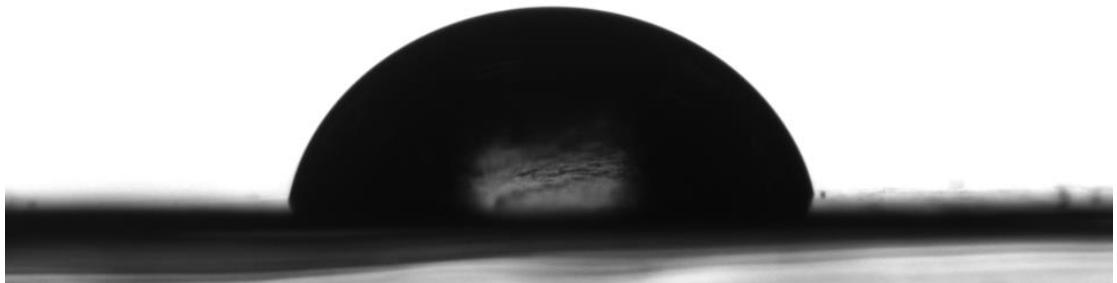


מבוא לעיבוד וניתוח תמונה 71254

חישוב קצב התאדות של טיפה

אבישי שורץ, אורן אפשטיין

6.2.26



1. מבוא

השימוש בתרסיסים חקלאים הוא אבן יסוד בחקלאות המודרנית, ומשמש ליישום חומרי הדברה, קופטי עשבים ודישון עליות.יעילות הטיפול החקלאי תלולה במידה רבה באינטראקציה שבין טיפת התרסיס לבין פני השטח של העלה, כאשר האתגר העיקרי הוא החדרת הנוטריינטים דרך שכבת הקוטיקולה השומנית אל תוך תא האפידרמי.

הקוטיקולה הינה שכבה שמרכבותה בעיקר מלחומצות שומן המועגנות לركמת האפידרמי ותפקידה למנוע איבוד מים לאטמוספירה ויציאה של מומסים מהצמח. בשל כך, הקוטיקולה מהויה מחסום בין פנים העלה לسببת החיצונית. אופייה הריאודרובי של הקוטיקולה ומבנה פני השטח שלה גורמים לכך שטיפות מים שבאה במעט עם העלה נשמר על זווית גבוהה גבואה ותתרפרש פחות, כתוצאה לכך, יכולת חדירת הנוטריינטים לעלה תהיה קטנה יותר.

לשם כך, תכשירים מסחריים לדישון עליות וрисוס כוללים לרוב חומרים פעילי שטח (חפ"שים, Surfactant) אשר משנים את מתח הפנים של הטיפה ומגבירים את יכולת התפרשותה וגם את קצב ההתאדות של הטיפה. קצב ההתאדות הטיפה נמצא כבעל השפעה ישירה על חדירת הרכיבים הפעילים דרך קוטיקולת הצמח. מצד אחד, הגדלת שטח הפנים של הטיפה על פני העלה מאפשרת שטח מגודל יותר ומגבירה את יכולת חדירות הנוטריינט אך מצד שני קצב ההתאדות הטיפה מגבר וכך הסיכוי לחדרת נוטריינטים דרך העלה קטן. דינמיקה זו מתמכת על ידי מחקרים^{1, 2, 3}. שהראו כי שיפור התפרשות הטיפה באמצעות תוספים בא פעמים רבות על חשבון משך זמן ההתאדות^{4, 5, 6}.

כדי להבין את דינמיקת הטיפה וההתאדותה, ואת ההשפעה המשולבת של החפ"שים והמשטח עליו יושבת הטיפה, נשתמש בטכניקת *lapse Time*. שיטה זו מאפשרת מעקב רציף אחר השינויים טיפה על משטח במשך זמן. ניתוח סדרת התמונות, תוך חישוב השינויים בנוף ובגיאומטריית הטיפה, מאפשר לכמת את קצב ההתאדות ואת תהליכי התפרשות, ובכך להבין יותר את האינטראקציות הפיזיקליות המתרכחות בזמן אמיתי.

מורכבות זו מוגמת היבט בגדיל אורז (*Oryza sativa*) אשר עליו מתאפיינים בהידרוביוטו רבה. במחקר מ-2017⁷ הוגם כי שינויים קטנים ברכיב החפ"ש יכולים לשנות באופן דרמטי את התנוגות הטיפה, לעיתים לעכב את ההתאדות ולעתים להאט אותה בצורה ניכרת. רגישות זו מדגישה כמה חשוב להבין לעומק את הקשר שבין הנוזל למשטח, ומדגישה את הצורך בcoli מדידה ממוחשבים ומדויקים.

מטרת מחקר זה היא לפתח אלגוריתם שי מדוד את השינוי בגובה הטיפה וברדיוס המגע כתלות בהידרוביוליות המשטח ובתוספת חפ"ש, ולחשב מתוכם את קצב ההתאדות הטיפה באמצעות כלים של עיבוד תמונה.

Database .2

מאגר הנתונים בפרויקט מבוסס על סדרות זמן של תמונות שהופקו באמצעות מכשיר מדידה מסווג Optical Contact Angle Goniometer. כל סדרת תמונות מתעדת את תהליך ההתאדותה של טיפה אחת, מרגע שחרורה על המשטח ועד להתאדות מלאה. קצב הדגימה הוא תמונה אחת כל 0.9 שניות, ונפח הטיפה הראשוני בכל הניסויים קבוע והוא על 6 מיקרוליטר.

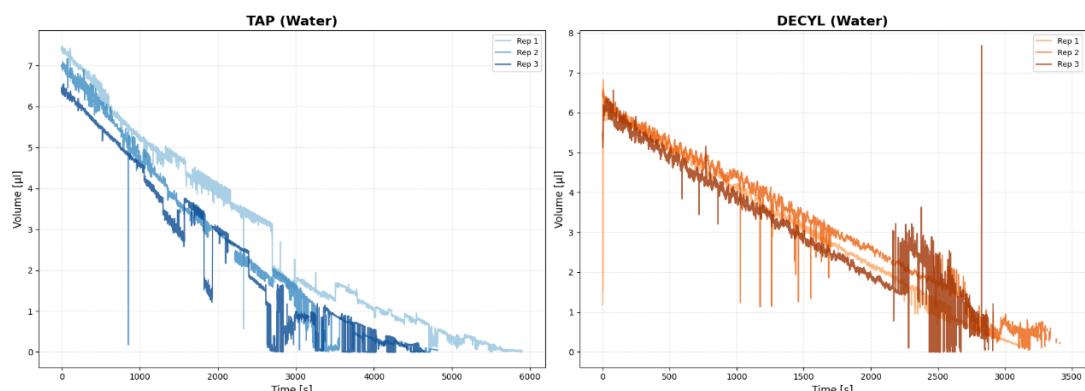
המاجر כולל ניסויים שבוצעו על שלושה סוגי משטחים בעלי תכונות שונות: זכוכית, נייר פארפילם ועלי פלפל (*Capsicum annuum*). בנוסף, נבחנה השפעת הוספת חומר פעיל-שתח בעל זנב הידרופובי באורך של 10 אטומי פחמן (Decyl), בהשוואה לטיפות מי ברץ ללא תוסוף (Cap). עבור כל שילוב של משטח ונוזל נאספו מספר חזרות.

נציין שבעבודה זו לא ניתחנו עלי פלפל בשל המורכבות של התמונות.

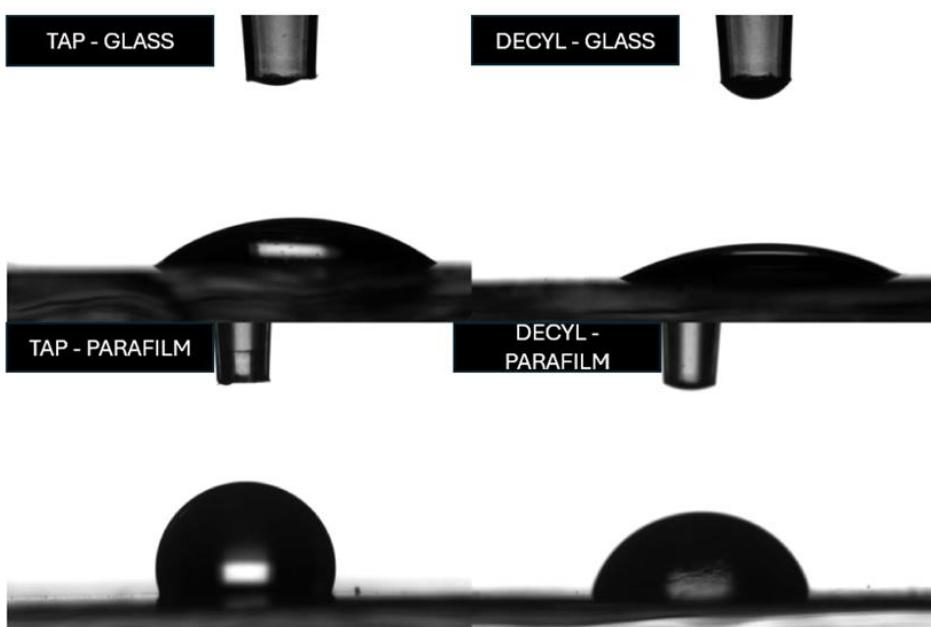
מגבילות המכשור והמטריבציה לפיתוח הכלל-

למכשיר המדידה קיימת יכולת מובנית לחישוב נפח הטיפה. עם זאת, בדיקה מקדימה של נתוני הפלט העלתה כי החישוב המבונה סובל מרעש משמעותי, חסור יציבות וחוסר דיוק לאורך זמן. מוגבלת זו היוותה את המוטיבציה המרכזית לפROYיקט הנוכחי: פיתוח אלגוריתם חלופי, מבוסס ניתוח תמונה, לחישוב רציף ומדויק של נפח הטיפה מתוך התמונות הגלומות.

איור 1 מציג דוגמה לפלט נפח הטיפה כתלות בזמן כפי שהושבע ע"י המכשיר לטיפולים על גבי פרפילים. האיור מדגים את הרעש והחוסר ביציבות המדידה, ששימושו כמטריבציה המרכזית לפיתוח אלגוריתם עצמאי.

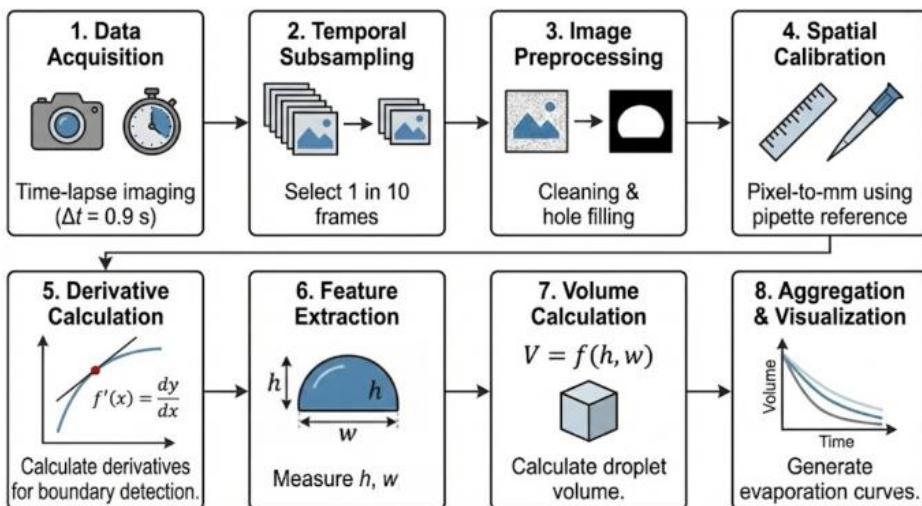


איור 1 – נפח הטיפה (L_m) עבור טיפול מי ברץ ודצל על פרפילים, כפונקציה של הזמן (s) כפי שהושבע ע"י תוכנת מכשיר המדידה המובנית.



אייר 2 – דוגמא לתמונות שהמכשיר מספק. מוצגות טיפות על משטחים שונים (פרפלים וזכוכית) בטיפול שונה (מי ברץ ודציל).

2.1 שיטות העבודה



אייר 3 – סכמת הפעולות לעיבוד וניתוח התמונות

תהליך הניתוח הממוחשב חולק לשמונה שלבים עוקבים, כמוואר בתרשימים הזרימה באיור 3.

1. איסוף נתונים – הניתוח מבוסס על סדרות זמן של תמונות המתעדות את תהליכי התאדותה של טיפה אחת, בקצב דגימה של תמונה כל 0.9 שניות.

2. דילול הנתונים – ניתוח ראשוני של פלט הטיפה הראה כי השינויים הגיאומטריים בטווחי זמן קצרים (סדר גודל של שניות בזדוזת) זניחים ביחס לדינמייקת ההתאדות הכוללת. לפיכך, לצורך ייעול זמן הריצה והפחיתה העומס החישובי, בוצעה תתי-דיגימה של הנתונים, כך שנבחירה תמונה אחת מכל עשר תמונות עוקבות.

3. כיוול – המרת יחידות מפיקסלים למילימטרים בוצעה עבור כל חזקה בנפרד, על בסיס התמונה הראשונה בסדרה. בתמונה זו מופיע קצה הפיפטור ברגע שחרור הטיפה, וקוטרו הידוע (0.8 מ"מ) שימש כקנה מידה. פונקציה ייועדיות (`compute_mm_per_pixel`) זיהתה את רוחב הגלייל של הפיפטור באמצעות ספ' נס Otsu ומדידת רוחבו בפיקסלים, ומtower כך חושב מוקדם ההמרה מ-`pix` ל-mm.

4. בחירת קו מגע (baseline) – קו המגע בין הטיפה למשטח מהו פרמטר קרייטי לחישוב הגיאומטריה של הטיפה. בשל שונות בתנאי התאורה, בקונטרסט ובמאפייני המשטח, פותחו שתי שיטות עצמאיות לזיהוי קו המגע בתמונה הראשונה בכל חזקה:

- שיטה מבוססת ניתוח פרופיל רוחב הטיפה, המזהה שינוי חד בגיןזרת רוחב המסכה לאורך ציר ה- y .
- שיטה מבוססת זיהוי מעבר חד בגרדיאנט האנכי של עוצמת האפור באזורי בתמונה בו מופיע המשטח בלבד.

שני הקווים הוצגו למשתמש, והשיטה המתאימה ביותר נבחרה לכל חזרה, על מנת להבטיח חיתוך עקבי של אזור הטיפה לאורך סדרת התמונות.

5. עיבוד תמונה ע"פ pipeline קבוע לכל תמונה בסדרת התמונות-

א. ייצרת מסכה בינהרית - כל תמונה בסדרה עובדה באמצעות pipeline קבוע שכלל חיתוך אזור עניין סביר הטיפה, טשטוש גאומטרי ושיפור קונטרסט (CLAHE), וישום סוף *Otsu* ליצירת מסכה בינהרית. בהמשך זוהה הקונטור החיצוני וחורים פנימיים במסיכה מולאו, כך שהטיפה והמשטח הוצגו כאזור רציף ומבודד מהרקע.

ב.>Zיהוי חלון הטיפה המדוייק - קו המגע שנבחר בשלב הקודם שימש כגבול תחתון קבוע לחיתוך התמונה לאורך כל סדרת התמונות. לעומת זאת, נקודות המגע האופקיות של הטיפה (x left, x right) זוהו מחדש עבור כל תמונה בנפרד, באמצעות ניתוח פרופיל הגובה של הטיפה לאורך ציר ה-x. ערכיהם אלו שימשו לחיתוך דינמי של חלון הטיפה.

6. חילוץ מאפיינים גיאומטריים – מຕוך חלון הטיפה המחולץ נמדדו שני פרמטרים גיאומטריים עיקריים: גובה הטיפה ורוחב קו המגע. גובה הטיפה הוגדר כהפרש בין ערכי ה-Y המקסימלי והמינימלי של פיקסלים השبيיכים לטיפה, ורוחב קו המגע הוגדר כמספר פיקסלים השחורים בשורת המגע התחתונה. ערכים אלו הומרו מיחידות פיקסלים למילימטרים באמצעות מקדם ההמרה שחושב בשלב הциול, ונשמרו בטבלת נתונים יחד עם זמן הדגימה.

7. חישוב נפח הטיפה – נפח הטיפה חושב עבור כל נקודה זמן על בסיס הגובה ורוחב קו המגע שנמדדו, תחת ההנחה שצורת הטיפה ניתנת לקירוב-cap spherical. רדיוס בסיס המגע חושב כחצי מרוחב קו המגע, ונפח הטיפה חושב לפי הנוסחה הגיאומטרית לנפח spherical cap:

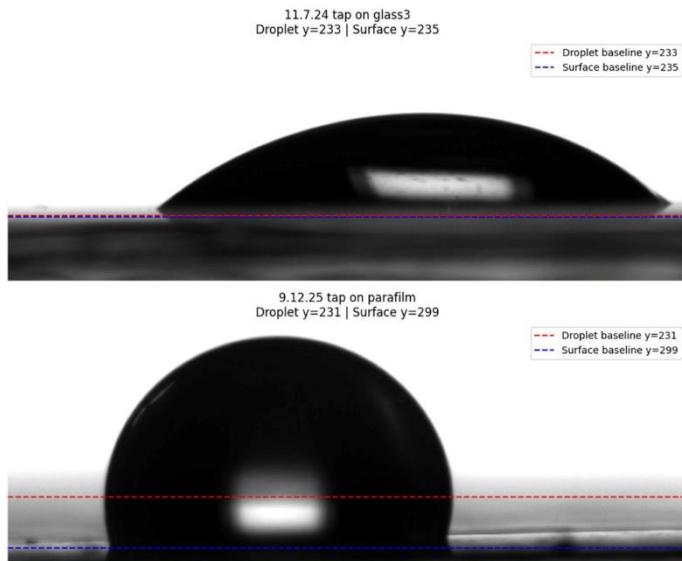
$$\text{. (1)} V_{cap[\mu\text{l}]} = \frac{1}{6} \pi h (3a^2 + h^2)$$

כאשר – V נפח הטיפה , h גובה הטיפה במ"מ , a הוא רדיוס בסיס המגע במ"מ.

8. ויזואלציה ויצוא – תוצאות הניתוח נשמרו בקובצי CSV עבור כל חזרה, וכללו את זמן הדגימה, גובה הטיפה, רוחב קו המגע ונפח הטיפה. בנוסף, חושבו ממוצעים וסטיות תקן בין חזרות לכל טיפול, והופקו גרפים המתארים את שינוי נפח הטיפה כפונקציה של הזמן לצורכי השוואה בין תנאים ניסויים שונים.

3. תוצאות

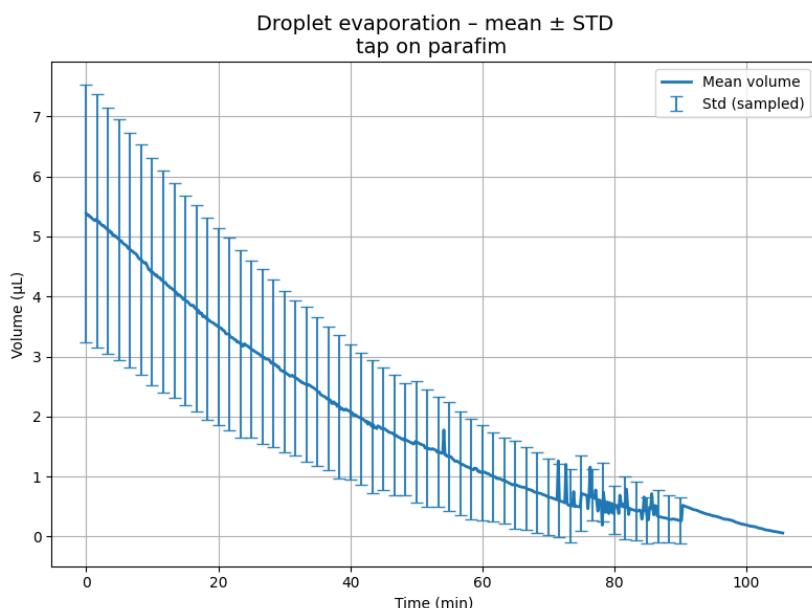
3.1 השוואה בין שיטות זיהוי קו המגע



איור 4 – זיהוי קו המגע תוך שימוש בשיטות שונות של טיפת מים והמשטח על גבי משטחים שונים.

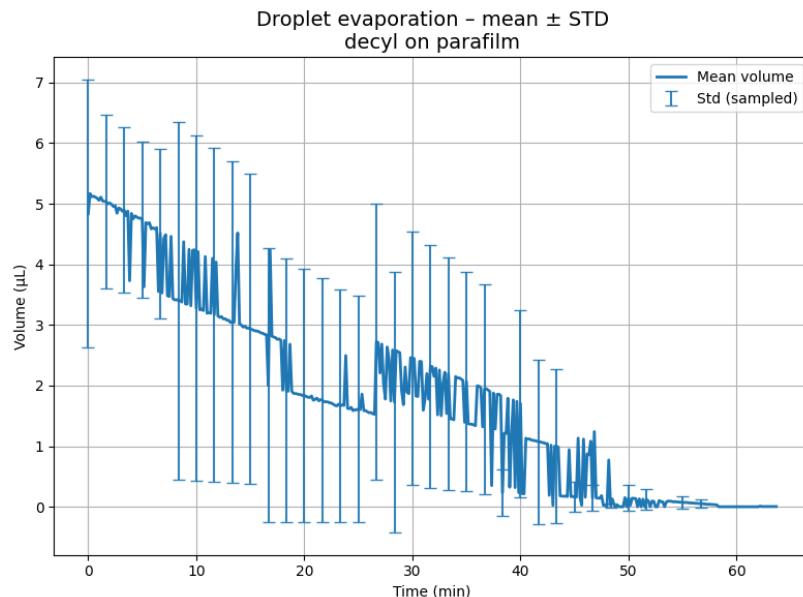
איור 4 מציג את זיהוי קו המגע בין הטיפה למשטח באמצעות שתי השיטות שיושמו בפרויקט. על גבי משטח זכוכית, שתי השיטות זיהו קוויי מגע במיקומים דומים, עם פערים קטנים בלבד. לעומת זאת, על גבי משטח פרפילם נצפו הבדלים בין קווי המגע שזוהו על ידי שתי השיטות, ללא יתרון ברור לשיטה אחת על פני השנייה.

3.2 משטח פרפילם



graf 1 - נפח הטיפה ($\text{L}\mu$) עברו טיפת מי ברץ על פרפילם, כפונקציה של הזמן (min). הגרף מציג ממוצע וסטיות תקן של החזרות שבוצעו.

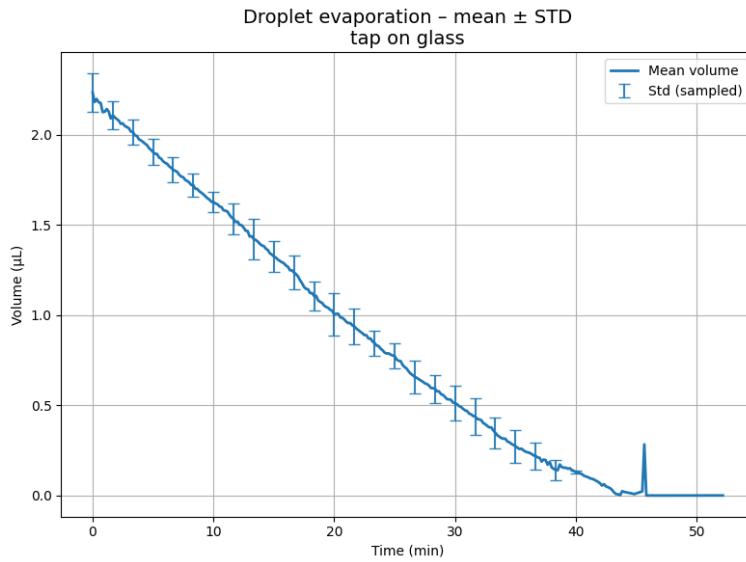
גרף 1 מציג את השינוי בನפח הטיפה כפונקציה של הזמן עבור טיפת מי ברץ (tap) על גבי משטח פרפילם. נפח הטיפה פוחת באופן מונוטוני לאורך זמן, כאשר תהליכי ההתאדות נמשך מעל 100 דקות. נצפתה שונות בין החזרות, המתבטאת בסטיות תקן גובהות יחסית, במיעוד בשלבים הראשונים של המדידה.



גרף 2- נפח הטיפה (Lm) עבור טיפות המכילות חפ"ש *decyl* על פרפילם, כפונקציה של הזמן (min).
הgraf מציג ממוצע וסטיות תקן של החזרות שבוצעו.

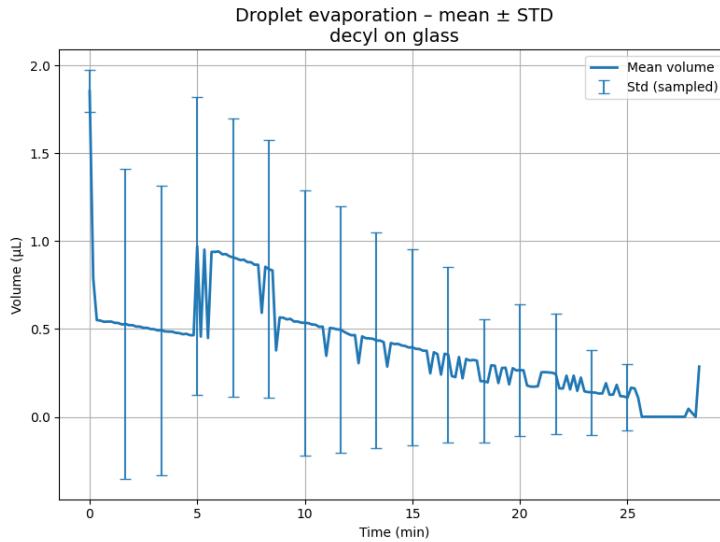
גרף 2 מציג את שינוי הנפח טיפה המכילה חפ"ש (decyl) על גבי אותו המשטח. גם כאן נצפתה דעיכה מונוטונית בנפח, אך משלך תהליכי ההתאדות היה קצר משמעותית, והסתויים לאחר כ- 60 דקות. דעיכת הנפח אינה מונוטונית לחולstein. במהלך תהליכי ההתאדות נצפו תנודות מקומיות בערכי הנפח, המתבטאות בעליות וירידות קצריות טווח סבב מגמת הירידזה הכללית. סטיות התקן עבור טיפול זה גובהות יחסית ומעידות על שונות משמעותית בין החזרות, אשר באה לידי ביטוי גם בצורה העקומה הממוצעת.

3.3 משטח זכוכית



גרף 3 - נפח הטיפה (L_m) עבור טיפות המכילות מי ברח על זכוכית, כפונקציה של הזמן (min). הגרף מציג ממוצע וסטיות תקן של החזרות שבוצעו.

גרף 3 מציג את שינוי נפח הטיפה כפונקציה של הזמן עבור טיפות מי ברח על גבי משטח זכוכית. נפח הטיפה פוחת באופן רציף לאורך זמן, כאשר משך תהליכי ההתאדות עומד על כ-45 דקות.



גרף 4 - נפח הטיפה (L_m) עבור טיפות המכילות חפ"ש decyl על זכוכית, כפונקציה של הזמן (min). הגרף מציג ממוצע וסטיות תקן של החזרות שבוצעו.

גרף 4 מציג את תהליכי ההתאדות הטיפה עבור טיפות המכילות חפ"ש Decyl על גבי משטח זכוכית. במקרה זה נפתחה דעיכה מהירה יותר בנפח, וההתאדות הושלמה לאחר כ-25 דקות. בדומה לטיפול על פרפילם, העקומה הממוצעת אינה חלקה ומציגת תנודות מקומיות בערכיו הנפח, המתבטאות בסטיות ממונוטוניות לאורך חלקי מתחילה ההתאדות.

בשני הטיפולים על גבי הזכוכית ערכו הנפח המוחשבים בתחילת המדידה נמוכים מהנפח ההתחלתי הידוע של 6 מילימטר, תופעה החוזרת באופן עקבי בין החזרות.

4. דיוון ומסקנות

מטרת הפיזייקט הייתה לפתח כל' עצמאי לחישוב נפח הטיפה מתוך סדרת תמונות לאור חוסר היציבות והרעש שנצפו בפלט המכשיר. הכל' שפיתחנו אכן מספק גրפים רציפים וברורים יותר, אך גם בהם ניתן לראות את השפעת הרעש של התמונות.

ניתוח הנתונים מדגיש כי העיבוד הגיע למציאת קו המגע בין הטיפה למשתח. שיטות זיהוי קו המגע שיושמו בפיזייקט הניבו תוצאות לא אחידות בגל' הרעש בתמונה, חוסר הניגדיות, מאפייני המשטח ואופן התפרשות הטיפה. גורמים אלו משפיעים באופן ישיר על יציבות הזיהוי ועל הדיוק של הפרמטרים הגיאומטריים המוחسبים.

זיהוי קו המגע של הטיפה והמשתח:

בעיבוד התוצאות ראיינו שיכלט הפרדת הטיפה מהמשטח משתפרת לפי אופן התפרשות הטיפה. זיהוי טיפת המים על משטח הפרפילים ההידרופובי היה טוב יותר מאשר טיפה המכילה חוף"ש על אותו משטח. לעומת זאת, על גבי זכוכית זיהוי הטיפה היה מורכב יותר. התפרשות רחבה יותר של הטיפה על משטח הידרופולי, יחד עם השתקפות אופטיות נוספות לצכוכית, הקשו על מציאת נקודת קיצון חדה בפרופיל הגיאומטרי והובילו לחוסר יציבות בזיהוי קו המגע.

השפעת המשטח והחוף"ש על קצב ההתאדות:

הוסף החוף"ש השפיעה באופן ברור על קצב ההתאדות ועל צורת עקומות הנפח, הן על פרפילים והן על זכוכית. לאחר שהחוף"ש משנה את מתח הפנים של הנוזל ומאפשר התפרשות רחבה יותר של הטיפה, מתבלטת הגדלה של שטח הפנים החשוף לאוויר, ובהתאם האצה בקצב ההתאדות. הבדל זה ניכר גם כאשר שיטת המדידה עצמה סובלת מרעיש, מעמיד כי הכל' החישובי מצליח לכלוד מגמות יחסיות בין טיפולים, גם אם הערכים האבסולוטיים אינם מדויקים במיוחד.

התוצאות והשפעות על תנאי המדידה:

במהלך ניתוח זההה סדרת מדידות שבוצעה ביום מסוים, שבה התקבלו ערכי נפח נמוכים באופן עקבי ביחס לשאר המדידות על גבי פרפילים. באותו יום נמדד גם ערך המרה חריג בין פיקסלים למילימטרים, מה שמרמז על הטיה בכיוול. יתרון לכך הוא השימוש בקצת פיפטור בעל קוורטר שונה מהמתועד, או בשינוי לא מתועד בתנאי הצילום. מקרה זה מדגיש את תלות הכל' החישובי בבדיקה הכיוול המרחבי, ואת הצורך בברירה קפדנית על תנאי המדידה והצד.

מגבליות חישוב הנפח:

חישוב נפח הטיפה בפיזייקט התבסס על הנחת צורתה *spherical caps*. אף שהנחה זו מקובלת ומאפשרת חישוב פשוט ויעיל, מניתוח התוצאות אנו מניחים שבמקרה של התאדות ממישטח הידרופולי כמו זכוכית, יתרון שצורת הטיפה כורגת מהנחה זו. סטייה זו עשויה לתרום לפערים בין הנפח המוחשב לנפח ההתחלתי הידוע. הנחה זו דורשת בדיקה מעמיקה יותר בספרות.

כיווני שיפור עתידיים:

כפי שעה מהתוצאות, שיטת הפרדת הטיפה מהמשטח אינה אופטימלית בכל התנאים, ובנוסף זהה מגבלות בתהליכי הכלול. לפיכך, כיווני שיפור אפשריים לכלים שימושיים במודלים גיאומטריים חלופיים לתיאור צורת הטיפה (למשל התאמה פולינומית או מעגלית), אשר עשויים לאפשר זיהוי יציב יותר של המשטח ללא הסתמכות על נקודות קיצון בודדות. בנוסף, מעבר לשיטות חישוב נפח המבוססות ישירות על ספירת פיקסלים של שטח הטיפה בתמונה עשוי לשפר את יציבות חישוב הנפח, במיוחד בתחום רחבה או השתקפות אופטיות.

סיכום:

פיתחנו כלים חישובי לניתוח התוצאות טיפות מסדרות תמונות, המאפשר השוואת בין תנאים ניסויים באמצעות עקומות נפח רציפות. הכלים מדגיש מגמות יחסיות בקצב ההתאדות אך רגש לדיהוי קוו המגע ולכלול, ומצבע על הצורך בשיפור שיטות הזיהוי והחישוב לצורכי דיק אבסולוטי גבוה יותר.

5. רשות ספרות

ⁱ Xu, L., Zhu, H., Ozkan, H. E., & Thistle, H. W. (2010). Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactant at different locations on waxy leaf surfaces. *Biosystems Engineering*, 106(1), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.004>

ⁱⁱ Gimenes, M. J., Zhu, H., Raetano, C. G., & Oliveira, R. B. (2013). Dispersion and evaporation of droplets amended with adjuvants on soybeans. *Crop Protection*, 44, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.022>

ⁱⁱⁱ Ramsey, R. J. L., Stephenson, G. R., & Hall, J. C. (2005). A review of the effects of humidity, humectants, and surfactant composition on the absorption and efficacy of highly water-soluble herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 82(2), 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2005.02.005>

^{iv} Fernandez, V., & Eichert, T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(1–2), 36–68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>

^v Zhou, Z. L., Cao, C., Cao, L. D., Zheng, L., Xu, J., Li, F. M., & Huang, Q. L. (2017). Evaporation kinetics of surfactant solution droplets on rice (*Oryza sativa*) leaves. *PLoS ONE*, 12(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176870>

:Supplementary material .6

https://drive.google.com/drive/folders/1j0XsO7YX_w4uiOnQNOatF7oynLYMRf3V