

חקלאות מעגלית ויעילה

יישום עקרונות כלכלה מעגלית בטיפול בפסולת חקלאית והדגמתם במשק המודל לחקלאות בת-קיימא

רועי פוסמניק¹

posmanik@technion.ac.il

1. הטכניון

"כלכלה מעגלית" היא גישה מערכתית לניהול משאבים, השואפת לצמצם פסולת, להאריך את חיי החומרים ולהשיב את הערך המרבי מחומרי הגלם, לאורך מחזור החיים כולו. בניגוד למודל הליניארי המסורתי (Take-Make-Dispose) הכלכלה המעגלית מדגישה את סגירת המעגלים של חומר ואנרגיה, שילוב בין מערכות, והתאמת טכנולוגיות להקשר המקומי. מתקני טיפול בפסולת אינם בהכרח מיישמים את עקרונות הכלכלה המעגלית. מתקנים רבים מתמקדים בפתרון נקודתי (הפחתת נפח, סילוק או עמידה ברגולציה), תוך התייחסות מוגבלת לערך הפונקציונלי של התוצרים, לאינטגרציה בין זרמי פסולת שונים, או לשילובם מחדש במערכת הייצור המקומית. בהיעדר ראייה מערכתית, תהליכי טיפול עלולים להוביל ל"down-cycling" לאובדן משאבים, או לייצור תוצרים ללא יישום מעשי.

במשק המודל לחקלאות בת-קיימא בנווה-יער, נבחנת תפיסה הוליסטית של כלכלה מעגלית באמצעות שילוב מושכל בין טכנולוגיות טיפול שונות בזרמי הפסולת במשק. טיפולים ביולוגים (אירוביים ואנאירוביים) ותרמוכימיים (פירוליזה ופיחום הידרותרמי) עשויים להשתלב בהתאם לאפיון זרמי הפסולת (אורגנית, ליגנצולוזית, רטובה, עשירה בנוטריינטים, מלחים, אפר ועוד). שילוב זה מאפשר התאמה מיטבית של תהליך הטיפול לזרם הפסולת. למשל, בחירת הזרמים הרלוונטיים למיצוי אנרגטי ואלו המתאימים להשבה של זרחן וחנקן וליישומים חקלאיים כגון הזנה, טיוב קרקע וקיבוע פחמן. בהרצאה, נדגים את הגישה ונתמקד באינטגרציה בין מתקן קומפוסטציה ומעכל אנאירובי, בין מעכל אנאירובי ואגן ירוק וכיצד פיחום הידרותרמי לייצור הידרו-פחם עשוי להטיב עם כל אחת מהטכנולוגיות הללו.

הפלטפורמה למחזור פסולת במשק המודל הנקמה מתוך תפיסה שהיא אינה פועלת כמערכת נפרדת, אלא כחלק אינטגרלי ממערכת חקלאית, שבה תוצרי הטיפול חוזרים לשדה, למטע ולשטחים הפתוחים. במקביל, בזכות כלים של ניתוח זרימת חומרים (Material flow analysis, MFA) וניתוח מחזור חיים (Life-cycle assessment, LCA) ניתן לתכנן טיפול המותאם לכל זרם של פסולת במשק. גישה זו מדגימה את ההתייחסות לפסולת כמשאב, תוך בחינת מגוון יישומים בעולמות תוכן שונים, לרבות אנרגיה מתחדשת וחקלאות. בכך, משק המודל משמש כמעבדה חיה ליישום עקרונות הכלכלה המעגלית, המדגימה כיצד ניהול נכון של פסולת חקלאית יכול לתרום ליעילות משאבים, חוסן אקולוגי וחקלאות בת-קיימא.

המחקר מדגים כיצד שילוב טכנולוגיות טיפול בפסולת במסגרת חקלאית מאפשר יישום מעשי של עקרונות הכלכלה המעגלית, תוך השבת חומרים, נוטריינטים ואנרגיה. העבודה רלוונטית לגיבוש מדיניות סביבתית בישראל, במיוחד בניהול פסולת חקלאיות, הפחתת הטמנה וקידום חקלאות בת-קיימא. כחלק ממיזם המעבדה החיה אנו מקווים להצליח להטמיע את המודל המוצע בצורה הדרגתית במשקים חקלאיים ובמתקנים אזוריים במרחב העמקים.

חקלאות מעגלית ועילה

מערכת מבוססת בינה מלאכותית ליישום דישון חנקן בגידול חיטה

נעה צוקרמן¹, אורן גליקמן¹, איתמר לנסקי¹, דוד בונפיל²

noa.zuckerman@biu.ac.il

1. אוניברסיטת בר אילן
2. מכון גילת

חיטה היא הגידול המרכזי בשטחים הפתוחים בישראל, ותנובת יבול מיטבית תלויה בהזנה מינרלית ובפרט בזמינות חנקן. יישום מדויק של דשן יסוד ודשן ראש מהווה אתגר בשל מגבלות משאבים ובשל היעדר מערכות תומכות החלטה מהימנות. בנגב, מקובל ליישם דשן יסוד על פי בדיקה המבוססת על מבחן ביולוגי, "שיטת גילת".

במסגרת מחקרנו פותחה מערכת חדשנית המשלבת בינה מלאכותית וחישה מרחוק לאופטימיזציה של ממשק הדישון. המערכת מציעה שני פתרונות משלימים: מודלים לחיזוי חנקן שאריתי, המצמצמים את הצורך בדיגום ישיר למקרים נדרשים בלבד; ומודלים מבוססי לוויין לזיהוי צורך בדישון ראש בזמן אמת המאפשרים קבלת החלטות מבוססות מידע והימנעות מדישון חסר או עודף.

מודלי הדישון אומנו והוערכו על מסדי נתונים היסטוריים מקיפים, הכוללים נתוני חנקן ("שיטת גילת") שנאספו משנת 1997, נתוני לוויין (מדדי צומח וטמפרטורות), ונתוני מודלים אקלימיים (ERA-5). בנוסף, פותחה אפליקציה תומכת החלטה ב-Google Earth Engine המאפשרת לחקלאים להעריך את מצב השדה ביחס לחלקות ייחוס ולשטחים אחרים.

הטמעת הכלים החדשניים, שנבחנו כבר בשטח בעונת הגידול הנוכחית, תאפשר קבלת החלטות מבוססות נתונים בנוגע לדישון חיטה, תשפר משמעותית את יעילות ניצול החנקן, תחסוך בעלויות תפעול, תגדיל את רווחיות הגידול ותפחית את טביעת הרגל הסביבתית של החקלאות בישראל.

תוצרי המחקר הינם כלים אופרטיביים לשימוש החקלאים. הכלים יאפשרו קבלת החלטות מבוססות נתונים, ישפרו את עלויות התפעול ורווחיות הגידול ויפחיתו את טביעת הרגל הסביבתית של החקלאות בישראל. חקלאות מדייקת בהחלט יכולה להיטמע במדיניות הסביבתית בישראל ובמיוחד השימוש בכלים פתוחים ליישום בשטח.

חקלאות מעגלית ויעילה

אופטימיזציה של חקלאות ימית באמצעות עיבוד אותות אודיו ולמידת מכונה

דרור אטלינגר-לוי¹, שי קנדלר¹, איריס אשכנזי¹, שי טל¹, ברק פישביין¹

dror.e@campus.technion.ac.il

1. הטכניון

ניהול הזנה מדויק בחקלאות ימית חיוני למיצוי פוטנציאל הגדילה של הדגים ולמזעור ההשפעות הסביבתיות. בהקשר זה, עצימות האכילה מהווה מדד מקובל להערכת רמת הרעב של הדגים. כיום קיימות מערכות ניטור המבוססות על ניטור אקוסטי; אף שקיימות שיטות אקוסטיות המבוססות על סיווג רשתות נירונים, הן לרוב מתקשות לספק את הדיוק והישימות הנדרשים ליישום תעשייתי נרחב.

מחקר זה מציג שיטה לעיבוד אותות שמע באמצעות מסנן מתואם (Matched-filter), המבוססת על ידע ביולוגי-חקלאי, לצורך כימות רציף של רמת הרעב בדגי דניס (*Sparus aurata*) על ידי אפיון וחילוץ חתימה אקוסטית של נגיסה האופיינית למין, ויישום הסינון המתואם בשילוב חלון נע (Sliding window aggregation), הופק מדד רציף לעצימות האכילה, ולפיכך למידת הרעב, מתוך הקלטות אקוסטיות פסיביות. תיקוף השיטה בוצע באמצעות מודלי גרסיה (XGBoost), ו (Random Forest), שהראו כי משתנים סביבתיים וביולוגיים מסבירים 89% מהשונות במידת הרעב.

המתודולוגיה המוצעת מספקת פתרון פשוט, כלכלי וניתן להרחבה (Scalable) לאופטימיזציה של הזנה בזמן אמת ולניטור רווחת הדג. בזכות הפחתת מימדיות הנתונים ורגישות גבוהה לשינויים התנהגותיים עדינים, השיטה מאפשרת הטמעה של כלי ניטור מתקדמים מונחי-נתונים, וסוללת את הדרך ליישום מעשי בחקלאות ימית מסחרית.

1. כלכלי- היכולת לדייק את ההזנה בזמן אמת מתורגמת ישירות לחיסכון משמעותי בהוצאות התפעול (שכן המזון הוא עלות עיקרית בגידול) ולשיפור ביצועי הגדילה.

2. סביבתי- השיטה מפחיתה עודפי מזון ששוקעים ונרקבים, מפחיתה זיהום מים ומשפרת את רווחת הדג. שילוב זה של התייעלות כלכלית ואחריות סביבתית קריטי ליישום מדיניות ה-RAS (מערכות סגורות) בישראל; במערכות אלו, מים נקיים קריטיים לקיום המערכת, והטכנולוגיה המוצעת מספקת את הדיוק הנדרש כדי להבטיח קיימות סביבתית לצד כדאיות עסקית.

חקלאות מעגלית ויעילה

התמרה הידרותרמית של מי-נטל ממתקן ביוגז בעלי מליחות גבוהה להידרוצ'אר בעל ערך אגרנומי

איתמר קאפמן¹, רועי פוסמניק¹

itamar-k@campus.technion.ac.il

1. הטכניון

יישום מערכות עיכול אנאירובי לטיפול בזבל בעלי-חיים מהווה אתגר סביבתי גלובלי, בשל מורכבות תוצר הלוואי – מי-נטל – (digestate) המאופיין במליחות גבוהה ובתכולת נוטריינטים שירית. תהליך הידרותרמי המבוסס על פירוק מהיר של ביומסה במים תת-קריטיים (טמפ' ולחץ גבוהים) הוצע כתכנולוגיה מבטיחה לקיבוע של פחמן מביומסה רטובה בתוצר מוצק דמוי פחם (הידרוצ'אר). היות ורוב המחקר בתחום עוסק בפוטנציאל של הטכנולוגיה להשבת אנרגיה מעט ידוע על חומרי גלם "נחותים" כגון מי-נטל (תכולת אפר גבוהה ותכולת פחמן יחסית נמוכה) בנוסף, תרומת התהליך להפחתת המליחות טרם הובהרה במלואה. מחקר זה, בוחן את הפוטנציאל של הטכנולוגיה להמרת מי-נטל אנאירוביים ועשירים במלחים להידרוצ'אר יציב, תוך התמקדות באפיון כימי ופיזיקלי, שימור נוטריינטים והפחתת מליחות.

מי נטל ממתקן עיכול אנאירובי עברו תהליך הידרותרמי בטמפרטורות שונות ($200-270^{\circ}\text{C}$) למשך 30 דקות. תוצרי הפירוק (הידרוצ'אר ומי תהליך) נבדקו לקבלת ניצולת, הרכב יסודות ומינרלים, אפיון קבוצות פונקציונליות, יציבות הפחמן וחתימה תרמו-גרביטרית. בנוסף, בוצע ניסוי אינקובציה בקרקע למדידת נשימת CO_2 במטרה לבחון האם להידרוצ'אר יש תרומה לפעילות המיקרואורגניזמים בקרקע.

נמצא שעלייה בטמפרטורת התהליך ההידרותרמי הובילה לירידה בניצולת המסה והפחמן, לעלייה בארומטיות ולירידה ביחס האטומי של H/C - O/C מדד חשוב ליציבות ההידרוצ'אר. יונים חד-ערכיים (Na^+ , K^+) עברו לפאזה המימית (מי התהליך), בעוד שיונים דו-ערכיים (Ca^{2+} , Mg^{2+}) זורחן הצטברו במטריצה המוצקה (הידרוצ'אר). תופעה זו מדגימה כי תהליך הידרותרמי אינו משנה רק את המבנה האורגני של החומר, אלא גם מחולל שינויים שיטתיים בחתימה האנאורגנית שלו. תוצאות נשימת הקרקע הראו מתאם חיובי עם החתימה התרמו-גרביטרית של ההידרוצ'אר, ומצביעות על כך שהידרוצ'אר שמופק בטמפרטורות גבוהות מכיל יותר פחמן מקובע ופחות פחמן זמין לפעילות מיקרוביאלית בקרקע.

לסיכום, התוצאות מצביעות על כך שתהליך הידרותרמי יכול לשמש כפלטפורמה מבטיחה לשימור הפחמן, השבת נוטריינטים ולהפחתת מליחות, תוך המרת מי הנטל להידרוצ'אר יציב המתאים לשימוש כתוסף קרקע. שילוב של טיפול הידרותרמי משלים לעיכול אנאירובי עשויה לתת מענה לאתגר הגלובלי של ניהול פסולת בעלי-חיים.

עיכול אנאירובי הוא טיפול מוכר עבור שפכי בע"ח, אולם תוצר הלוואי שלו (digestate, מי-נטל) מכביד על היישום שלו בישראל. התוצאות מבטיחות שכן הן מראות שהטכנולוגיה "טולרנטית" גם עבור חומרי גלם "נחותים" ובעיתיים כמו מי-נטל. הממצאים רלוונטיים למדיניות ניהול פסולת חקלאית בישראל. תרומה משמעותית צפויה עבור רפת החלב שתלויה לא מעט בעיכול אנאירובי כפלטפורמה עיקרית לטיפול בשפכים. בנוסף, צפויה תרומה להפחתת סיכוני המלחת קרקע להשבת משאבים ולפיתוח תוספי קרקע יציבים.

חקלאות מעגלית ויעילה

פיתוח ריאקטור דניטריפיקציה בקנה מידה תעשייתי לטיפול במי פלט של חקלאות ימית יבשתית

אור אוחיון¹, יובל אבני², שי יגור², אורי יוגב³

or.ochayon@ocean.org.il

1. אוניברסיטת בן גוריון
2. חקר ימים ואגמים
3. Aquaculturi B.V.

חקלאות מים הינה ענף גידול המזון בעל קצב הצמיחה הגבוה ביותר בעשורים האחרונים, ומספק כיום את רוב הדגים למאכל. גורמים רבים, בניהם רגולציה מחמירה וזמינות מים, מניעים את התעשייה לעבור לגידול יבשתי במערכות מסוחררות (RAS). מערכות הכוללות מספר יחידות טיפול המאפשרות שימוש חוזר במי הגידול, אך עדיין דורשות שחרור קטן יחסית של זרם מי פלט העשיר בתרכובות חנקן וחומר אורגני. ע"מ לצמצם את ההשפעה הסביבתית ולעמוד בדרישות הרגולציה יש לבצע טיפול למי הפלט לפני השחרור לסביבה. טיפול בריאקטור דניטריפיקציה מהווה את אחת מהגישות המקובלות ביותר לסילוק חנקן, אולם יישומים בקנה מידה מסחרי עדיין נדירים.

במחקר זה הוקמה והופעלה מערכת טיפול למי פלט של מערכת RAS ימית בקנה מידה סמי-מסחרי. מי הפלט כללו שטיפות מסננים, סילוק בוצה בשאיבה מקרקעית המכלים וגלישות מים. שפכים אלו נאספו לבור איסוף מרכזי והוזרמו לריאקטור דניטריפיקציה המבוסס על עקרונות הבוצה המשופעלת- תא בחוש ומשקע, כל אחד בנפח של כ- 30 מ"ק. המשקע פועל על עקרון שיקוע בלחץ, עם אפשרות להוספת פולימר לשיפור הפרדת המוצקים. בנוסף לטיפול הביולוגי, מי הפלט המטופלים עברו סינון במסנני חול לפני הזרמה לים. הבוצה העודפת הוזרמה לבריכת ייצוב אנאירובית, כעודפי המים ממנה מטופלים בריאקטור אירובי משני. ממנו המים נשאבים חזרה לטיפול האנוקסי.

המערכת הופעלה במשך כשנה וחצי תחת עומסי הזנה וזרימה הולכים וגדלים. עם עליית ביומסת הדגים וקצבי ההאכלה, גברו גם ספיקות מי הפלט ועומסי המזהמים. יעילות סילוק המוצקים השתפרה עם עליית ריכוז הביומסה בריאקטור. יעילות סילוק הניטראט הממוצעת עמדה על כ- $69 \pm 7\%$, בעוד שסילוק החנקן הכללי הגיע לכ- 40% בלבד (כ- 22 גרם חנקן למ"ק ליום), נמוך משמעותית מהעומס התכנוני. הגורמים המגבילים כללו בעיקר תכנון הידראולי, זמני שהייה לא מיטביים, ו- H_2O קנמוך יחסית אשר הפריעו לתהליך הביולוגי.

תוצאות ההפעלה מצביעות על פעולה יציבה של המערכת בקנה מידה מסחרי, אך מדגישות את הצורך באופטימיזציה משמעותית של הריאקטור, הבקרה ההידראולית ושלבי הליטוש הסופיים, על מנת לעמוד בתקני הזרמה מחמירים ולתמוך בפיתוח בר-קיימא של חקלאות ימית יבשתית.

פיתוח מערכות טיפול למי פלט של חקלאות מים, ובפרט חקלאות ימית, הוא מרכיב קריטי לקידום חקלאות מים בת-קיימא. חשיבותו גוברת כיום, כאשר חלק ניכר מצמיחת הענף מבוסס על מערכות יבשתיות. היכולת לסלק חנקן לפני הזרמה לים

תאפשר פיתוח אחראי של חקלאות ימית יבשתית בישראל ובעולם, ופיתוח מערכות מסחריות בתחום זה הכרחי גם להשגת יעדי התוכנית האסטרטגית לביטחון המזון של מדינת ישראל.

חקלאות מעגלית ויעילה

השפעת מערכות אגרו-סולאריות בחממות על גידולים חקלאיים: יבול, השקיה, מזיקים ומועילים

לירון אמדור¹, אברהם יחיא², מרקו די סטפאנו³, כריסטינה קורנארו³, פרנסצקו ביסו³, ג'יאנלואיג'ו בווסצ'י³, לוקה רוסטי³, קריסולה פאפאיונו⁴, ניקולס קאסולס⁴, תורסטן רוקש⁵, ינס נוימן⁵, אנה קויטגן⁶, נורברט קויטגן⁶, מקס ליבריר⁷, אמיר פרלברג¹, גלעד בן צבי¹, עדי רמות¹, יערה ארזי¹

amdurliron@gmail.com

1. אוניברסיטת תל אביב
2. מו"פ כפר קרע
3. University of Rome Tor Vergata, Italy
4. University of Thessaly, Greece
5. Humboldt University of Berlin, Germany
6. University of Natural Resources & Life Sciences, Vienna, Austria
7. Bio-Gärtnerei Watzkendorf GmbH, Germany

מערכות אגרו-סולאריות מאפשרות להפיק אנרגיה ומזון בשטח אחד, ולקדם ביטחון אנרגטי וביטחון מזון. לשילוב פאנלים סולאריים בחממות יש יתרונות בהיבטי נוף, צמצום תפיסת שטחים פתוחים ומדרך פחמן, אך תיתכן השפעה על יבולים ומאפיינים חקלאיים אחרים.

מטרת המחקר: זיהוי השפעת פאנלים סולאריים על יבולים של גידולי חממה שונים, בעונות שנה שונות; השפעה על יעילות שימוש במים (כמות המים הנדרשת לק"ג יבול) ועל נוכחות פרוקי-רגליים מזיקים ומועילים.

שיטות: השוואת מדדים חקלאיים בין חממות שבתוכן פאנלים לחממות ביקורת, במדינות ים-תיכוניות (ישראל, יוון, איטליה) וצפון-אירופאיות (אוסטריה וגרמניה), בשמונה גידולי חממה ובארבע עונות השנה.

תוצאות: במדינות ים-תיכוניות, בחממות שבתוכן פאנלים, היבול נמוך בממוצע ב-11.52% ביחס לחממות זהות ללא פאנלים. בחלק מהניסויים, היה צורך בפחות מי השקיה בחממות עם פאנלים אבל בגלל שהיבול בחממות הללו היה נמוך יותר, בממוצע היה צורך ב-2.64% יותר מים לק"ג יבול, כלומר יעילות ההשקיה נפגעה מעט בחממות עם פאנלים.

ניטור מזיקים ומועילים בחממות בישראל העלה כי הפאנלים, כנראה בשל הגברת ההצללה והלחות, יכולים להביא לעליה במספרי האקריות בשלבים המתקדמים של מחזור הגידול. השפעתם על התריפסים משתנה ולא עקבית, והם מורידים במידה מסוימת, לעתים מובהקת, את מספרי כנימות עש הטבק. השפעת הפאנלים על זבובים טורפי מנהרנים, המועילים לחקלאות, גם היא אינה עקבית.

במכלול המדינות בהם נערכו ניסויים, נמצא כי השפעת הפאנלים שונה בעונות שנה שונות ועל סוגים שונים של גידולים: בקיץ, היבול בחממות הביקורת גבוה ב-363.77 גרם/צמח ביחס לחממות עם פאנלים, בחורף ההפרש הממוצע היה 1.46 גרם/צמח. בגידולים פירותיים (עגבניה, מלפפון וכו') היבול בחממות הביקורת גבוה ב-403.99 גרם/צמח ביחס לחממות עם פאנלים, כאשר בגידולי עלים (חסה, בזיליקום) ההפרש הממוצע היה 33.32 גרם/צמח.

דיון: פאנלים סולאריים בחממות עלולים לפגוע באופן מתון ביבול ומדדים חקלאיים אחרים. כדי צמצם את ההשפעה על מאפיינים חקלאיים, יש להתאים את סוגי הגידולים והממשקים החקלאיים בחממות עם מערכות סולאריות. למשל: להעדיף שילוב עם גידולי עלים על פני גידולי פירות, וגידולי חורף על פני גידולי קיץ; ולהיערך לטיפול באקריות.

שילוב פאנלים בחממות הינה פרקטיקה מקובלת בישראל, ישנם כ-30 אתרי חממות עם פאנלים, והצבת פאנלים בחממות מקודמת ב"מסלול ירוק" בהיתר בניה באישור משרד החקלאות. למיטב ידיעתנו המחקר המוצג הינו המחקר היחיד בישראל שבדק את השפעת הפאנלים על יבולים ומאפיינים חקלאיים אחרים בגידולי חממות, גידולים בעלי חשיבות גבוהה בסל המזון הישראלי. למסקנותיו חשיבות למדיניות הרחבת השילוב של פאנלים סולאריים בחממות, ולעיצוב כלים לשילוב נכון תוך צמצום ההשפעה על ביטחון המזון.