

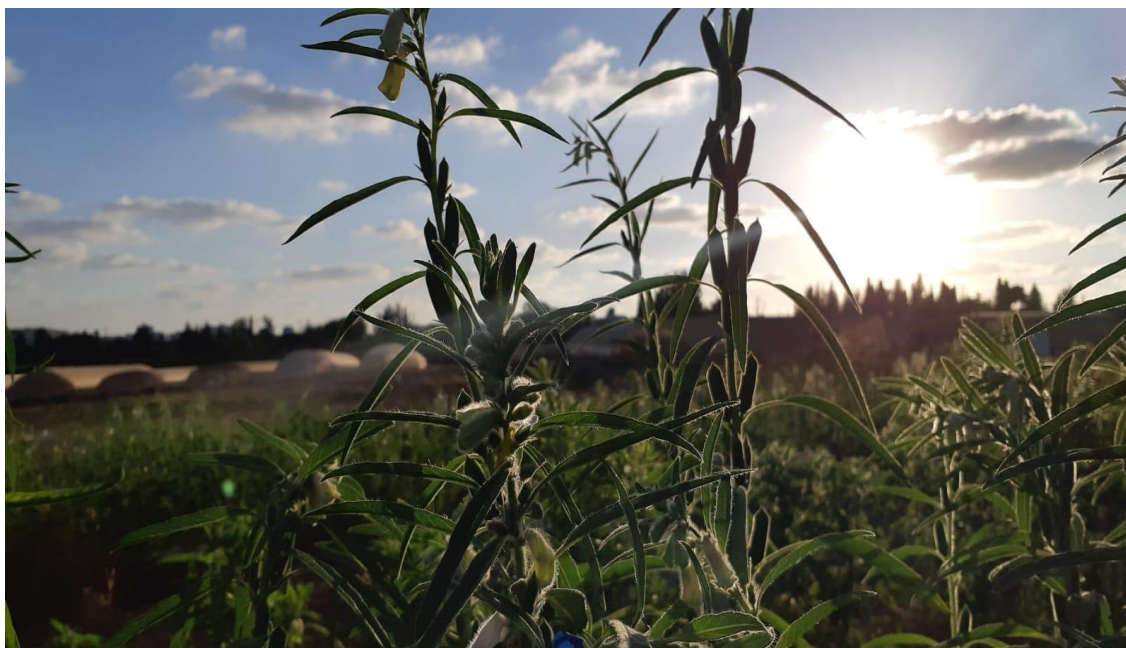
צילומים תרמיים ככלי להערכת יבול בשומשום

דן בנבניסטי

מיכל מנס

16.02.2023

מספר קורס 71254



מבוא

שומשום הוא גידול קיץ (אפריל-אוקטובר), גדל במגוון איזורים בעולם - כיום בעיקר בהודו, סין ובאתיופיה. עד שנות החמישים גודל גם בארץ, ונטש ברובו עקב חוסר כדאיות כלכלית. זרעי השומשום, הגדלים בתוך הלקטים על גבי הצמח, בעלי ערך תזונתי גבוה ונחשבים ל"סופר פוד". לזרעים יש שימושים רבים ומגוונים בתרבויות השונות – הבולטים שבהם שמן שומשום, וטחינה. שומשום עמיד ליובש בצורה ייחודית, ומכאן ההתאמה שלו לאקלים צחיח, כאשר לא נדרשת כמות גדולה של מים כדי לגדלו. דבר זה מאפשר להכניס אותו למחזור הגידולים בצורה שמטייבת את הקרקע והמערכת האקולוגית (דבורים וחיות) גם בחודשי הקיץ הצחיחים. כיום השומשום מגודל בצורה מסורתית, ונקצר בקציר ידני, זאת בגלל אופי הצימוח והייבוש של ההלקטים על גבי הצמח: הבשלת הזרעים כרוכה בהבשלת ההלקט וייבושו, כמו גם בייבוש הצמח כולו. כחלק ממנגנון ההפצה של הצמח – כשההלקט מתייבש הוא נפתח ושופך את הזרעים על הקרקע. מסיבה זו, כיום קוצרים את השומשום בצורה ידנית כאשר הצמח טרם התחיל להתייבש, משאירים את הצמחים הירוקים על יריעות שפורשים בשדה ונותנים להם להתייבש בשמש מספר שבועות. לאחר שההלקטים והצמחים יבשים לגמרי, אוספים באופן ידני ומפרידים את הזרעים מהחומר הצמחי. כל התהליך הוא מאוד ארוך, לא יעיל, ומצריך משאבים רבים. המחקר העולמי על שומשום עוד בחיתוליו, פורצי דרך בתחום המעבדה של פרופסור צביקה פלג בפקולטה לחקלאות, כאשר הם מנסים לפתור את הבעיה בכלים של השבחה וגנטיקה, ומשלבים כלים מתקדמים של חישה מרחוק ו**עיבוד תמונה** במטרה לייעל את תהליך הפנוטיפינג. אחד הכלים שנעשה בהם שימוש – צילומים תרמיים בשלבים פנולוגיים שונים של הצמח. צילומים תרמיים נלקחים בערוץ אחד רחב – TIR (thermal infra red), כאשר האנרגיה שנקלטת בחיישן לא מבטאת החזרה של אור השמש כמו בתמונות שאנחנו רגילים לראות, אלא אנרגיה שנפלטת בעוצמה שמתאימה לטמפרטורת הגוף בעצמו. השימוש העיקרי בטווח התרמי מתמקד בעיקר בתחומים של אבטחה בהקשרים שונים, בשלושים השנים האחרונות הכלים התרמיים פרצו גם לחקלאות, וכיום משמשים כחלק אינטגרלי מהמחקר, ונעשים מאמצים להכניסם גם לפרקטיקות חקלאיות.

כדי להבין את הקשר בין מידע תרמי לעולם הצמחים, יש צורך בהבנת תהליכים פיזיולוגיים בסיסיים בצמח, בראשם – הזנה ופוטוסינתזה.

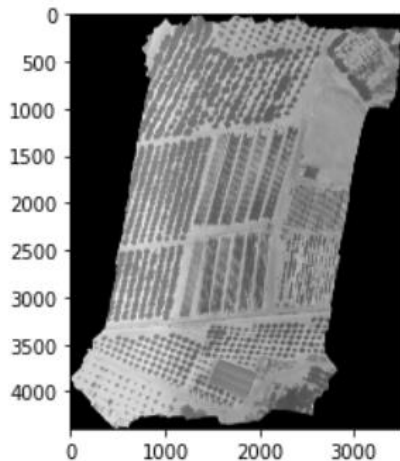
ייצורים חיים תלויים לחלוטין במים ובהזנה מינרלית. הצמחים משיגים את המים דרך השורשים, וסופחים אותם בעוצמה אדירה במנגנון "משאבה" המבוסס על הפרש לחצים. כחלק ממנגנון המשאבה מצויים פתחים קטנים בעלים – "פיוניות", שמאפשרות מעבר גזים ואדי מים דרכן אל ומתוך הצמח, ופתיחה וסגירה שלהם מבוקרת על ידי מספר תהליכים שלא נרחיב בהם בעבודה זו. מלבד אדי מים שיוצאים החוצה דרך הפיונית הפתוחה (ובכך כאמור מאפשרים עצמת שאיבה גבוהה של מים מהשורשים אל הצמח), נכנס דרכה גם פחמן דו חמצני, שדרוש לתהליך הפוטוסינתזה. כל עוד הפיונית פתוחה – הצמח יכול לייצר לעצמו סוכרים בתהליך הפוטוסינתזה ולאפשר התפתחות וגדילה, ובו זמנית שואב מים מהקרע תוך אידוי ופליטה של אדי מים דרך פיוניות. פעולה זו של אידוי מים מקררת את הצמח, בדומה להזעה בבע"ח, ולכן אינדיקציה לפיוניות פתוחות (משמע יצרנות) תהיה טמפרטורה נמוכה של הצמח.

מחקרים עושים שימוש בתכונה זו של הצמחים, ונעזרים בצילומים תרמיים ובאינדקסים שונים כדי להעריך ולחשב יצרנות של צמחים, ולאתר עקות שונות, ותקלות בשדה. בעבודה שלנו עשינו שימוש בצילומים תרמיים של שדה ובו חלקות טיפוח של שומשום, בנסיון לעמוד על ההבדלים בין גנוטיפים השונים במשך עונת הגידול, ויותר חשוב מכך – בנסיון למצוא קשר בין טמפרטורה למדדי יבול שנלקחו בסוף העונה.

DATASET

הניסוי נערך בקיץ 2020, בחווה החקלאית של הפקולטה לחקלאות, בו גודלו 185 גנוטיפים של שומשום במבנה ניסוי של חמישה בלוקים, כאשר הגנוטיפים בכל בלוק מסודרים באקראיות גמורה. במהלך העונה צולמו תמונות מרחפנים במגוון ערוצים (Nir, rgb, היפרספקטראלי..) וביניהם – בערוץ תרמי. מסד הנתונים שלנו כולל 5 צילומים תרמיים של השדה שנלקחו לאורך העונה, וכן נתוני יבול שנלקחו בסוף העונה: בכל חלקה נבחרו באופן אקראי 10 צמחים אותם קצרו, ודשו, את הזרעים שקלו ונערך ממוצע של כמות הזרעים בכל גנוטיפ לפי הבלוקים כך שהתוצר הסופי הוא ממוצע יבול בגרם לצמח לכל גנוטיפ.

גודל כל תמונה תרמית 3501x4391, מורכבת כמוזאיקה, בפורמט TIFF, והיא מכילה עיגונים גאוגרפיים. נוסף על כך, צוירו פוליגונים של כל חלקה בתוכנת ArcGIS, והם שמורים כקובץ .shp. שני קבצי csv משלימים את ה Data Set שלנו, הראשון – נתוני יבול בגרם לצמח עבור כל גנוטיפ, השני – מפה של החלקות שמתאימה מספר פוליגון לגנוטיפ ובלוק.



מכיוון שהתמונות נאספו מניסוי שתוצאותיו טרם התפרסמו, התבקשנו לשמור את הנתונים והתמונות ולהשתמש בהן רק לצרכי ניתוח, כך שלא נוכל למסור העתק של התמונות המקוריות. נצרף אחת לדוגמא כאן כתמונת JPG ללא הנתונים התרמיים.

שיטות ותוצאות

Datan שהיה בידינו כאמור הכיל נתונים גאוגרפיים שהיוו חלק משמעותי ובלתי נפרד מהתמונות עצמן, וכדי לייצג את המידע הגאוגרפי עשינו שימוש בספריית rasterio על מנת לקרוא ולגשת לצילום התרמי. את קובץ הפוליגונים (קובץ .shp, כאמור גם הוא בנוי מנתונים גאוגרפיים המגדירים את מיקום החלקות בדיוק רב – שכן כל חלקה גודלה כ-1.7X1 מטר) קראנו באמצעות ספריית geopandas.

כדי לגשת לנתונים הגאוגרפיים השתמשנו במתודה crs. שמאפשרת גישה ל Spatial reference system. לאחר שחילצנו את הנתונים הגאוגרפיים, נותר רק לערום את קובץ הפוליגונים על גבי התמונה התרמית בהתאם לנתונים הגאוגרפיים, וזאת עשינו בהזחה מסויימת ימינה ולמטה. ההזחה נעשתה באופן ידני בצורה של ניסוי וטעיה בניסיון למצוא את האוריינטציה המדוייקת שבה הפוליגונים ישבו בדיוק על החלקות, ומקורה באופן יצירת קובץ הפוליגונים:

במקרים כאלה של ניסויים בחלקות רבות, מציירים את הפוליגונים על תמונת rgb של השדה באופן ידני בתחילת העונה, ובזכות עיגונים גאוגרפיים שמבצעים במשך כל העונה ניתן להשתמש באותו קובץ פוליגונים לכל התצלומים שיבואו אחר כך. את תמונת הrgb משיג רחפן שטס מעל לשדה, ובו יש גם חיישנים נוספים לשאר הערוצים כאשר הערוץ התרמי הוא אחד מהם. העדשות הרבות יושבות בתחתית

הרחפן, ובגלל המרחק (הקטן אמנם אך משמעותי בכל זאת) שלהן, נוצרת ההזחה של הפוליגונים שצוירו בהסתמך על תמונת rgb כאשר מניחים אותם על התמונה התרמית.

בנקודה זו נציין גם שהפוליגונים שצוירו כוללים בופר פנימי של כמה סנטימטרים, כך שהנתונים שבתוך כל פוליגון לא כוללים את שולי החלקה, שוליים אלו יכולים להטות את התוצאות מסיבות ביולוגיות מגוונות, ומקובל להשמיטם.

בשלב הבא מיסכנו את כל הפיקסלים שלא יושבים עליהם פוליגונים, כלומר יצרנו קובץ שמכיל רק את נתוני החלקות, ואיחדנו אותם למערך יחיד. כעת אפשר לבצע פעולות במקביל על כל החלקות, ולקבל מידע מהימן בנוגע לאופי המידע הרלוונטי. מטרתנו היתה לקבל מושג לגבי הפיקסלים הצמחיים, ולכלול רק אותם בניתוח הסטטיסטי שלנו ללא רעשי רקע, ולכן נקטנו בסדרת פעולות: ראשית, סיננו פיקסלים עם ערך שלילי, שכן אלו בוודאי לא מייצגים צמח. עשינו זאת בעזרת יצירת מסכה ושימוש ב Data Frame כדי להשמיט ערכים לא רצויים וכן לעגל את הערכים שנשארו. שנית, בנינו היסטוגרמה של ערכי הפיקסלים שנותרו, ומצאנו ערך סף לפי שיטת Otsu, ובכך השארנו רק פיקסלים צמחיים וסיננו החוצה פיקסלים של אדמה.

בחרנו בשיטת Otsu Threshold מהסיבה הפשוטה שהיא אוטומטית, וכך מאפשרת להריץ את הקוד על תמונות בשלבי גידול שונים שמתאפיינים בטמפרטורות שונות, ובכל פעם למצוא את ערכי הסף בצורה אוטומטית.

בפן הביולוגי, נעזרנו במאמרים ואנשי מקצוע שעוסקים בתחומים האלו של סינון פיקסלים של אדמה לעומת פיקסלים צמחיים, ומדברים על טווח טמפרטורות של 25-34 עבור צמחים, ואכן גם ערכי הסף שנבחרו באופן אוטומטי בשיטת Otsu תאמו השערה זו.

כעת יש בידינו מערך שכולל בתוכו פיקסלים צמחיים בלבד מכל הגנוטיפים בכל הבלוקים שבתמונה. נדרש אם כן בשלב הבא למיין את המידע לפי הגנוטיפים השונים, שכן לגנוטיפ יש משמעות והשפעה על הטמפרטורה והיבול.

וכעת נכנסים לתמונה קבצי csv שמכילים את המידע המשלים.

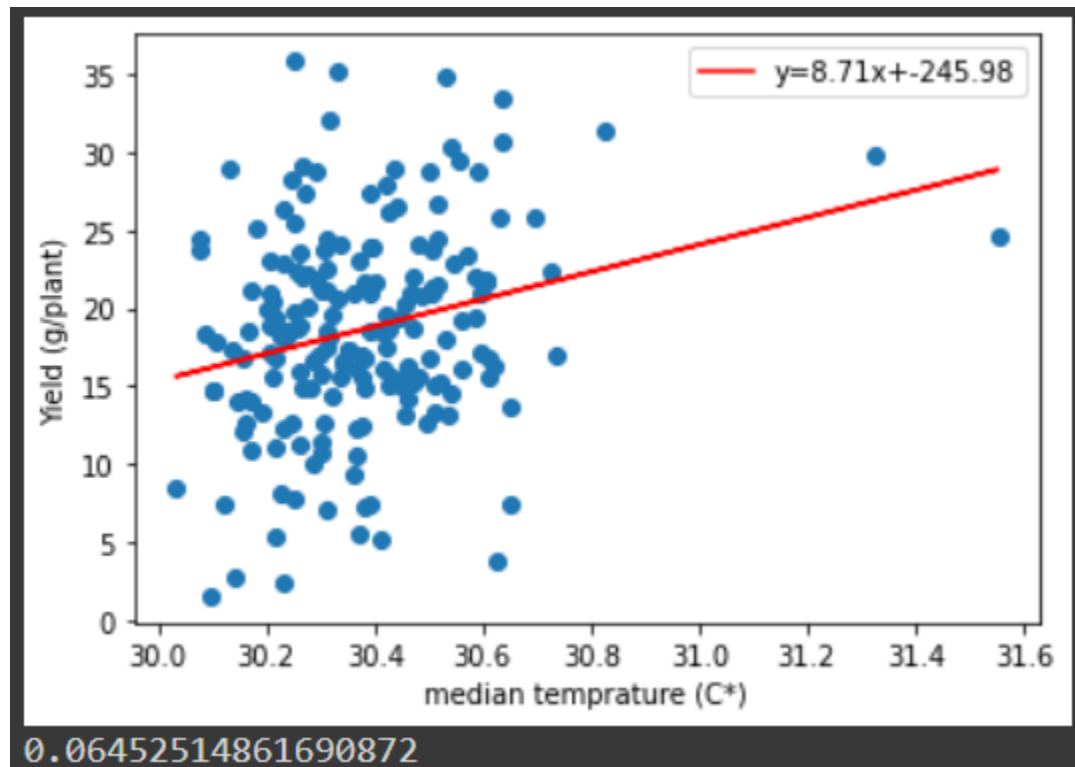
את שני הקבצים קראנו, ואיחדנו לפי המספר הסידורי של הפוליגון, כך שבאותה השורה יש מידע עבור גנוטיפ בבלוק מסויים והיבול שנרשם לגנוטיפ המסויים.

כל ההכנות בוצעו, והגיע הזמן לסטטיסטיקה:

לכל פוליגון חישבנו את ערך החציון של הפיקסלים הצמחיים שבו. הבחירה בחציון על פני ממוצע מטרתה לייצג את טווח התוצאות על השונות שבהן בצורה האמיתית יותר.

הניסוי כאמור הועמד במבנה של בלוקים, ולכן חישבנו ממוצע של החציונים עבור כל גנוטיפ בכל חמשת הבלוקים, כך שבסופו של דבר לכל גנוטיפ יש ערך יחיד של טמפרטורת עלווה. את הערך הזה חיברנו עם היבול שנמדד עבור אותו הגנוטיפ בקובץ csv, ולכל הערכים האלו בנינו גרף רגרסיה לינארית, וחישבנו את r^2 .

כל נקודה בגרף אם כן מייצגת גנוטיפ, ערכי y שלה הם היבול שנמדד, וערכי x הם הטמפרטורה המחושבת כפי שפורט לעיל.



כך ביצענו עבור כל אחת מחמשת התמונות שהיו לנו. מצורפת טבלה של ערכי הרגרסיה הלינארית שחושבו:

תאריך	ערך r^2
09.07	0.015
21.07	0.064
27.07	0.032
13.08	0.051
20.08	0.060

דיון ומסקנות

מטרת המחקר שלנו היתה לסייע בתהליך הפנוטיפינג בנסיון לייעל ולהוסיף מדדים נוספים שיעזרו למטפחים ולחוקרים לקבל החלטות מושכלות.

הפלט של הקוד, מופיע בצורת גרף פיזור בין טמפרטורה בשלבי הגידול השונים לבין היבול. הצעה לשיפור התצוגה היא לשלב את הנתונים לגרף פלט יחיד של חמש התאריכים בו הזמן הוא מימד שלישי. כפי שניתן לראות מידת הקורלציה שהתקבלה במודל הנוכחי אינה גבוהה באף אחד מהתאריכים, אולם ניתן להבחין בשיא בתאריך 21.07.

בתאריך זה הצמחים היו בשלב פנולוגי של תחילת פריחה, כלומר בשיא היצרנות, שלב זה משליך באופן טבעי על יבול הצמח. אם כן, זוהי מסקנה ראשונה שאפשר לצאת איתה מהמחקר, השלב הפנולוגי של הצמח חשוב בלקיחת מדדים ספקטרליים, ומשפיע על הטיב התחזיתי. העיתוי שאנחנו מצאנו הכי קורלטיבי עם יבול הוא כ-45 יום לאחר זריעה.

יש לציין כי השלבים הפנולוגיים בצמחים שונים באים לידי ביטוי בקצב שונה, 45 יום לאחר זריעה מתאים לשומשום, ולא ניתן להשליך מכך על גידולים אחרים.

סיבה אפשרית לכך שהקורליה יצאה נמוכה היא העובדה שהגנוטיפים נלקחו ממגוון סביבות עצום, כל גנוטיפ מותאם לסביבה שונה, צמח שמקורו באתיופיה יתנהג אחרת מצמח שמקורו בהודו כאשר מגדלים אותם צד לצד בישראל. הציפייה לקבל התנהגות דומה שתתבטא בקורלציה גבוהה בין טמפרטורה ליבול בין כל הקווים היא אולי מוגזמת, ואולי נכון יותר היה לחלק את הגנוטיפים לפי ארצות מוצא, או לפי קרבה גנטית וכדומה. השונות הסביבתית והגנטית מצמצמות את הקורלציה.

ייתכן והקורלציה היא לא הממד היחיד שאפשר להפיק מהמחקר. עצם פיזור הנקודות מאפשר בחירת זנים מושכלת על פי הצורך, בהתאמה לממשק חקלאי (מידת השקיה, סביבת גידול...), או תכונות רצויות של המטפח.

במחקרים סטנדרטיים בתחום נעשה שימוש באינדקס CWSI (crop water stress index). לשם חישוב ערכי האינדקס דרושה מדידה גרעון לחץ אדים, וכן מדידת לחות יחסית של האוויר במקביל לפעולת הצילום התרמי. שני אלו מדדים ישירים שנלקחים באמצעות כלים קרקעיים, והם מדייקים את ההערכה שלנו למצב הצמח. מדדים אלו משפיעים באופן דרמטי וישיר על פתיחת הפיונית ועל אידוי המים ממנה, ובכך על קצב ומידת קירור הצמח. למעשה מדידת נתונים תרמיים בלבד היא עקיפה, ובלי הנתונים מהשטח לא ניתן לנרמל את התוצאות ולדמות למצב המציאות.

בעבודה הנ"ל לא התאפשר לנו לחשב את מדד CWSI בגלל המחסור בנתונים שפירטנו, הצעה לשיפור ודיוק המודל תהיה לערוך ניסוי בו מדדים אלו נרשמים, והמודל לוקח אותם בחשבון.

בנוסף לצילומים התרמיים עמדו לרשותינו גם צילומים ב-RGB, אך לא עשינו בהם שימוש בשל בעיה טכנית – התמונות היו מאוד כבדות, והתקשינו לשלבן כראוי במהלך העבודה. אולם, משילוב של תמונות אלו יחד עם הנתונים התרמיים אולי נוכל לשפר את המודל תוך שימוש באינדקס להערכת כמות כלורופיל TGI. כלומר לייצר גרף תלת מימדי בו שלוש הצירים יהיו – נתונים תרמיים, הערכת כלורופיל ונתוני יבול, עבור כל תקופת זמן. במקום r^2 ניתן יהיה להשתמש במדדים חלופיים להערכת שגיאה כמו RMSE וכד'.

ביבליוגרפיה

¹קישור לקוד, במחברת colab.

https://colab.research.google.com/drive/1DXlaXhJdYgPpQwR8_VRbtQIZW27AwQ2B?authuser=1#scrollTo=O4DjhsoO7tOj

²קישור לחבר הנאמן chat GPT

[/https://openai.com/blog/chatgpt](https://openai.com/blog/chatgpt)

³קישור לספריות הגיאוגרפיות שהשתמשנו בהן

<https://rasterio.readthedocs.io/en/latest>

<https://geopandas.org/en/stable/docs.html>

⁴קישור לאתר המאגד בתוכו הסברים על אינדקסים ספקטראליים רבים בתוספת קישורים למאמרים

רלוונטיים

<https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=277>