pollination was found. Experiments on almonds supported the results from date experiments. An experiment that was conducted in the mid blooming season showed improvements of 70% of the fruit yield for electrostatic pollination when compared to bee pollination. The fruit percent for electrostatic pollination was similar in all the experiments and remained approximately 50%. The fruit percentage for bee pollination was 28% in the mid blooming season and only 1% at the end. The results for dates were better and derived from the geometric structure of the date flower that concentrate the electric field above the stigma in a better way than in the case of the almond. In addition the date pollen characteristics, especially the grain's size are more suitable to electrostatic pollination than the almond pollen.

The objective of the present work is to improve the artificial pollination process by means of electrostatic charges; using quantity evaluation tools and studying the forces and field acting on the system. More specifically, a model for predicting the deposition process of the pollen grains was developed. The model is able to predict the forces that apply in the flower/electrostatically charged pollen cloud system and the possibility for charging the pollen grains and depositing them on flowers was examined.

The work begins with a comprehensive literary review in order to clarify the botany background, which is important to the understanding of the ideas and methods for solving pollination problems. In the review, there is a description of: the date and almond that were chosen to be the test plants; the use of electrostatic properties in plants and animals; electrostatic spraying techniques and experiments in agriculture; the mathematical and numerical methods used to calculate electrostatic parameters in complex systems; and experimental methods to measure an electric charge on particles.

Research was conducted on the plant morphologic influence on pollen deposition efficiency. Two dimensional (2D) and three dimensional (3D) models, using the finite element method, were formed in order to calculate the electric fields and forces applying in a simulation that resembles a 4 mm date flower and an electrostatically charged pollen cloud system. The effect of the flower geometry and the pistil length on the electric field in the given system was theoretically checked. It was found that the maximal electric field in the system is posted on the pistil head. When increasing the pistil length, the electric field magnitude on its head increases as well. In the 2D model, the maximal electric field for a 5 mm pistil flower system was 2.25 times more than in a flower system where there is no pistil or the pistil is very short. The electric field magnitude ratio between the pistil head and the flower envelope was 5.4 for a 5 mm pistil flower system. In the 3D model, the maximal electric field for a 4 mm pistil flower system was 2 times more than in a flower system with no pistil or a very short pistil. The electric field magnitude ratio between the pistil head and the flower envelope was 3 for a 4 mm pistil flower system. In addition, a program was developed to simulate the pollen grain trajectory from the pollen cloud to the deposition location

## **Abstract**

Pollination is part of the reproduction process of plants and is essential in most cases to generation continuity. In modern agriculture and competitive market conditions, the pollination role is significant in production of fruits, vegetables and qualitative seeds. A majority of the fruit trees in Israel are pollinated by insects that collect pollen from anthers and transfer them to stigmas. Sometimes poor pollination occurs due to unsuitable ecological conditions and non-compatibility between the pollinators and the plant. The date is a wind pollinated plant that is artificially pollinated in Israel. The artificial pollination methods for dates, that are customary today, are expensive and have low efficiency. The artificial pollination process demands a great amount of pollen and human labor for collecting and depositing of the pollen. The almond is an insect pollinated plant. Due to extreme atmospheric conditions in the blooming season, special biological demands for the existence of fertilization, and the absence of balance between the pollinating insects and the almond, a low level of pollination and fruits are achieved. In Israel, a common methods to raise the pollination level are: planting trees from different cultivars in the same plantation and to enter hives into almond plantations during the blooming period.

Reports by several researchers of a pollen cloud rising from a flower anther and attaching to a bee hovering above it led to an assumption that a bee is charged by an electric charge that develops while it is flying and waving its wings. In addition, an hypothesis was raised as to whether a charged bee approaching a flower induces electric charges that apply electrostatic forces to cause or assist the detachment of pollen grains.

During the last several years, technology of applying electrostatic forces in cases that need to transfer or deposit small particles to precise targets has been developed. In agriculture, this technology is used for pesticide spraying applications. Previous works show the advantage of using electrostatic spraying for better target covering; it is more economical in regard to the material and decreases contamination of the environment.

## Table of contents (continued)

4.5 Field experiments on pollen deposition in almonds	63
4.5.1 Experiments description	63
4.5.2 Results and discussion	64
<b>chapter 5: Discussion and conclusions</b>	<b>70</b>
5.1 Date flower/electrostatic charged pollen model	70
5.2 Pollen grain trajectory simulation	71
5.3 Lab and field experiments	71
<b>chapter 6: Summery and recommendation for                   continuation</b>	<b>74</b>
6.1 Summery	74
6.2 Recommendation for continuation	75
<b>Appendixes</b>	<b>76</b>
Appendix A	76
Appendix B	80
Appendix C	88
Appendix D	91
<b>References</b>	<b>94</b>

## Table of contents (continued)

2.3.1	Methods to measure electric charge and velocity of spray particles and pollen grains	26
2.3.2	Mathematical and numerical methods to calculate electrostatic parameters in complex systems	29
2.4	Summery	33
<b>chapter 3: Computerize model to describe electrostatic pollination</b>		34
3.1	Finite element method as a tool to solve electrostatic problem	34
3.2	Testing the model against theoretical solutions	35
3.3	The Electric field in 2D model of date flower/electrostatic charged pollen cloud system	37
3.4	The electric field in 3D model of date flower/electrostatic charged pollen cloud system	42
3.5	Pollen grain trajectory simulation	46
3.6	Summery	48
<b>chapter 4: Electrostatic pollen deposition experiments</b>		50
4.1	Introduction	50
4.2	Methods and materials	50
4.2.1	System for deposition of electrostatic charged pollen	50
4.2.2	Accompanying systems to evaluate pollination quality	51
4.3	Lab experiment on pollen deposition in resembling date flower model	52
4.3.1	Experiment description	52
4.3.2	Results and discussion	54
4.4	Field experiments on pollen deposition in dates	56
4.4.1	Experiments description	56
4.4.2	Results and discussion	57

## Table of contents

<b>Abstract</b>	1
<b>List of symbols</b>	4
<b>Chapter 1: Introduction</b>	6
1.1 Introduction	6
1.2 Objectives	7
1.3 Research description	7
<b>Chapter 2: Literature review</b>	8
2.1 Pollination ecology	8
2.1.1 What is pollination	8
2.1.2 Natural pollinators	8
2.1.3 Common methods in artificial pollination	9
2.1.4 Almond	11
2.1.5 Date	14
2.2 Electrostatic phenomenons in plants, insects and pollen	16
2.2.1 Basic background	16
2.2.2 Electrostatic applications in agriculture	18
2.2.3 Electrostatic characteristics in plants, insects and pollen grains	18
2.2.4 The influence of electrostatic forces on pollen grains	20
2.2.5 Charging mechanism in animals	22
2.2.6 The influence of electric field and charge on bees	23
2.2.7 Electrostatic charging technics	24
2.2.8 Experiments on electrostatic spraying of droplets	25
2.3 Simulations and models to predict and to find the electrostatic characteristics in spraying and pollination	26



This research was carried out under the supervision of Dr. I. Shmulevich of the faculty of Agricultural Engineering at the Technion and Dr. S. Gan-Mor of the Institute of Agricultural Engineering, A.R.O. Beit Dagan.

I wish to express my gratitude to Prof. Dan Eisikowitch for his precious advise.

Special thank is extended to Dr. S. Gan-Mor and Dr. I. Shmulevich for their guidance

My thanks are also extended to Y. Vaknin and B. Ronen and to my colleagues at the Institute of Agricultural Engineering for their contribution in this research.

POLLEN DEPOSITION IN ELECTROSTATIC FIELD

RESEARCH THESIS

SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN AGRICULTURAL ENGINEERING

BY  
AVITAL BECHAR

SUBMITTED TO THE SENATE OF THE TECHNION - ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
TAMUZ 5756 HAIFA JUNE 1996

**POLLEN DEPOSITION IN ELECTROSTATIC  
FIELD**

AVITAL BECHAR