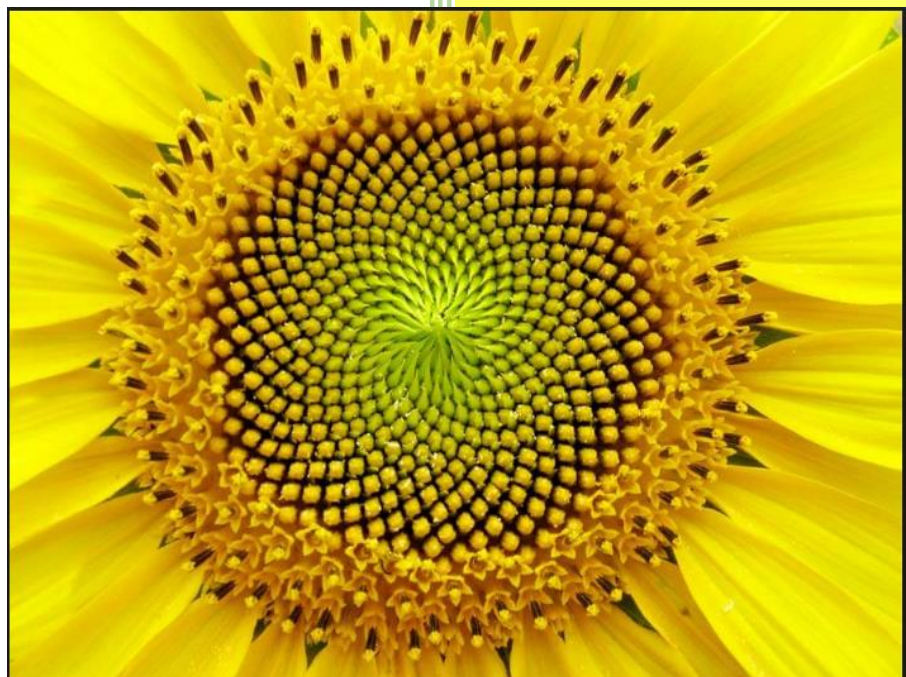


2019

פרויקט מחקר - האבקה מלאכותית



שיר קוזלובסקי

הטכניון – המכון הטכנולוגי לישראל

מנחה: פרופסור דניאל וויס

דוקטור אורי שגב



תקציר

העולם כיום נמצא בבעיה של היכחדות דבורי הדבש, דבר המשפיע על היבול המתועש והפראי. מספר מדינות אירופה כבר הכריזו על בעיה זו במשבר לאומי, חקלאים מתריעים כי עוד מספר שנים המצב יהיה בלתי הפיך. יש מספר אפשרויות לפתרון הבעיה. אנו החלטנו לנסות לתרום למאמץ העולמי על ידי בניית מכשיר האבקה מלאכותית וורסטילי המתאים לצורת האבקה של דבורי דבש בשטחים חקלאיים, וכפיילוט להתחיל בפרח החמנייה (פרח גדול, עמיד המגלגל מיליוני דולרים בשנה לשוק העולמי), ובהמשך אולי אף להרחיב את שימושו לפרחים נוספים באותו התחום. מטרת עבודה זו הוא לבחון כיצד ניתן לבצע אבקה של פרחי חמנייה בצורה מלאכותית. לאחר בחינה מעמיקה של הספרות בנושא נבחרה השיטה של השימוש בשדה אלקטרוסטטי ובמטען המצוי באבקנים כדרך לניתוקם מהפרח ומשיכתם לכלי הרצוי (וכן הפוך). על מנת לממש שיטה זו נדרשו עקרונות בסיסיים וסדרי גודל כדי לבנות מכשיר המסוגל לצבע פעולות אלה. לכן בחלקה הראשון של העבודה אציג סקירות ספרות בנושא. בגלל שאין מאמרים ומחקרים במדברים על השדה החשמלי ופרחי החמנייה, הצגתי מחקרים מגוונים על מימוש השיטה בפרחים אחרים וכן דרך פעולתה של הדבורה בשימוש בשדה זה, ובכך ניתן להסיק על סדרי גודל ודרך פעולה לבניית המכשיר המדובר. החלק השני של העבודה מתמקד במכשיר עצמו ודרך פעולתו (בשיטה Van De Graaff). ובחלק השלישי מוצגות תכנית הניסוי לבדיקת התכנות וכיול המכשיר בצורה האופטימלית שתיתן תוצאות מקסימליות לצורך. לבסוף ישנן הצעות להמשך, וכן הצעות לשיפור המכשיר לאחר שזה ייבנה.



תכן עניינים

1	תקציר
2	מפרט איורים
3	מבוא
6	הערכת רדיוס האבקה והטעינה ממדידת מהירות
8	הדבורה
9	הפרח
11	שדה אלקטרוסטטי- Van De Graaff
11	האפקט הטורבו-חשמלי (the Triboelectric Effect)
11	הרכב המערכת
11	דרך פעולה
12	נוסחאות לחישוב המתח והמטען
12	חישוב הזרם:
12	מכשיר האבקה מלאכותית
13	תכניות ניסויים
13	הראשון: סט ניסויים שמטרתם לבדוק את עוצמת השדה בשילוב עם המרחק האופטימלי מהפרח
14	השני: סט ניסוי שמטרתם לבחון את יעילותו של המכשיר
14	סיכום, מסקנות ואפשרויות פיתוח
15	מקורות

מפרט איורים

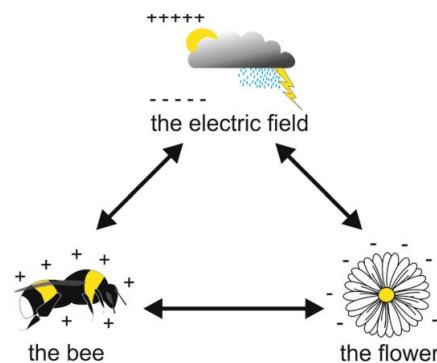
3	איור 1 - ניתן לראות באופן מופשט את מערכת היחסים בין הדבורים הפרח והאטמוספירה וההשפעה של כל אחד מהגורמים על האחר. ¹
4	איור 2 - האבקה דו כיוונית בשדה חשמלי. הדוגמא הנוכחית הינה נרקיס. ניתן לראות באדום אבקן המושפע משדה אלקטרוסטטי הנוצר ממוט הטעון ויוצר שדה זה. ניתן לראות את האבקן משתחרר מהפרח, מתקרב על המוט ונצמד אליו. בשתי התמונות האחרונות ניתן לראות את התהליך ההפוך- אבקן הנמצא על מוט וחוזר לפרח. בשני המקרים האבקן נע נגד כוח הכבידה. ¹
5	איור 3 - באיור A שרטוט סכמטי של חוק קולון. באיור B ניתן לראות את היחסים בין דבורה לפרח והמטענים החשמליים על כל אחד. ²
5	איור 4 - מודל אלמנטים סופיים של אינטראקציות חשמליות בין דבורי בומבוס טעונות חיוביות לבין פטוניות מקורקעות על רקע שיפוע הפוטנציאל האטמוספרי. ¹
7	איור 5 - הטעינה האלקטרוסטטית הנמדדת (fC) עבור גרגרי אבקה בודדים (נקודות אפורות) עבור שמונה המינים כפונקציה של גודל. הקווים הכהים מציגים את גודל המטען הדרוש כפונקציה של גודל גרגר האבקה (רדיוס) עבור כוחות אלקטרוסטטיים לכוחות כבדים שווים בשלושה ערכי שדה חשמליים. הקו העליון ביותר של המטען המקסימלי, מראה את המטען המרבי האפשרי התיאורטי לגרגר אבקה בגודל מסוים.
8	איור 6 - השדה החשמלי הדרוש לאזן את הכוחות החשמליים והכבידה כפונקציה של מטען האבקן. עבור אבקנים ברדיוס של בין 3 ל- $30\mu m$. ⁴
9	איור 7 - המערכת המשמשת לקביעת כוח ההפרדה שמופעל על ידי אלקטרודת סיכה מחוברת לפוטנציאלים שונים. האיור ממחיש את מנגנון הטעינה והפעלת כוח על אובייקט מקורקע.
10	איור 8 - הכוח המושרה על אבקני האבוקדו כפונקציה של מרחק הדבורה הטעונה.



- איור 9 - הכוח המושרה על אבקני האקליפטוס כפונקציה של מרחק הדבורה הטעונה.10
 איור 10 - מדידת השדה החשמלי והכוח המחושב הדרוש לנתק אבקנים מפרח הליזינטוס.11
 איור 11 – שרטוטים סכמתיים של מכשירים הפועלים בשיטת VDG. מצד ימין מכשיר היוצר שדה חיובי ומשאל
 מכשיר היוצר שדה שלילי. Error! Bookmark not defined.

מבוא

מחקרים רבים מראים כי אבקנים מושפעים משדה חשמלי שיוצרים דבורים. דבורים יוצרות שדה אלקטרוסטטי חיובי ואילו הפרח טעון באלקטרונים (שדה שלילי) וכאשר הדבורה למתקרבת לפרח עד למרחק מסוים, השדה שהיא מפעילה גורם למשיכה של האבקנים אליה.



איור 1 - ניתן לראות באופן מופשט את מערכת היחסים בין הדבורים הפרח והאטמוספירה וההשפעה של כל אחד מהגורמים על האחר.¹

הדבורים יוצרות את השדה החשמלי בעזרת השערות הקטנות המצויות ברגליהן ובעזרת האוויר הטעון במטען שלילי. תנודה שערות אלה הינו בתדירות של כ- $4 - 0.2$ [kHz].¹

לאחר חיפוש מעמיק במחקרים ומאמרים על הנושא לא נמצא מידע אודות הקשר בין דבורים וחמניות ולכן אציג סקירה אודות דבורים ומספר סוגי פרחים, אשר מנתונים אלה ניתן להסיק על הקשר בין דבורים וחמניות וכן לקבל תמונה כללית על אופן הפעולה וסדרי גודל אופייניים.

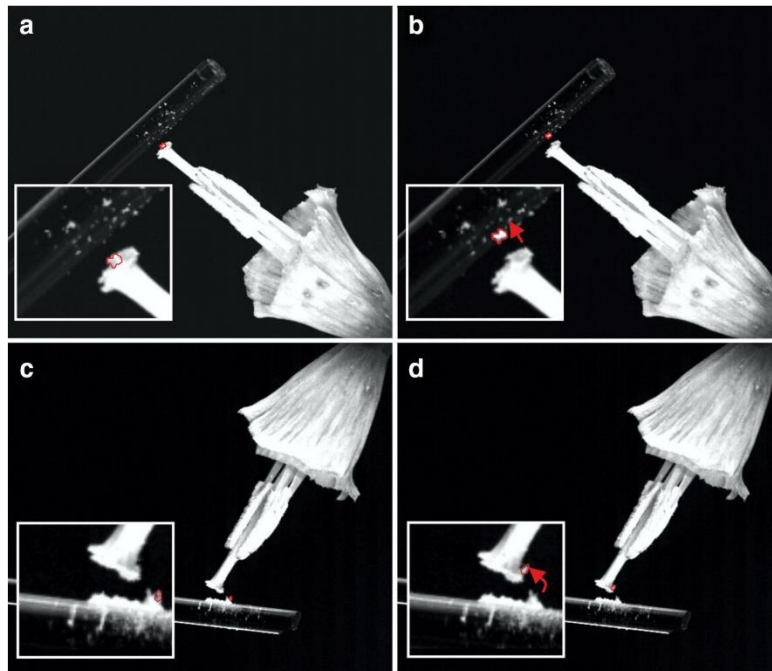
מאמר של קלארק הראה כי השדה החשמלי הנדרש ליצירת סטטיות בשערות הינו $61 - 0.77$ $\left[\frac{V}{m}\right]$ (תלוי בתדירות הנ"ל).

בנוסף, המרחק בין הדבורה לפרח צריך להיות לא גדול מ- 10 [cm].¹

הפרש הפוטנציאלים בין הקרקע לאטמוספירה גורם ליצרה של שדה חשמלי. עוצמתו בתנאים של קרקע מישורית ופתוחה, בתנאי מזג אוויר סטנדרטיים הוא 100 $\left[\frac{V}{m}\right]$. וכן עוצמתו המקסימלי יכולה אף להגיע ל- 300 [kV] בגובה של $50 - 30$ km. מעל לגובה זה העוצמה מתחילה לרדת ולהיפך.¹

השדה בין הדבורה לפרח גדל בריבוע ביחס למרחק ביניהם. ולכן המשיכה גדלה בצורה ניכרת ככל שהדבורה קרובה יותר לפרח. לדוגמא- במרחק של כ- $3 - 2$ [cm] עוצמת השדה הייתה 1.5 $\left[\frac{kV}{m}\right]$

מספר חוקרים מידלו אנליטית את תנועת האבקנים הטעונים ב- $40 - 0.1$ [fC] וגילו כי בטווח זה השפעת הגרביטציה אינה משפיעה, מתחת לטווח זה כוח הכבידה חזק מדי והאבקן לא משתחרר מהפרח. זאת בהנחה שהתהליך קורה במרחק מינימלי מסוים מהפרח.



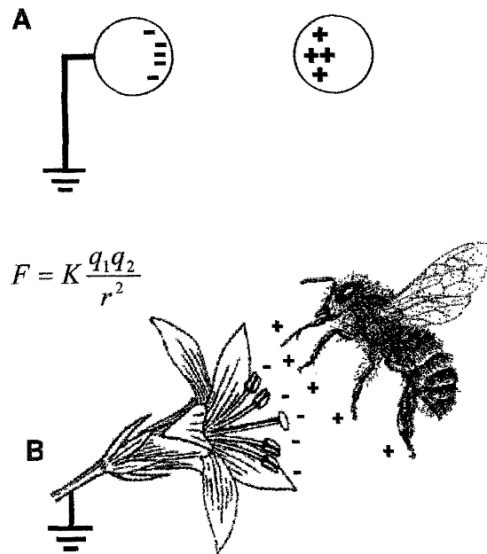
איור 2 - האבקה דו כיוונית בשדה חשמלי. הדוגמא הנוכחית הינה נרקיס. ניתן ראות באדום אבקן המושפע משדה אלקטרוסטטי הנוצר ממוט הטעון ויוצר שדה זה. ניתן לראות את האבקן משתחרר מהפרח, מתקרב על המוט ונצמד אליו. בשתי התמונות האחרונות ניתן לראות את התהליך ההפוך- אבקן הנמצא על מוט וחוזר לפרח. בשני המקרים האבקן נע נגד כוח הכבידה.¹

ישנם שלושה כוחות המשפיעים על האבקה:

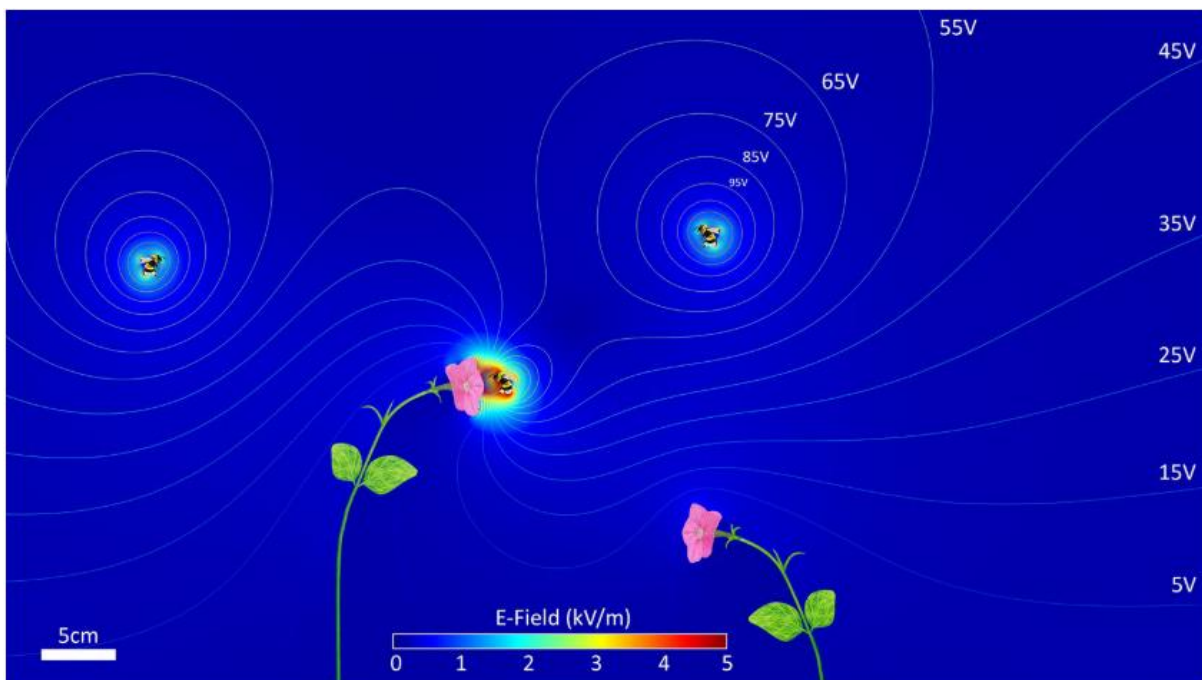
1. כוח הכבידה ($g \cdot m$) לכיוון הקרקע)
2. כוח חשמלי (חוק קולון $F = k \frac{q_1 q_2}{r_2}$ כאשר $k = 9 \cdot 10^9 \left[\frac{Nm^2}{C^2} \right]$ קבוע קולון)
3. גרר ויסקוזי (מספר ריינולדס נמוך)

תאוצת האבקה מחושבת כסכום של שלושת כוחות אלה חלקי מסת האבקן.¹

הכוח השני הינו הכוח בין שני גופים טעונים כאשר r הינו המרחק ביניהם.²



איור 3 - באיור A שרטוט סכמטי של חוק קולון. באיור B ניתן לראות את היחסים בין דבורה לפרח והמטענים החשמליים על כל אחד.² הכוח הנדרש לשחרר, לדוגמא, אבקן אבוקדו, אקליפטוס וליזינתוס הינו $[N] 4 \cdot 10^{-10}$, $[N] 3 \cdot 10^{-10}$ ו- $[N] 39 \cdot 10^{-10}$ בהתאמה.²



איור 4 - מודל אלמנטים סופיים של אינטראקציות חשמליות בין דבורי בומבוס טעונות חיוביות לבין פטוניות מקורקעות על רקע שיפוע הפוטנציאל האטמוספרי.¹

מחקרים מראים כי האבקה תחת שדה חשמלי הייתה יעילה יותר ב-33% מאשר ללא שדה חשמלי.³ מטען של אבקן נקבע על ידי מהירותו והכוחות הפועלים עליו מהשדה החשמלי בסביבתו. האבקנים נעים באוויר חווים כוח גרר התלוי במספר ריינולדס



$$(1) \quad Re = \frac{LU\rho_a}{\mu}$$

כאשר L הוא ממד האבקון, U המהירות היחסית של האבקון. ρ_a הינו צפיפות האוויר ו- μ הוא מקדם הגרר הדינאמי.

הערכת רדיוס האבקה והטעינה ממדידת מהירות

מטען האבקנים יכול להיקבע על ידי מדידת המהירות בשדה חשמלי אופקי. גרגרי אבקה הנעים באוויר חשים כוח גרר התלוי במספר ריינולדס לפי הנוסחה לעיל. גודל אופייני למספר זה באוויר הוא 0.02 (כאשר המהירות הינה $0.03 \frac{m}{s}$ וברדיוס של $10 \mu m$). עבור ערכי ריינולדס קטנים ($Re < 1$), כוח הגרר של ספירה ניתן על ידי משוואת סטוקס:

$$(2) \quad F_D = 6\pi\mu Ua$$

כאשר F_D הוא כוח הגרר, a הוא הרדיוס האבקה.

בהעדר שדה חשמלי, האבקנים נופלים ישירות מטה בגלל השפעת כוח הכבידה במהירות קבועה (U_y). במהירות הסופית כוח הגרר מאזן את כוח הכבידה:

$$(3) \quad 6\pi\mu Ua = mg = \frac{3}{4}\rho_p\pi g$$

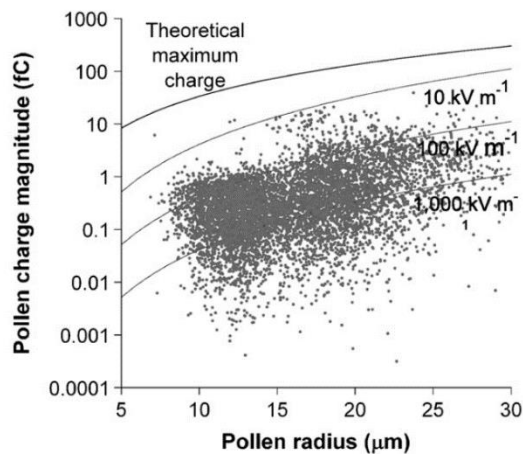
כוח הכבידה שווה לתאוצת כוח הכבידה (g) מוכפל במסה (m) של האבקה. בהנחה שגרגרי האבקה בצורת כדורית (רדיוס a) עם צפיפות (ρ_p) שווה לזו של מים ($1000 kg/m^3$), מרכיב עיקרי בתוך האבקה. סידור מחדש של המשוואה הנ"ל כאשר את רדיוס האבקה ניתן לקבוע מן מהירות:

$$(4) \quad a = \sqrt{\frac{9\mu U_y}{2\rho_p g}}$$

טעויות בחישוב ברדיוס יכולות לנבוע ממספר סיבות: כאשר הצפיפות האמתית אינה תואמת לזאת שהונחה. כשאר גרגרי האבקה אינו בעל צורה כדורית וכיוצא מזה⁴.

בבדיקה שנערכה בארצות הברית על מספר פרחים שונים, נמצא כי בממוצע המטען החשמלי הנושא אבקן הוא חיובי וערכו הוא $0.84 fC$.⁴

כאשר השדה החשמלי של המדידה כבוי, גרגרי אבקה נפלו כמעט ישר למטה, דבר המצביע על כך שהתנועה האופקית נצפתה כאשר השדה היה נובעת מהכוח האלקטרוסטטי על גרגרי האבקה הטעונים ולא מזרם האוויר.⁴



איור 5 - הטעינה האלקטרוסטטית הנמדדת (fC) עבור גרגרי אבקה בודדים (נקודות אפורות) עבור שמונה המינים כפונקציה של גודל. הקווים הכהים מציגים את גודל המטען הדרוש כפונקציה של גודל גרגר האבקה (רדיוס) עבור כוחות אלקטרוסטטיים לכוחות כבדים שווים בשלושה ערכי שדה חשמליים. הקו העליון ביותר של המטען המקסימלי, מראה את המטען המרבי האפשרי התיאורטי לגרגר אבקה בגודל מסוים.

אומדן של המטען הדרוש להשפעה על אבקה ניתן להשיג על ידי השוואת הכוחות האלקטרוסטטיים לכוח הכבידה עבור אבקן כדורי (רדיוס a ו- ρ_p צפיפות שווה למים, $1000 \frac{kg}{m^3}$) בשדה חשמלי ידוע (E) ניתן לקבל בעזרת הנוסחה:

$$(5) \quad q = \frac{4}{3} \pi \rho_p g a^3 / E$$

כאשר g הוא תאוצת כוח הכבידה. הכוחות האלקטרוסטטיים היו החשובים ביותר כאשר באבקן קטן ואילו המטען שבו הם טעונים גדול. באיור (5) ניתן לראות הקווים הדקים המציגים את המטען הדרוש לכוחות אלקטרוסטטיים וכוחות הכבידה כדי לאזן את גרגרי האבקה הגדלים בשלושה גודלי שדה חשמליים

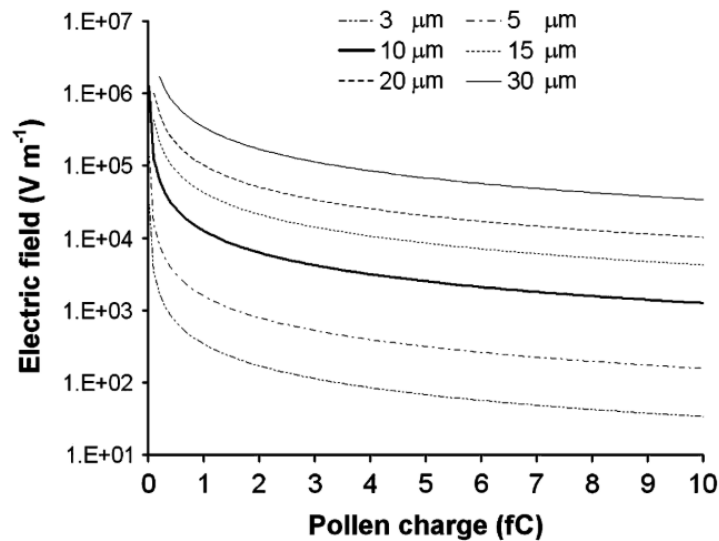
($10, 100, 1000 \frac{kV}{m}$). עבור רוב גרגרי אבקה שנבדקו בניסוי זה, שדות חשמליים בעוצמה של

$100 - 1000 \frac{kV}{m}$ נדרשים כדי שהכוחות האלקטרוסטטיים ישתוו לכוח הכבידה.

עבור אבקן בגודל מסוים, השדה החשמלי יועל להימצא ישירות על ידי משוואה (5) בעזרת E . עבור גרגרי אבקה של רדיוסם גדול מ- $15 \mu m$ ו- $E > 0.4 fC$, דרוש שדה חשמלי גדול מ- $100 \frac{kV}{m}$ כדי שהשדה ישתוו לכוח הכבידה.



שדות חשמליים חלשים יחסית ($\sim 10 \frac{kV}{m}$) ישפיעו על אבקנים ($a = 10 \mu m$) אשר נושאים יותר ממטען של $1 fC$. עבור אבקנים מאוד קטנים ($a < 5 \mu m$), השדה החשמלי משמעותי יותר משפיע מכוח הכבידה, כמעט לכל מטען הנושא אבקן.



איור 6 - השדה החשמלי הדרוש לאזן את הכוחות החשמליים והכבידה כפונקציה של מטען האבקן. עבור אבקנים ברדיוס של בין 3 ל- $30 \mu m$.

המטען התיאורטי המקסימלי (q_{max}) הנישא על ידי האבקן נקבע באמצעות שדה חשמלי הפועל על פני השטח של האבקן, אשר מגביל את המטען לנקודת המקסימום של השדה של האוויר (בערך $3 \times \frac{10^6 V}{m}$). תלוי בגודל האבקן ובצורתו. עבור אבקן עם צורה חלקה ורדיוס a :

$$(6) \quad q_{max} = 12 \times 10^6 \pi \epsilon_a a^2$$

כאשר ϵ_a הוא קבוע החשמל של האוויר ($8.854 \times 10^{-12} \frac{farads}{m}$).⁴

מספר מחקרים מראים כי דבורה מתה המחוברת להפרש פוטנציאלי של $750V$, יכולה לגרום לניתוק של אבקנים מהמאבק קרקעי ולקפוץ לגובה של $0.63 mm$. תחת אותו פוטנציאל, אבקן מאותו סוג הגיע לגובה של $0.376 mm$ מדבורה טעונה לצלקת קרקעית.⁵

הדבורה

ממדידות שנערכות על דבורים התגלה כי כל דבורה טעונה במטען של לפחות $45pC$. ואילו הפרש פוטנציאליים של $450 V$ בחלקים מסוימים בגוף הדבורה.

המטען על דבורה יכול להימצא בצורה הבאה⁵:

$$(7) \quad Q_b = 4\pi\epsilon_0 E r^2$$



כאשר r הינו המרחק ממרכז מסה לנקודה המדידה. ϵ_0 קבוע דיאלקטרי בוואקום. ו- E השדה החשמלי שנמדדה באותה נקודה.

הקיבול של כדור C הוא⁵:

$$(8) \quad C = 4\pi\epsilon_0 r_s$$

כאשר r_s הוא רדיוס הכדור. עבור כדור ברדיוס של 8.8 mm הקיבול הוא 0.49 pF .

הפוטנציאל על פני השטח של הדבורה, V , עבור מטען מבוזר ואחיד נקבל⁵:

$$(9) \quad V = \frac{Q_b}{C}$$

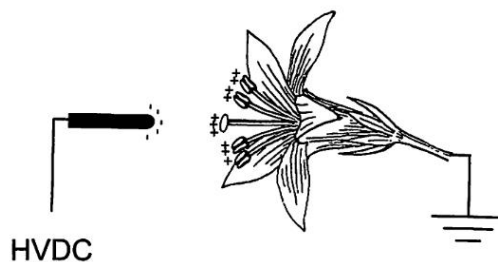
השדה האלקטרוסטטי שנמדד על דבורה לאחר טיסה ופעילות ממושכת הגיע לעד $15.2 \frac{V}{mm}$.

נמצא כי המרחק הממוצע בין מרכז המסה של הדבורה לפרח הוא 7.4 mm . הוא שאומר שהמטען הממוצע של הדבורה הוא 23.1 pC . והפוטנציאל החשמלי עליה הוא 46.7 V .

הפרח

מניסויים שנערכו כי לקבוע כיצד ניתן לשחרר אבקן מהפרח, חוברה אלקטרודה בעלת מתח ישיר של $0 - 30 \text{ kV}$. השתמשו בשתי סוגי אלקטרודות כדי לוודא את נכונות התוצאות. האלקטרודה הראשונה הייתה שטוחה בגודל של $50 \times 50 \text{ mm}$ של פלטת מתכת. האלקטרודה השנייה הייתה סיכת מתכת בקוטר של 4 mm בעלת שכבת בידוד בעובי של 1 mm . כדי למצוא איזה כוח דרוש כדי לנתק גרגר אבק, הוגדל בהדרגה עוצמת השדה האלקטרוסטטי באזור הפרחים. השדה הוגדל על ידי הגדלת הפוטנציאל או על ידי הפחתת הפער בין האלקטרודה לבין המאבק (האנטר).

כוח הניתוק הפועל על חלקיק הממוקם בקצה סיכה המחוברת לקרקע הוא תוצאה של תופעה הנקראת השראה אלקטרומגנטית, כאשר גוף טעון גורם למטען בסימן ההפוך לקצה של גוף הקרוב אליו ומחובר לקרקע. באיור הבא ניתן לראות מערכת המודדת את הכוח הניתוק הדרוש בין אבקנים בפרח כאשר מהצד השני ישנה אלקטרודת סיכה בעלת פוטנציאל המוגדר מראש לפי מיקום האבקנים.



איור 7 - המערכת המשמשת לקביעת כוח ההפרדה שמופעל על ידי אלקטרודת סיכה מחוברת לפוטנציאלים שונים. האיור ממחיש את מנגנון הטעינה והפעלת כוח על אובייקט מקורקע.



המטען המושרה על גרגר אבקה שהופעל על ידי הפלטה המתכתית חושב בעזרת טכניקת "קירוב רצוף של תמונות". הפתרון מתייחס לפרח כאל כדור מוליך.

המטען המושרה על גרגר אבקה שהופעל על ידי הסיכה המתכתית נמצא טכניקה אמפירית. ערך השדה החשמלי E , בנקודה מסוימת נמדד והמטען המושרה Q_p , חושב באמצעות הנוסחה:

$$(10) \quad Q_p = 1.65(4\pi\epsilon_0 r_p^2 E)$$

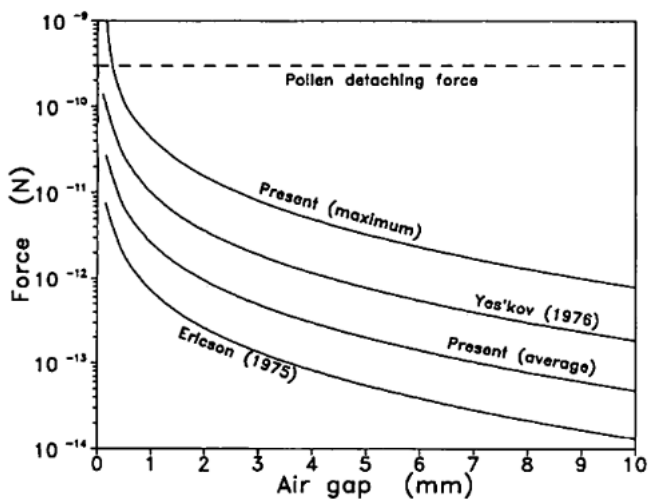
כאשר r_p הוא רדיוס באבקה.

אם הערכים של מטען האבקה ושל השדה החשמלי ידועים, נכוח F , הניתן על ידי הנוסחה הפשוטה:

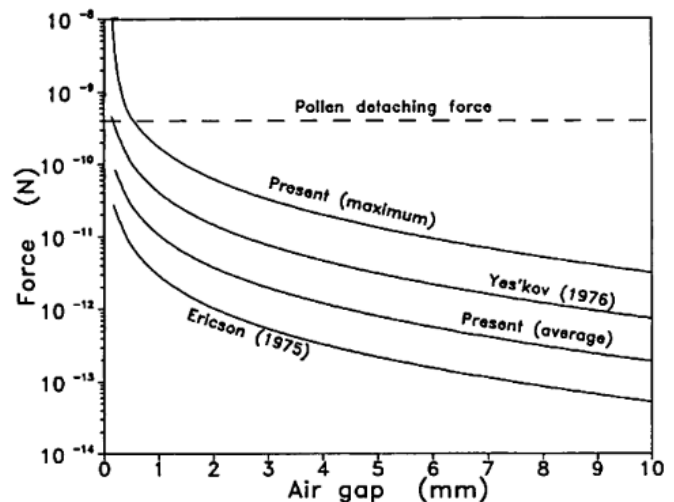
$$(11) \quad F = EQ_p$$

בגלל ממדיו הקטנים של האבקה (רדיוס אופייני של אבקה הוא כ- 0.015 mm) והשיפוע המתון של גרדיאנט השדה החשמלי, הטעות בחישוב הכוח תחת ההנחות של שדה קבוע ואחיד, קטנה מ-1%. הרווח המקסימלי שניתן לנתק אבקה מפרח חושב באמצעות הכוח של הדבורה וכוח ההפרדה הדרוש. שדה ההפרדה והכוח ההפרדה נקבעו כאשר המסה הראשונה של אבקים השתחררה מהמאבק.⁵

תוצאות המחקר מראות כי כוח הדרוש לאבקה האבוקדו מהאלקטרודות הינו $4 \times 10^{-10} \text{ N}$, ועבור אבקה האקליפטוס הוא $3 \times 10^{-10} \text{ N}$ ולאבקה הליזינטוס הוא $3.9 \times 10^{-10} \text{ N}$. המרחק עבור אבוקדו הוא 0.005 mm במחקר הנ"ל.⁵



איור 9 - הכוח המושרה על אבקה האקליפטוס כפונקציה של מרחק הדבורה הטעונה.



איור 8 - הכוח המושרה על אבקה האבוקדו כפונקציה של מרחק הדבורה הטעונה.



Experiment number	Potential (V)	Detaching distance (mm)	Electric field (V/mm)	Pollen charge (C)	Detaching force (N)
1	10000	20	305	9.5E - 15	2.9E - 09
2	15000	30	371	1.2E - 14	4.3E - 09
3	20000	40	404	1.3E - 14	5.1E - 09
4	25000	60	385	1.2E - 14	4.6E - 09
5	30000	120	293	9.1E - 15	2.7E - 09
Average			351.6	1.1E - 14	3.9E - 09
Std.			49.6	1.5E - 15	1.1E - 09

איור 10 - מדידת השדה החשמלי והכוח המחושב הדרוש לנתק אבקנים מפרח הליזינטוס.

שדה אלקטרוסטטי- Van De Graaff

VDG הינו מכשיר מכני המייצר חשמל במתח גבוה וזרם מתמשך נמוך. הוא מתואר מכשיר חשמלי עם "זרם קבוע". הוא יוצר שדה על ידי הפעלת אפקט טורבו-חשמלי ויכול לייצר חשמל בטווח של 350,000 וולט.

האפקט הטורבו-חשמלי (the Triboelectric Effect)

אפקט זה הוא סוג של קשר חשמלי בין חומרים מסוגים שונים שהופכים לטעונים חשמלית לאחר שבאים במגע אחד עם השני ואז מופרדים. הקוטביות ועוצמת השדה המיוצרת נקבעת על ידי סוג החומרים הבאים במגע, פני השטח שלהם ורמת החספוס שלהם, הטמפרטורה, הכוח המופעל עליהם (מתוחות גומייה לדוגמא) וגורמים נוספים.

הרכב המערכת

מערכת ואן דה גראף בדרך כלל מושתתת על עיקרון רצועה וסלילים במבנה הבסיסי שלה. מערכת כזו בדרך כלל מורכבת מהרכיבים הבאים:

- מנוע
- שתי גלגלות (אחת עליונה ואחת תחתונה) - אחת מ-PVC או כל חומר מבודד אחר והשנייה מחומר מתכתי)
- שתי אלקטרודות - עליונה ותחתונה ("מסרק" מתכתי)
- רצועה (גומי, ניילון וכו.).
- פתח יציאה (כיפת אלומיניום חלולה)

דרך פעולה

- לשדה שלילי - על ידי הפעלת המנוע, הגליל התחתון (המתכתי) מתחיל להטען חיובית. הרצועה מתחילה כתוצאה מכך להטען שלילית בחלקה הפנימי. המשטח החיצוני של הרצועה נטען חיובית. האלקטרודה התחתונה מנקזת מטענים חיוביים אלה לקרקע. המטענים השליליים על פני השטח הפנימי של הרצועה מתחילים לנוע מעלה כך שנוצר בחלק העליון ריכוז של מטענים שליליים בעזרת



גלגלת ה-PVC ואילו המטענים החיוביים נמשכים מטה אל הגלגלת הנמוכה. לאחר זמן קצר של פעולה ישנה הצטברות של מטענים שליליים בצד אחד וחיוביים בצד השני. המטענים השליליים מועברים לכיפת אלומיניום ע"י האלקטרודה העליונה ואילו החיוביים מועברים לקרקע על ידי האלקטרודה התחתונה.

- לשדה חיובי – דרך הפעולה דומה רק הפוכה- המטענים החיוביים מועברים לכיפת האלומיניום ואילו השלישיים לקרקע.

נוסחאות לחישוב המתח והמטען

שדה חשמלי E של ספירה על מטען חשמלי Q נתון על ידי:

$$(12) \quad E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

כאשר Q מוגדר בתורה הבאה:

$$(13) \quad Q = CV$$

הקיבולת C של כדור ברדיוס r:

$$(14) \quad C = 4\pi\epsilon_0 r$$

בתנאים סטנדרטיים (אוויר יבש, טמפרטורה ולחץ סטנדרטיים) השדה החשמל המקסימלי הם כ- $\frac{3MV}{m}$ ולכן

$$V_{max} = 3 \cdot 10^6 r_{optimum} [volts], \text{ כאשר } r_{optimum} = 0.125 \text{ m ואז מקבלים } V_{max} = 375000 [volts]$$

$$Q_{max} = 5.2 [\mu C] \text{ הינו החשמלי הנו}.$$

חישוב הזרם:

נגיד I הזרם הזורם ברצועה. נניח כי על הרצועה יש את צפיפות המטען המקסימלית והעברת הזרם הינו רק כלפי מעלה. אזי

$$(15) \quad I = 4E_{max} wv$$

כאשר w הוא רוחב הרצועה ו-v הוא מהירות סיבוב הרצועה.

מכשיר האבקה מלאכותית

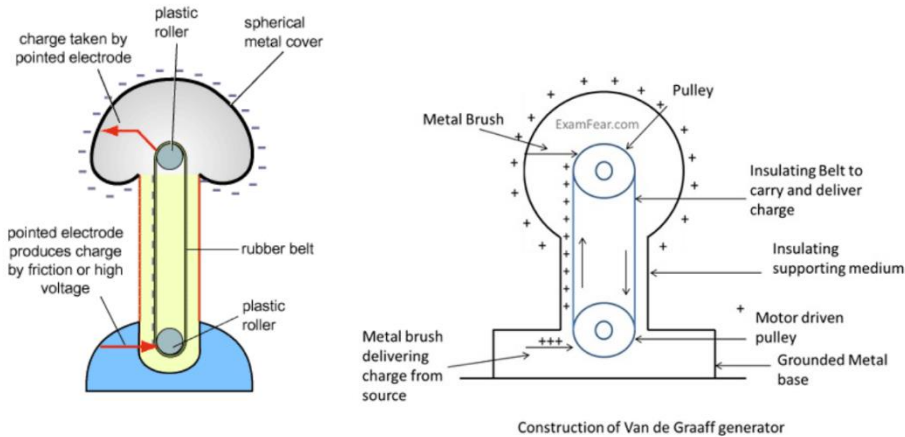
המכשיר יתוכנן לבצע 3 פעולות:

1. אסיפת האבקנים בעזרת שדה אלקטרו-חשמלי
2. אחסון האבקנים עד לפיזורם
3. פיזור האבקנים ע"י יצירת שדה חשמלי נגדי.

בעבודה זו נתמקד בשלבים 1 ו-3. לשלבים אלו נשתמש במכשיר ואן דה גראף אשר מורכב מרצועת גומי בין שני גלילים מפלסטיק, אשר האחד מחובר למנוע אשר שולט על המתח הנוצר. בעזרת סיבוב של הרצועה בין

גלילים אלו, נוצרת הולכת של אלקטרונים. סיבוב לכיוון מסוים יותר שדה חיובי וכן סיבוב לצד השני יוצר שדה שלילי. סביב הגליל החופשי (אשר לא מחובר למנוע) ישנה מעטפת מתכתית אשר מפזרת את המטען שנוצר מהפעולה בצורה אחידה וכן עוזרת ליצירת ריכוז המטענים והשדה על המשטח הרצוי. מעטפת זו תהיה בקוטר של פרח חמנייה ממוצע.

להלן שתי דוגמאות סכמתיות להבנת מבנה המכשיר, חלקיו ודרך פעולתו.



איור 11 - שרטוטים סכמתיים של מכשירים הפועלים בשיטת VDG. מצד ימין מכשיר היוצר שדה חיובי ומשאל מכשיר היוצר שדה שלילי.

תכניות ניסויים

ישנם מספר דברים שיש לבדוק כדי שמכשיר כזה יפעל כהלכה:

עוצמת השדה שיש להפעיל וכן המרחק האופטימלי של המכשיר מהפרח.

לאחר קביעת נתונים אלו יש לבחון האם המכשיר אכן עונה על הדרישות ומצליח לאסוף ולשחרר מספיק אבקנים.

לשם כך צריך לבצע 2 מערכי ניסוי:

הראשון: סט ניסויים שמטרתם לבדוק את עוצמת השדה בשילוב עם המרחק האופטימלי מהפרח.

מערכת הניסוי תכלול מספר פרחי חמנייה בשלבי הבשלה שונים (כפי שניתן לראות באיור למטה), מכשיר היוצר שדה חשמלי (בעדיפות המכשיר הנ"ל, אך כל מכשיר שמתבסס על VDG יתאים לקבלת סדרי גודל). מד

מדידת מרחק

מהלך הניסוי:



הפעלת המכשיר במספר מרחקים שונים הידועים מראש ובכל מרחק יש להפעיל בעוצמה שונה את השדה החשמלי ובכל פעם לבדוק כמה אבקנים נמשכו למכשיר והאם התרחש נזק כלשהו לפרח.

חשוב לציין שאת המכשיר יש להניח על מתקן קבוע (סטטי) שניתן לשנות את גובהו וכך ליצור מדידות מדויקות ואמינות יותר ללא התערבות יד אדם.

יש לחזור על הניסוי, אך כעת יש לאבק את הפרחים (יצירת שדה חשמלי הפוך) לבדוק מהו השדה הנדרש לשחרור האבקנים וחזרתם לפרח. (הפעם במקום פרחים עם אבקנים יש לקחת פרחים ללא אבקנים ולספור כמה אבקנים נתפסו על הפרח לאחר כל פעולה).

השני: סט ניסוי שמטרתם לבחון את יעילותו של המכשיר.

מערכת הניסוי: מספר פרחי חמנייה (בשלב הבשלה שונים), המכשיר המכויל לעוצמת השדה שמצאנו בניסוי הקודם. מתקן סטטי שניתן להניח עליו את המכשיר שיאפשר מרחק קבוע מהפרח (המרחק שנמצא בניסוי הקודם).

מהלך הניסוי:

יש להפעיל את המכשיר בעוצמה הרצויה ובמרחק הרצוי כל פעם על פרח שונה ולבחון כמה אבקנים נקלטו על המכשיר. וכמה אבקנים נשארו על הפרח.

בשלב השני יש להפעיל את המכשיר כאשר השדה בכיוון השני ולבחון כמה אבקנים נקלטו על הפרח.

כמובן שבכל חלקי הניסוי יש לראות כי לא נוצר נזק לפרח.

בסוף יש לבדוק מה אחוזי ההצלחה של המכשיר והאם יש צורך לחזור על הניסוי הראשון מחדש על מנת לקבל תוצאות מספקות יותר.

סיכום, מסקנות ואפשרויות פיתוח

לאור הממצאים המובאים בעבודה זו, ניתן לומר כי ניתן לבנות מכשיר להאבקה מלאכותית בפועל בעזרת שיטת Van De Graaff, אשר יוכל לאבק חמניות מתורבתות ואף בהמשך סוגי פרחים נוספים מתורבתים מאותו הסוג (שדות פרחים חקלאיים).

מכשיר זה יאסוף ויפזר אבקנים ואף יאחסן את האבקנים עד לפיזורם. בנוסף, המכשיר יאפשר לחקלאי גמישות מסוימת בכך שיאפשר לו לקבוע מתי הזמן הנכון ביותר לפזר את האבקנים ולשלוט על המשך פיתוח את היבול.

עבודה זו הינה רק החלק התיאורטי של פיתוח מכשיר מסוג זה. בהמשך יש לערוך את סדרת הניסויים המתוארים לעיל, להוכיח התכנות ולהגיע למספרים מדויקים המתאימים ספציפית לפרחי החמנייה.

בהמשך יש לפתח סט ניסויים נוסף לאפשרות של אחסון האבקנים בתנאי אידיליים מבלי גרום להם נזק.



כאשר פיתוח זה יגיע לסופו, ניתן באופן פשוט על ידי עריכת ניסויים מתאימים, להסב מכשיר זה לסוגי נוספים של פרחי שדה ואף ניתן להוסיף אפשרות של שינוי ושליטה על עוצמת השדה החשמלי ורגישות המכשיר ובכלל להפוך אותו רב שימושי לסוג זה של האבקה.

ישנם יתרונות רבים למכשיר זה, הן כלכליים והן אידאולוגיים. הוא יוכל לצמצם את עליות האבקה שכיום החקלאי משלם על ידי השכרת כוורות, וכן לפתור חלקית את בעיית היכחדות דבורי הדבש על ידי החלפתן בנוסף, יאפשר לחקלאי לקבל תשואה טובה יותר ושליטה על יבולו.

מקורות

1. Clarke D, Morley E, Robert D. The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception. *J Comp Physiol A Neuroethol Sensory, Neural, Behav Physiol.* 2017;203(9):737-748. doi:10.1007/s00359-017-1176-6
2. Vaknin Y, Gan-Mor S, Bechar A, Ronen B, Eisikowitch D. The role of electrostatic forces in pollination. *Plant Syst Evol.* 2000;222(1-4):133-142. doi:10.1007/BF00984099
3. Vaknin Y, Gan-mor S, Bechar A, Ronen B, Eisikowitch D. Are flowers morphologically adapted to take advantage of electrostatic forces in pollination? *New Phytol.* 2001;152(2):301-306. doi:10.1046/j.0028-646X.2001.00263.x
4. Bowker GE, Crenshaw HC. Electrostatic forces in wind-pollination-Part 1: Measurement of the electrostatic charge on pollen. *Atmos Environ.* 2007;41(8):1587-1595. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.047
5. Gan-Mor S, Schwartz Y, Bechar A, Eisikowitch D, Manor G. Relevance of electrostatic forces in natural and artificial pollination. *Can Agric Eng.* 1995;37(3):189-194. http://csbe-scgab.ca/docs/journal/37/37_3_189_ocr.pdf.