

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

המחלקה למערכות מידע

פרויקט גמר בקורס ויזואליזציה של מידע

**ניתוח מצב החנקן בגידולים חקלאיים
באמצעות ספקטרוסקופיית אינפרה-אדום קרוב**

Crop Nitrogen Status Analysis via NIR Spectroscopy

מגיש : גיא מזרחי

ינואר 2026

תוכן העניינים

2	תוכן העניינים
3	1. תקציר
4	2. תיאור הנתונים
4	2.1 מקור הנתונים והרקע המחקרי
4	2.2 מאפייני הגידולים הנבדקים
4	2.3 אתרי המחקר והפיזור הגיאוגרפי
4	2.4 פרוטוקול איסוף ועיבוד הדגימות
5	2.5 מבנה הנתונים ומימדיות
5	2.6 עיבוד מקדים וניקוי הנתונים
5	2.7 ניסוי NPK המבוקר
6	2.8 סיכום היקף הנתונים
7	3. סקירת ספרות ועבודות קשורות
7	3.1 רקע תיאורטי
7	3.2 מחקרים יסודיים בתחום
7	3.3 הקשר לפרויקט הנוכחי
7	3.4 ויזואליזציות קיימות בתחום
9	4. ניתוח תיאורטי - מודל WWH
9	4.1 ויזואליזציה 1: סיפור איסוף הנתונים
9	4.2 ויזואליזציה 2: חקירת הספקטרום
9	4.3 ויזואליזציה 3: ניתוח ניסוי NPK
10	4.4 ויזואליזציה 4: ניתוח שונות העמילן
10	4.5 ויזואליזציה 5: סיווג מצב LNC
10	4.6 ויזואליזציה 6: ניתוח יחס N/ST
11	4.7 סיכום האינטראקטיביות
12	5. הסבר לבחירות העיצוב
12	5.1 ויזואליזציה 1 - בחירת Timeline, התפלגות עונתית ומפה
12	5.2 ויזואליזציה 2 - בחירת גרף קווי לספקטרום
12	5.3 ויזואליזציה 3 - בחירת Scatter + Ridgeline
13	5.4 ויזואליזציה 4 - בחירת Violin Plots וניתוח שנתי
13	5.5 ויזואליזציה 5 - בחירת רצועות צבעוניות דינמיות
13	5.6 ויזואליזציה 6 - בחירת נרמול ויחס N/ST
14	6. צילומי מסך של הויזואליזציות
14	6.1 ויזואליזציה 1: סיפור איסוף הנתונים
15	6.2 ויזואליזציה 2: חקירת הספקטרום
16	6.3 ויזואליזציה 3: ניתוח ניסוי NPK
17	6.4 ויזואליזציה 4: ניתוח שונות העמילן
18	6.5 ויזואליזציה 5: סיווג מצב LNC
19	6.6 ויזואליזציה 6: ניתוח יחס N/ST
20	7. קוד המקור

1. תקציר

פרויקט זה מציג מערכת ויזואליזציות אינטראקטיביות לניתוח מצב החנקן והקשר לעמילן בגידולים חקלאיים, המבוססת על נתונים ספקטראליים שנאספו במסגרת מחקר לתואר שני. הפרויקט משלב שישה ממשקי ויזואליזציה ייחודיים המאפשרים חקירה מעמיקה של יחסי הגומלין בין תכולת החנקן בעלים (LNC), רמות העמילן (ST), ומאפיינים ספקטראליים בארבעה סוגי גידולים : הדריס, שקדים, אבוקדו וגפן.

מערך הנתונים כולל כ-7,500 דגימות שנאספו מארבע תחנות מחקר בישראל בשנים 2021-2024, ומכיל למעלה מ-1,560 מימדים לכל דגימה. הויזואליזציות פותחו תוך יישום מודל WWH (What-Why-How) ומספקות תובנות חדשות לגבי הדינמיקה העונתית של חנקן ועמילן בצמחים.

התובנה המרכזית של הפרויקט היא שיחס $\frac{N}{ST}$ (חנקן לעמילן) מהווה מדד יעיל יותר לקביעת עיתוי דישון אופטימלי בהשוואה לערך LNC בלבד, ממצא בעל השלכות משמעותיות לחקלאות מדיקת.

2. תיאור הנתונים

2.1 מקור הנתונים והרקע המחקרי

הנתונים נאספו במסגרת מחקר לתזה לתואר שני העוסק בפיתוח שיטות לזיהוי מצב החנקן והעמילן בצמחים באמצעות ספקטרוסקופיית אינפרא-אדום קרוב (Near-Infrared Spectroscopy - NIR). המחקר בוצע בשיתוף פעולה עם מכון וולקני - מינהל המחקר החקלאי.

הנתונים נאספו במסגרת פרויקט מחקרי רחב היקף שמטרתו לפתח כלים לחקלאות מדייקת (Precision Agriculture), המאפשרים אבחון מהיר של מצב התזונה בצמחים. גישה זו מבוססת על העיקרון שההרכב הכימי של העלה משפיע על ספקטרום ההחזרה האופטי שלו, ולכן ניתן להשתמש במדידות ספקטרליות לחיזוי ריכוזי יסודות תזונתיים.

2.2 מאפייני הגידולים הנבדקים

המחקר התמקד בארבעה סוגי גידולים מרכזיים בחקלאות הישראלית:

גידול	מאפיינים	הערות
הדרים (Citrus)	עצי פרי הדר, ירוקי עד	הזן המרכזי בניסוי NPK המבוקר
שקדים (Almond)	עצי פרי קליפתי	זן נשיר עם דינמיקה עונתית מובהקת
אבוקדו (Avocado)	עצי פרי טרופיים	זן טרופי רגיש לתנאי סביבה
גפן (Vine)	גפנים לענבי יין	זן נשיר ומטפס

2.3 אתרי המחקר והפיזור הגיאוגרפי

הדגימות נאספו מארבע תחנות מחקר המייצגות מגוון תנאים אקלימיים בישראל:

מיקום	אקלים	ייחוד מחקרי
גילת	צחיח למחצה	תחנה מרכזית - ניסוי NPK המבוקר
קדמה	ים-תיכוני	אזור חקלאי מרכזי
כברי	ים-תיכוני לח	ייצוג תנאים צפוניים
כפר מנחם	ים-תיכוני	אזור מישור החוף

2.4 פרוטוקול איסוף ועיבוד הדגימות

תהליך איסוף הנתונים בוצע על פי פרוטוקול מחקרי מוגדר הכולל את השלבים הבאים:

שלב 1 - דגימת עלים: עלים נאספו מעצים מייצגים בכל תחנת מחקר, תוך הקפדה על בחירת עלים בשלב התפתחותי אחיד ומיקום שונה בחופה.

שלב 2 - ייבוש: העלים יובשו בתנורים בטמפרטורה מבוקרת של $60-70^{\circ}\text{C}$ עד להשגת משקל יציב, למניעת פירוק ביוכימי של החומרים הנמדדים.

שלב 3 - טחינה והכנה: העלים היבשים נטחנו לאבקה הומוגנית והוכנסו למבחנות ייעודיות למדידה במכשיר הספקטרוסקופי.

שלב 4 - מדידה ספקטרלית: המדידות בוצעו באמצעות מכשיר Element העושה שימוש ב-FT-NIR (Fourier Transform Near-Infrared) המודד ספקטרום החזרה בטווח אינפרה-אדום קרוב ובינוני.

שלב 5 - ניתוח כימי: במקביל למדידות הספקטרליות בוצע ניתוח כימי מעבדתי לקביעת ערכי ייחוס מדויקים של N, ST ו-SC.

2.5 מבנה הנתונים ומימדיה

נתונים ספקטראליים: כל דגימה מכילה וקטור של 1,557 ערכי החזרה (reflectance) בטווח אורכי גל של 3,999-10,001 ננומטר, המכסה את אזור האינפרה-אדום הקרוב והבינוני (mid-IR/NIR). אזור ספקטראלי זה רגיש במיוחד לתנודות במולקולות אורגניות כגון פחמימות, חלבונים ומים.

פרמטרים כימיים: לכל דגימה נמדדו שלושה ערכים כימיים מרכזיים:

פרמטר	משמעות ביולוגית	טווח ערכים טיפוסי
N_Value (LNC)	תכולת חנקן בעלה - מדד מרכזי למצב תזונתי	2.0-4.0%
ST_Value (Starch)	תכולת עמילן - מאגר אנרגיה עיקרי בצמח	mg/g 30-220
SC_Value (Soluble Carbs)	פחמימות מסיסות - סוכרים זמינים לתהליכים מטבוליים	משתנה

2.6 עיבוד מקדים וניקוי הנתונים

הנתונים עברו תהליך עיבוד מקדים (pre-processing) הכולל:

הסרת ערכים חריגים (Outliers): דגימות עם ערכים שליליים הוסרו מהניתוח.

איחוד מקורות נתונים: נתונים ממספר קבצי מקור אוחדו לטבלה אחת עם סכמה אחידה.

תקינות מזהים: כל דגימה מזוהה באמצעות מזהה ייחודי (ID) הכולל: סוג גידול, תאריך דגימה, מיקום ומספר עץ (למשל citGillea20220309_19 – הדריס cit, גילת Gil, עלה lea, תאריך 2022/03/09, עץ מספר 19).

2.7 ניסוי NPK המבוקר

מרכיב מרכזי במערך הנתונים הוא ניסוי מבוקר (Controlled Experiment) על 3 ערכים כימיים חנקן, זרחן ואשלגן, שבוצע בתחנת המחקר גילת על עצי הדריס. הנתונים אותם בחנו עבור עבודת התזה מהניסוי הן חמש רמות דיזון חנקן שונות:

טיפול	כמות חנקן	סיווג	מספרי עצים בניסוי
N10	kg N/ha 10	חוסר חמור	63 ,46 ,42 ,30 ,3
N40	kg N/ha 40	חוסר	67 ,49 ,44 ,19 ,5
N60	kg N/ha 60	אופטימלי	61 ,58 ,43 ,29 ,12
N100	kg N/ha 100	עודף	68 ,47 ,40 ,18 ,15
N150	kg N/ha 150	עודף מוגזם	74 ,57 ,35 ,24 ,13

2.8 סיכום היקף הנתונים

מערך הנתונים הסופי כולל :

סה"כ דגימות: כ-7,500 דגימות מאומתות

תקופת איסוף: 2021-2024 (ארבע שנות מחקר)

מימדיות: למעלה מ-1,560 מימדים לכל דגימה (1,557 ספקטראליים + 3 כימיים + מטא-דאטה)

3. סקירת ספרות ועבודות קשורות

3.1 רקע תיאורטי

השימוש בספקטרוסקופיה לאבחון מצב תזונתי בצמחים מבוסס על העיקרון הפיזיקלי שלפיו מולקולות אורגניות סופגות אור באורכי גל ספציפיים. באזור האינפרא-אדום הקרוב (NIR, 700-2500 nm) והבינוני (mid-IR, 2500-25000 nm), הספיגה נובעת בעיקר מתנודות מולקולריות של קשרים כגון C-H, O-H ו-N-H, המאפיינים פחמימות, מים וחלבונים.

3.2 מחקרים יסודיים בתחום

3.2.1 Paz-Kagan et al. (2020)

"Assessing the nitrogen status of almond trees by visible-to-shortwave infrared reflectance spectroscopy of carbohydrates"

מחקר זה, שפורסם בכתב העת Computers and Electronics in Agriculture (כרך 178), הדגים כיצד ספקטרוסקופיית VIS-SWIR יכולה לזהות את מצב החנקן בעצי שקדים. החוקרים מצאו קשר מובהק סטטיסטית בין ספקטרום ההחזרה לבין תכולת הפחמימות והחנקן בעלים. ממצא מרכזי היה שהיחס בין חנקן לפחמימות (N/C ratio) מספק אינדיקציה טובה יותר למצב התזונתי מאשר כל פרמטר בנפרד.

קישור: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105755>

3.2.2 Sperling et al. (2020)

"Precise fertilization by a mass-balance of the seasonal changes in nutrient uptake by almond trees"

מחקר זה, שפורסם בכתב העת Agronomy (כרך 10, גיליון 9), פיתח גישה לדישון מדויק המבוססת על מאזן מסה עונתי של יסודות תזונתיים. המחקר הדגיש את החשיבות של התאמת עיתוי הדישון לשלב הפנולוגי של הצמח, וזיהה תקופות קריטיות בהן הדרישה לחנקן מקסימלית.

קישור: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091277>

3.3 הקשר לפרויקט הנוכחי

מחקרים אלו מהווים את הבסיס התיאורטי והמתודולוגי לפרויקט הנוכחי במספר היבטים:

שימוש בנתונים ספקטראליים: אימוץ הגישה של שימוש בספקטרום NIR כמקור מידע עיקרי לחיזוי ערכים כימיים.

דינמיקה עונתית: הבנה שמצב החנקן והפחמימות משתנים לאורך השנה ויש להתחשב בכך בפרשנות הנתונים.

יחס N/ST: פיתוח הרעיון שהיחס בין חנקן לעמילן עשוי להיות מדד יעיל יותר מכל פרמטר בנפרד.

3.4 ויזואליזציות קיימות בתחום

בספרות המחקרית הקיימת, ויזואליזציות של נתונים ספקטראליים חקלאיים מוגבלות בדרך כלל לגרפים סטטיים בסיסיים: גרפי קווים להצגת ספקטרום, גרפי פיזור להצגת קורלציות, וגרפי עמודות להשוואות בין טיפולים. הפרויקט הנוכחי מרחיב את הגישות הקיימות על ידי:

אינטראקטיביות: מתן אפשרות למשתמש לחקור את הנתונים באופן דינמי.

אינטגרציה מרחבית-זמנית: שילוב מפות גיאוגרפיות עם ציר זמן.

ויזואליזציות מתקדמות: שימוש ב-Ridgeline plots וטכניקות עדכניות נוספות.

4. ניתוח תיאורטי - מודל WWH

מודל WWH (What-Why-How) מהווה מסגרת תיאורטית מקובלת לתכנון ויזואליזציות. המודל מחייב הגדרה מדויקת של שלושה רכיבים: מהם הנתונים, מהי מטרת הויזואליזציה, וכיצד מוצגים הנתונים. להלן ניתוח כל אחת משש הויזואליזציות בפרויקט על פי מודל זה.

4.1 ויזואליזציה 1: סיפור איסוף הנתונים

רכיב	תיאור
What	התפלגות דגימות לפי ציר זמן (שנה-חודש), עונה (Day of Year), ומיקום גיאוגרפי
Why	הצגת ההיקף, מגוון ופיזור הנתונים שנאספו, מתן אפשרות להבנת ההקשר המחקרי
How	<ul style="list-style-type: none"> גרף עמודות מקובצות לציר הזמן גרף עמודות להתפלגות עונתית מפת ישראל אינטראקטיבית עם עיגולים בגודל יחסי

קידודים ויזואליים: צבע מייצג סוג גידול (כתום=הדרים, חום=שקדים, ירוק=אבוקדו, ורוד=גפן), גודל עיגול מייצג מספר דגימות, מיקום מרחבי על המפה מייצג קואורדינטות גיאוגרפיות.

אינטראקטיביות: לחיצה על עיגול במפה מציגה חלון מידע (popup) עם פירוט לפי סוג גידול, ו- Hover כלומר שיוט של העכבר מעל עמוד ללא לחיצה, מציג שם מיקום ומספר דגימות כולל.

4.2 ויזואליזציה 2: חקירת הספקטרום

רכיב	תיאור
What	עקומות ספקטרליות (1,557 אורכי גל) עבור כל סוג גידול
Why	לאפשר השוואה של "החותמת הספקטרלית" (spectral signature) בין גידולים שונים
How	גרף קווים עם לחצן למעבר בין תצוגת כל הדגימות לתצוגת ממוצע \pm סטיית תקן

קידודים ויזואליים: ציר X = אורך גל (nm), ציר Y = ערך ספקטרלי (absorbance), צבע קו = סוג גידול, שקיפות (בתצוגת דגימות) = מאפשרת לראות התפלגות וחפיפות.

4.3 ויזואליזציה 3: ניתוח ניסוי NPK

רכיב	תיאור
What	ערכי N ו-ST עבור 5 רמות טיפול דישון (N10-N150)
Why	להשוות את השפעת רמות הדישון השונות על הערכים הכימיים בעלים
How	<ul style="list-style-type: none"> טבלת טיפולים תרשים עמודות מוערם לאורך ציר זמן גרפי פיזור (Scatter) ו-Ridgeline plots

קידודים ויזואליים: צבע = רמת טיפול (כחול→אדום לפי כמות N), מיקום = ערך כימי, Ridgeline = התפלגות ערכים לכל טיפול.

אינטראקטיביות: לחיצה על Ridgeline מציגה Centroid (מרכז כובד) על גרף הפיזור.

4.4 ויזואליזציה 4: ניתוח שונות העמילן

רכיב	תיאור
What	ערכי ST לאורך ציר הזמן ולפי שנה קלנדרית
Why	לחקור ולהסביר את השונות הגבוהה שנצפתה בערכי העמילן
How	<ul style="list-style-type: none"> Violin plots חודשיים עקומת ערכי ממוצעי העמילן לאורך זמן Box plots לפי שנה

תגלית מרכזית: אפקט השנה שולט על אפקט הטיפול! שנת 2022 הייתה שנת דלדול עמילן (~50-80 mg/g), 2023 שנת התאוששות (~120-160 mg/g), ו-2024 שנת יציבות (~100-140 mg/g). ממצא זה מדגיש את חשיבות ההתחשבות בגורמים סביבתיים בין-שנתיים בפרשנות הנתונים.

4.5 ויזואליזציה 5: סיווג מצב LNC

רכיב	תיאור
What	ערכי חנקן בעלה (LNC) מול ספי הסיווג של UC Davis
Why	לסווג את מצב החנקן לפי סטנדרטים מקובלים בתעשייה ולזהות עצים הדורשים התערבות
How	<ul style="list-style-type: none"> טבלת ספים דינמית הממירה את הערכי היחידים לסף דינאמי עקומת הממוצעים המייצגות את סוגי הטיפולים ברקע הספים לאורך הזמן

ספי UC Davis (מותאמים לאוקטובר): עודף (<3.48%), גבוה (3.24-3.48%), אופטימלי (2.88-3.24%), נמוך (2.64-2.88%), חסר (>2.64%).

התאמה עונתית: גורמי כפל חודשיים מיושמים על הספים להתאמה לדינמיקה העונתית של LNC בהדרים.

4.6 ויזואליזציה 6: ניתוח יחס N/ST

רכיב	תיאור
What	יחס N/ST מנורמל לאורך ציר הזמן
Why	להציע ולהדגים מדד משופר לקביעת עיתוי דישון אופטימלי
How	עקומת ממוצעים מנורמלים (0-1) לתקופות שונות עם סימון חלונות דישון עונתיים

הבעיה עם LNC לבדו: LNC מגיע לשיא בחורף בשל אפקט ריכוז (פחות מים בעלה) - אך זה לא הזמן שהצמח זקוק לדישון.

הפתרון - יחס N/ST: כאשר N עולה ו-ST יורד, היחס עולה ומסמן צורך בדישון. המדד מזהה נכון את תקופת אביב-קיץ כזמן האופטימלי לדישון, בהתאמה לשלב הפנולוגי של הצמח.

4.7 סיכום האינטראקטיביות

דרישת הקורס הייתה לכלול לפחות 2 ויזואליזציות אינטראקטיביות. הפרויקט כולל 3 ויזואליזציות אינטראקטיביות מלאות:

- 1. מפת ישראל (ויז' 1.3):** לחיצה על עיגולים מציגה popup עם פירוט לפי גידול, Hover מציג מידע מקוצר.
- 2. מתג תצוגה (ויז' 2.1):** מעבר בין תצוגת "כל הדגימות" לתצוגת "ממוצע $\pm SD$ ", לחיצה על אגדה לסינון גידולים.
- 3. Centroids עם Ridgeline (ויז' 3.2):** לחיצה על Ridgeline מציגה/מסתירה Centroid על גרף הפיזור, אפשרות להצגת מספר Centroids במקביל.

5. הסבר לבחירות העיצוב

פרק זה מנמק את הבחירות העיצוביות שנעשו בכל ויזואליזציה, תוך התייחסות לעקרונות תיאורטיים מתחום ויזואליזציה של מידע ולשיקולים פרקטיים.

5.1 ויזואליזציה 1 - בחירת Timeline, התפלגות עונתית ומפה

גרף Timeline (1.1) - Grouped Bar Chart: נבחר גרף עמודות מקובצות על פני גרף עמודות מוערמות (Stacked) מכיוון שהוא מאפשר השוואה ישירה בין גידולים באותו חודש. בגרף מוערם, קשה להשוות את גודל הקטגוריות הפנימיות בין עמודות שונות.

התפלגות עונתית (1.2) - Day-of-Year: הצגה לפי יום בשנה (DOY) מאגדת נתונים מכל השנים יחד, וחושפת דפוסים עונתיים שאינם נראים בתצוגה כרונולוגית רגילה. תובנה מרכזית: הדרים הם הגידול היחיד עם כיסוי מלא של 12 חודשים.

מפה אינטראקטיבית (1.3) - Leaflet: מפה גיאוגרפית מספקת הקשר מרחבי אינטואיטיבי. השימוש בעיגולים בגודל יחסי מאפשר תפיסה מהירה של נפח הדגימות בכל מיקום. האינטראקטיביות מוסיפה שכבת מידע נוספת ללא עומס ויזואלי קבוע.

5.2 ויזואליזציה 2 - בחירת גרף קווי לספקטרום

קווים ולא נקודות: הספקטרום הוא נתון רציף - כל אורך גל קשור פיזיקלית לשכניו. גרף קווים משמר את הרציפות ומאפשר זיהוי דפוסים ופסגות ספיגה.

מתג בין תצוגות: תצוגת "כל הדגימות" עם שקיפות מראה את השונות הפנימית וחושפת outliers. תצוגת "ממוצע \pm סטיית תקן" מאפשרת השוואה נקייה בין גידולים. המתג נותן למשתמש גמישות לבחור את רמת הפירוט המתאימה.

שקיפות (Alpha): שימוש בשקיפות בתצוגת דגימות בודדות מאפשר לראות התפלגות וחפיפה בין דגימות מאותו גידול - אזורים כהים יותר מעידים על ריכוז גבוה יותר של דגימות.

5.3 ויזואליזציה 3 - בחירת Scatter + Ridgeline

גרף פיזור (Scatter Plot): מציג את הקשר הדו-מימדי בין N ל-ST, ומאפשר לראות את כל הדגימות במרחב אחד. הצבע מקודד את רמת הטיפול.

Ridgeline Plots: נבחרו על פני Box Plots רגילים מכיוון שהם חושפים את צורת ההתפלגות המלאה - כולל דו-מודליות (bimodality) והטיות (skewness) שאינן נראות ב-Box Plot. הם ממוקמים בצירים העליון (N) והימני (ST), מחוברים ויזואלית לגרף הפיזור.

Centroids אינטראקטיביים: מאפשרים לראות את "מרכז הכובד" של כל טיפול ללא עומס ויזואלי קבוע. המשתמש בוחר אילו Centroids להציג, מה שמפשט השוואה בין טיפולים נבחרים.

5.4 ויזואליזציה 4 - בחירת Violin Plots וניתוח שנתי

Violin Plots (4.1): נבחרו על פני Box Plots מכיוון שהם חושפים את צפיפות הנתונים ומאפשרים זיהוי דפוסים bimodal שנצפו בחודשים מסוימים. תגלית זו הובילה לחקירה נוספת.

ניתוח לפי שנה (4.2, 4.3): לאחר שזוהתה שונות גבוהה בלתי מוסברת, הנתונים פורקו תחילה בצורה חודשית למתן תצוגה של התנהגות הנתונים לאורך זמן, ולאחר מכן לפי שנה. ניתוח זה חשף את התגלית המרכזית: אפקט השנה שולט על אפקט הטיפול, עם הבדלים דרמטיים בין 2022 (דלדול) ל-2023 (התאוששות).

5.5 ויזואליזציה 5 - בחירת רצועות צבעוניות דינמיות

טבלת ספים דינמית (5.1): UC Davis מספק ספים לחודש אוקטובר בלבד. התאמנו את הספים לכל חודש באמצעות גורמי כפל עונתיים המבוססים על הדינמיקה הידועה של LNC בהדרים.

עקומות צבעוניות (5.2): מאפשרות לראות מיידית באיזו קטגוריה נמצאת כל דגימה. השימוש בגרדיאנט ירוק (מכהה לבהיר) מפחית עומס קוגניטיבי לעומת צבעים שונים לחלוטין. העקומות דינמיות ועוקבות אחרי גורמי הכפל החודשיים - לא קווים ישרים בעלי ערך קבוע כל השנה.

תובנה: טיפולים N60, N100 ו-N150 כולם נשארים ברצועה האופטימלית או מעליה, מה שמעיד שהם מקבלים מספיק חנקן.

5.6 ויזואליזציה 6 - בחירת נרמול ויחס N/ST

הבעיה עם LNC לבדו: LNC מגיע לשיא בחורף בשל אפקט ריכוז (concentration effect) - כשהעלה מכיל פחות מים, ריכוז החנקן עולה יחסית. אך החורף כעיקרון אינו הזמן שגידול נשיר צריך דישון - הוא במנוחה פונולוגית.

הפתרון - יחס N/ST: כאשר N עולה (צמח צורך חנקן) ו-ST יורד (צמח צורך אנרגיה), היחס עולה ומסמן צורך בדישון. היחס מזהה נכון את תקופת אביב-קיץ כזמן האופטימלי. ובאופן מפתיע גם מזהה תקופה מסקרנת בחורף בה גם ירדה כמות העמילן ביחס וחנקן שעלה.

נרמול (0-1): מאפשר השוואה בין טיפולים במונחים יחסיים, מדגיש את הדפוס העונתי המשותף, ומזהה את שיאי הדישון.

חלונות עונתיים: חורף (כחול) = מנוחה ונשירה, אביב (זהב) = שיא ראשון - פריחה ויצירת פרי, קיץ (אדום) = שיא שני - גדילת פרי.

6. צילומי מסך של הויזואליזציות

להלן צילומי מסך של שש הויזואליזציות שפותחו בפרויקט:

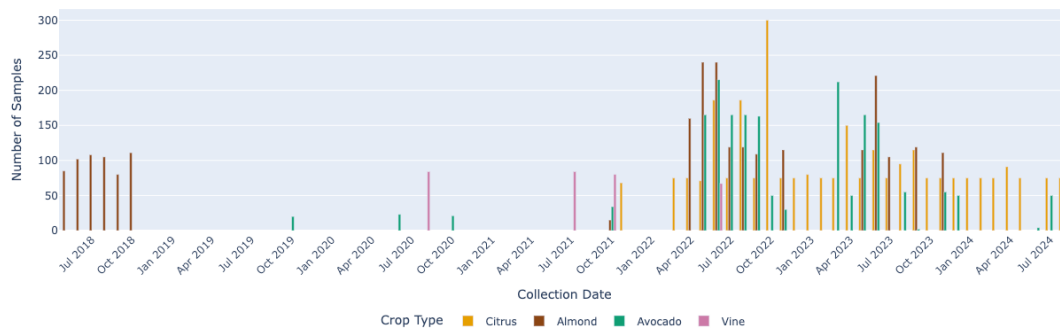
6.1 ויזואליזציה 1: סיפור איסוף הנתונים

NIR (Near Infrared) Spectroscopy Dataset: 4 Crops, 4 Locations, 7,500+ Samples

Leaf samples with 1,557 spectral wavelengths and chemical values: N (Nitrogen), ST (Starch), SC (Soluble Carbohydrates) | 2021-2024

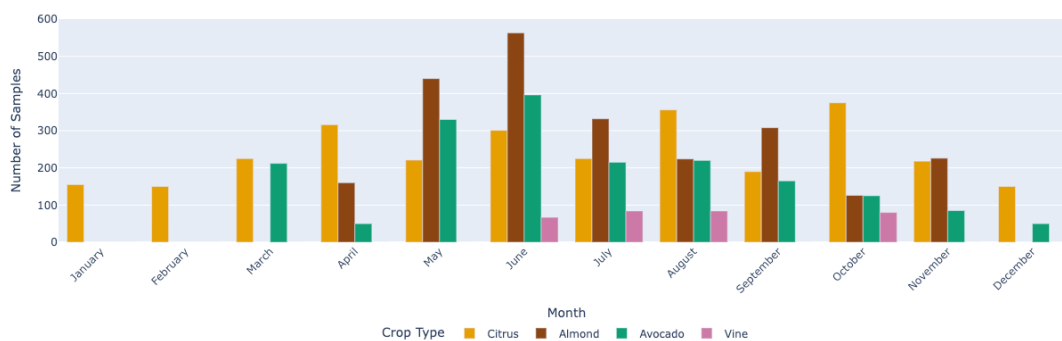
Crop	Total Samples	Date Range	Unique Dates
Citrus	2882	Nov 2021 - Aug 2024	37
Almond	2503	May 2018 - Nov 2023	22
Avocado	1848	Oct 2019 - Jul 2024	29
Vine	315	Aug 2020 - Jun 2022	4

1.1 Sample Leaves Collection Timeline: Monthly counts by crop (2021-2024)



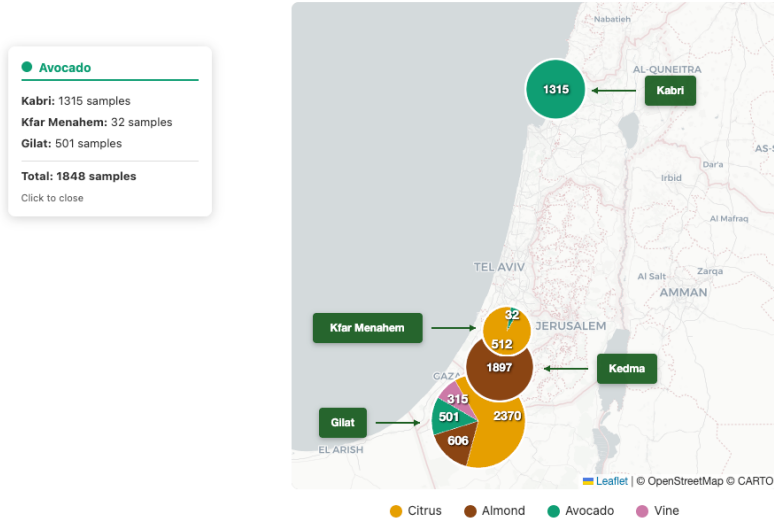
1.2 Seasonal Distribution (DOY): Aggregated by Day-of-Year to reveal seasonal patterns

Citrus has full 12-month coverage (150+ samples/month) --> Primary focus for subsequent analysis



1.3 Geographic Distribution: 4 Research Sites Across Israel (North to South)

Pie charts show crop distribution per location. Circle size reflects total sample count.
(Click city name to show sample counts per crop, click pie segment to see crop distribution across all sites)

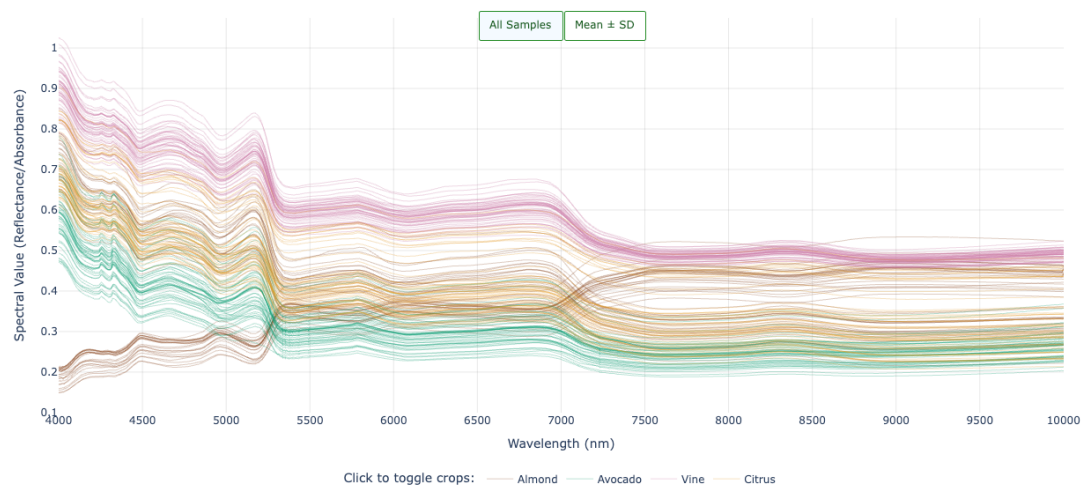


6.2 ויזואליזציה 2: חקירת הספקטרום

NIR (Near Infrared) Spectral Signatures: Unique Fingerprint per Crop Type

1,557 wavelengths (3,999-10,001 nm) | Spectral signatures enable prediction of chemical values (N%, ST, SC)

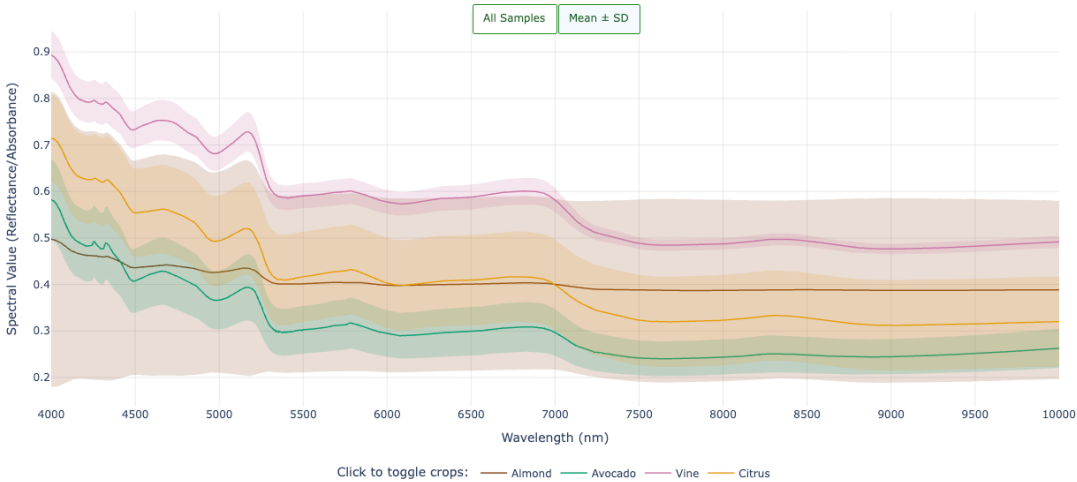
2.1 NIR Absorption Spectrum: Each crop has a distinct biochemical signature



NIR (Near Infrared) Spectral Signatures: Unique Fingerprint per Crop Type

1,557 wavelengths (3,999-10,001 nm) | Spectral signatures enable prediction of chemical values (N%, ST, SC)

2.1 NIR Absorption Spectrum: Each crop has a distinct biochemical signature



6.3 ויזואליזציה 3: ניתוח ניסוי NPK

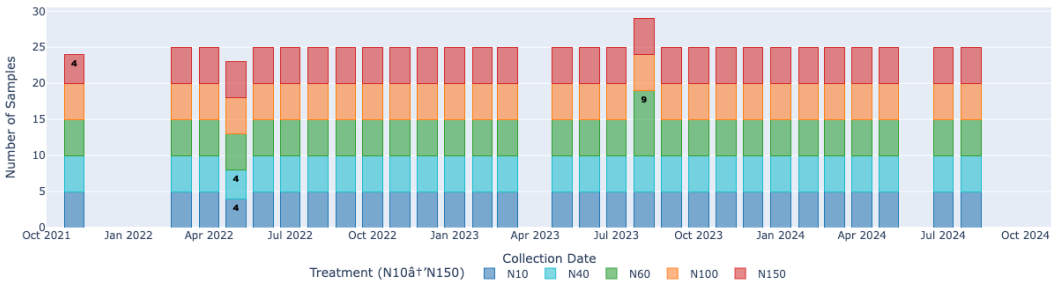
NPK Experiment: 5 Nitrogen Treatments on Citrus (Gilat Station)

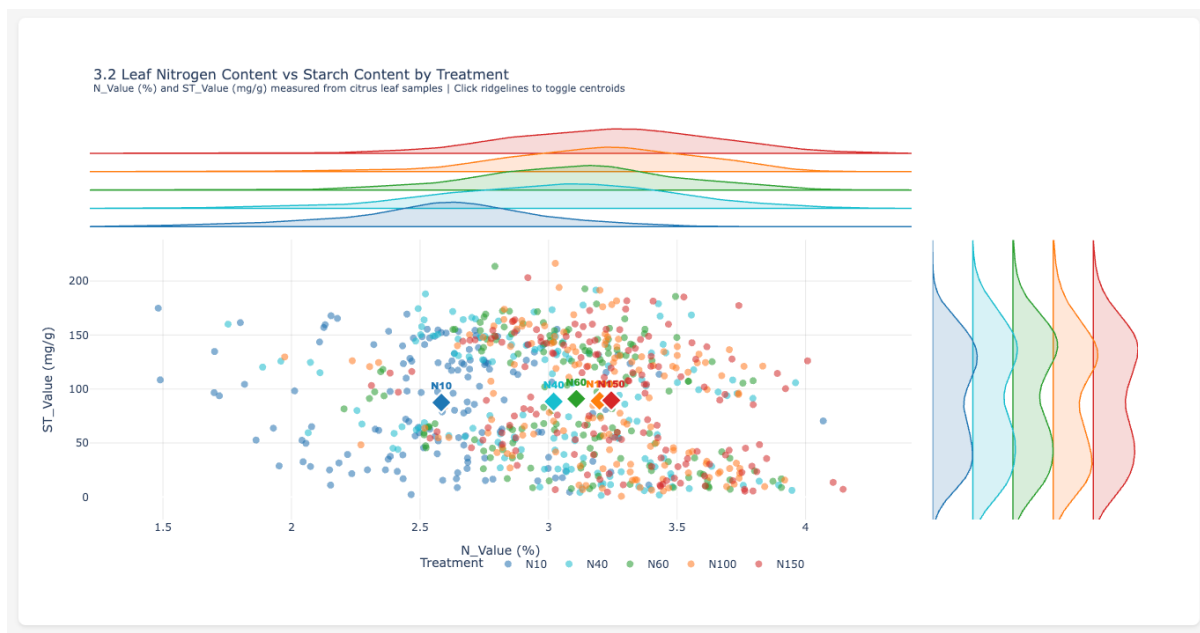
N10-N150 kg N/hectare | 5 trees per treatment | Measuring N% and Starch response

NPK stands for **N**itrogen (**N**), **P**hosphorus (**P**), and **P**otassium (**K**) - the three primary nutrients for plant growth. In this experiment, we focus on **Nitrogen treatments**, testing 5 different application rates.

Treatment	N Level (kg/ha)	Description	Tree IDs	Total Samples	Date Range
N10	10	Very Low (10 kg N/ha)	3, 30, 42, 46, 63	144	Nov 2021 - Aug 2024
N40	40	Low (40 kg N/ha)	5, 19, 44, 49, 67	144	Nov 2021 - Aug 2024
N60	60	Optimal (60 kg N/ha)	12, 29, 43, 58, 61	149	Nov 2021 - Aug 2024
N100	100	Excessive (100 kg N/ha)	15, 18, 40, 47, 68	145	Nov 2021 - Aug 2024
N150	150	Very Excessive (150 kg N/ha)	13, 24, 35, 57, 74	144	Nov 2021 - Aug 2024

3.1 Citrus Sample Collection Timeline by Treatment
Monthly sample counts (stacked) | Numbers shown when count > 5

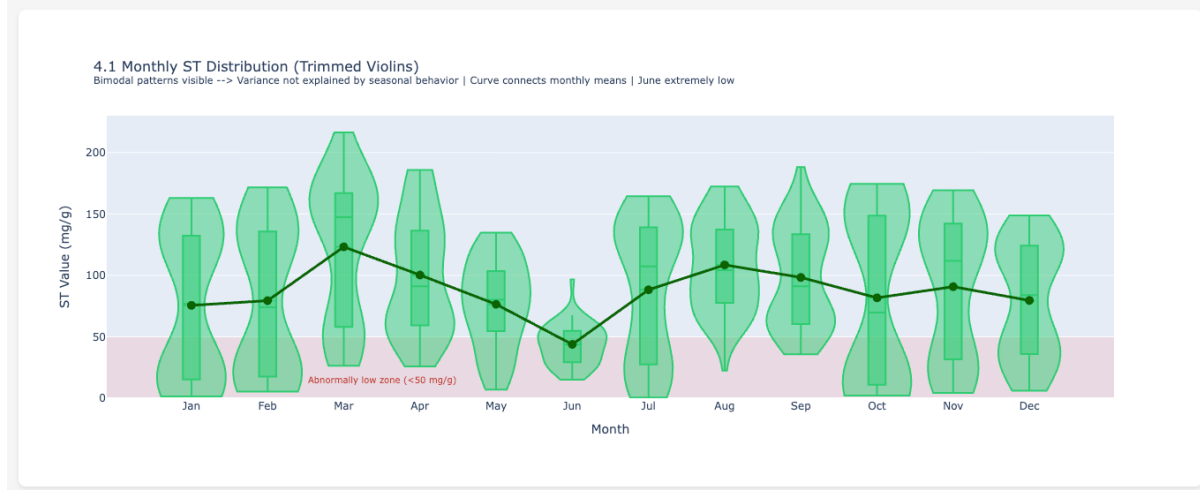




6.4 ויזואליזציה 4: ניתוח שונות העמילן

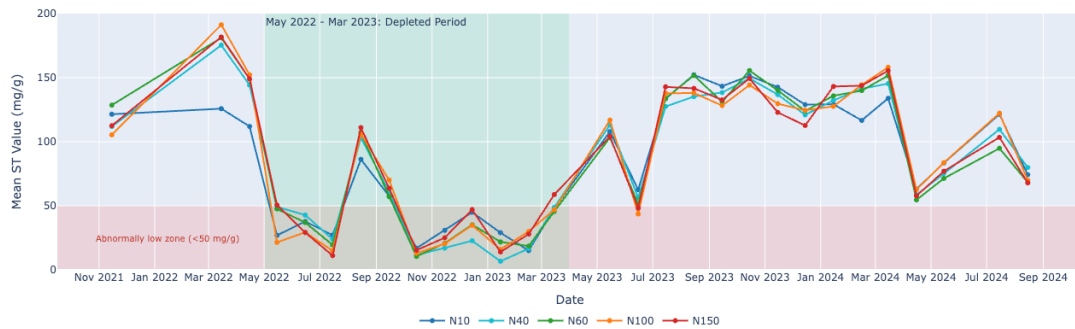
Starch Variance: Inter-Annual Climate Effect Dominates Treatment Effect

2022: Depleted (~50-80 mg/g) | 2023-24: Recovered (~120-160 mg/g) | N treatment effect not significant



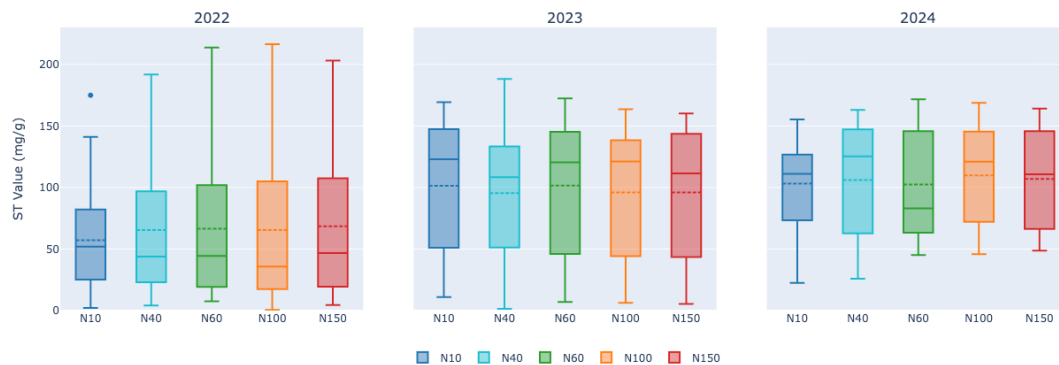
4.2 ST Timeline: Year effect dominates treatment effect

Curves connect monthly mean values | All 5 treatments follow identical pattern | Values <50 mg/g indicate critical depletion



4.3 Treatment vs Year: Year effect explains the variance

No significant ST difference between treatments within same year



6.5 ויזואליזציה 5: סיווג מצב LNC

LNC (Leaf Nitrogen Content) Classification: Dynamic Thresholds Reveal All N60+ Treatments Stay Optimum

UC Davis October thresholds adapted to monthly values using seasonal adjustment factors | N60, N100, N150 all cluster in Optimum band

5.1 Dynamic Monthly LNC Thresholds

All thresholds derived from UC Davis October reference × seasonal factor

UC Davis provides October reference values for citrus LNC classification.

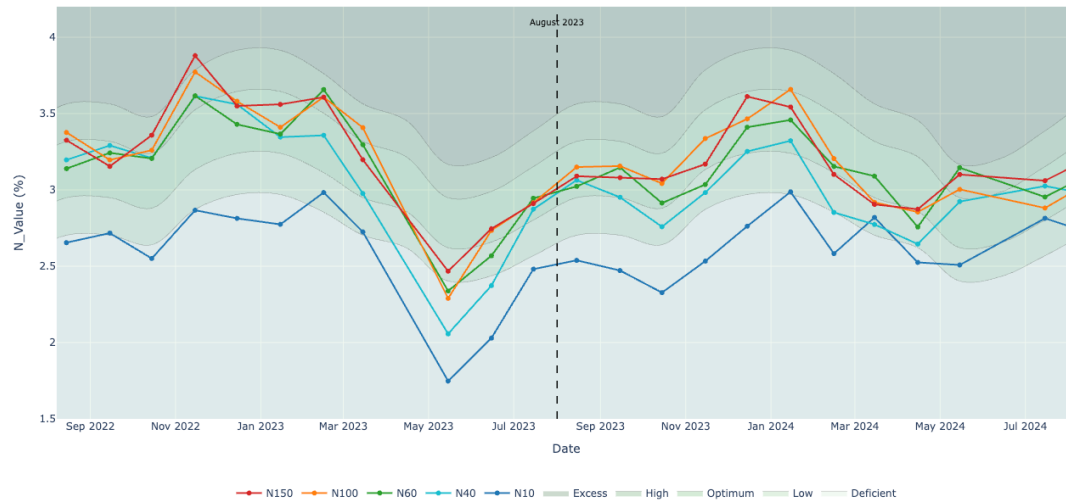
This reference adapted into **dynamic monthly thresholds** using seasonal adjustment factors that account for natural nitrogen fluctuations throughout the year.

Threshold	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
High/Excess	3.92%	3.76%	3.56%	3.46%	3.17%	3.21%	3.39%	3.56%	3.56%	3.48%	3.79%	3.92%
Optimum/High	3.65%	3.50%	3.32%	3.22%	2.95%	2.99%	3.15%	3.32%	3.32%	3.24%	3.53%	3.65%
Low/Optimum	3.24%	3.11%	2.95%	2.86%	2.62%	2.66%	2.80%	2.95%	2.95%	2.88%	3.13%	3.24%
Deficient/Low	2.97%	2.85%	2.70%	2.62%	2.40%	2.44%	2.57%	2.70%	2.70%	2.64%	2.87%	2.97%
Seasonal Factor	1.125	1.081	1.024	0.993	0.910	0.923	0.973	1.024	1.024	1.000	1.088	1.125

October (highlighted) = UC Davis reference month (factor = 1.000). Other months adjusted based on seasonal nitrogen patterns in citrus leaves.

5.2 LNC Timeline with Dynamic Thresholds: N60+ Treatments Remain in Optimum Band

Curves connect monthly mean values | Threshold bands follow seasonal adjustment factors | N60, N100, N150 converge in green Optimum zone throughout 2 years



6.6 ויזואליזציה 6: ניתוח יחס N/ST

N/ST Ratio: Phenology-Based Fertilization Indicator

Fertilize at ratio peaks (gradient changes + → -) | Peaks = high Nitrogen relative to depleted Starch

Why Fertilize at Peaks?

Ratio peaks indicate starch depletion relative to nitrogen - the tree is investing reserves in growth. Fertilizing now replenishes nutrients when uptake is most efficient.

Winter (Dec-Jan)

N ↑ (remobilization) | ST ↓ → Ratio rises

Spring (Apr-May) - Peak

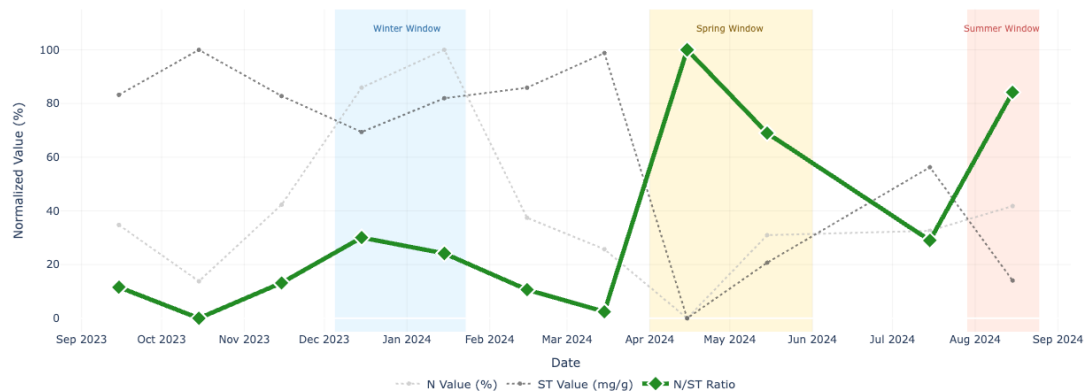
N ↓ | ST ↓ ↓ (flowering) → Highest peak

Summer (Aug)

N ↑ (uptake) | ST low → Ratio rises

N/ST Ratio: Key Indicator for Phenological Fertilization Timing

Three fertilization windows match citrus growth phases: Winter (Dec-Jan), Spring (Apr-May), Summer (Aug)



7. קוד המקור

הקוד המלא של הפרויקט זמין ב GitHub :

<https://github.com/GuyMizrahi1/Crop-Analysis-Visualization>