

משרד החקלאות - דו"ח לתוכניות מחקר
לקרן המדען הראשי

קוד זיהוי	א. נושא המחקר (בעברית)
857-0619-10	יצרנות דגניים ושינויי אקלים חזויים: הערכת התגובה באמצעות מודלים, מדידות שדה וחישה מרחוק

ג. כללי			
מוסד מחקר של החוקר הראשי			
אוניברסיטת בן גוריון בנגב			
סוג הדו"ח		תאריכים	
מסכם	תקופת המחקר		תאריך משלוח הדו"ח למקורות המימון
	עבודה מוגשת הדו"ח		
	התחלה	סיום	
	שנה חודש	שנה חודש	שנה חודש
	04 / 2010	04 / 2013	06 / 2013

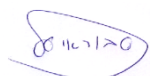
ב. צוות החוקרים		
חוקר ראשי	שם משפחה	שם פרטי
	סבוראי	טל
חוקרים משניים		
1	מורין	אפרת
2	בונפיל	דוד
3	זיידנברג	רמי
4	מילר	אופיר
5		
6		
7		

ד. מקורות מימון עבורם מיועד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
		233,450
מדען ראשי חקלאות	025982	

ה. תקציר
השפעה סביבתית ואקלימית על ייצור ראשוני, במיוחד באזורים חקלאיים, מורכבת ותלויה בגורמים רבים. מודלים מפורשים בזמן ובמרחב עוזרים בהתמודדות עם מורכבות זו באמצעות תיאור קרוב יותר למציאות. במסגרת מחקר זה, פותח מודל פיזיקלי גנרי (ללא כיוול) ייחודי, המשלב מערכות אקלים, סביבה וצומח בפירוט מרחבי ועיתי רב. המודל כולל חיזוי צימוח של חיטה (ביומסה וגרעינים) וחיזוי של זמינות המים בקרקע תוך התבססות על תהליכים הידרולוגיים בפני השטח. בפיתוח הושם דגש על בסיס הידרולוגי חזק המשלב תוכנה נומרית למידול חזור מים לתת הקרקע (Hydrus 1D), נתוני מכ"מ מטאורולוגי והערכת נגר בקנ"מ של דקות. אימות נערך בשדות חיטה ברמות יששכר לשתי עונות גידול (2010-2011 ו-2011-2012) באמצעות דגימות וחישובי רטיבות. המחקר בחן גם את ההשפעה המרחבית של מספר גורמים סביבתיים על תכולת הרטיבות ועל יצרנות החיטה. בנוסף, נערכה באמצעות המודל בדיקה כיצד שינויים בטמפרטורה וגשם עשויים להשפיע על יצרנות החיטה בשטח המחקר. נמצא כי המודל חוזה טוב את זמינות המים בקרקע והייצור הראשוני בשדות חיטה. תוצאות המודל נמצאו גם מספקות לצורך בחינת השפעתם המרחבית של גורמים שונים. מבחינה זו נמצא כי הגורמים הקשורים ישירות לזמינות המים: מרקם הקרקע ותפוצת הגשם לפי המכ"מ, הם הגורמים המשפיעים ביותר על דיוק המודל. שאר הגורמים שנבחנו: נגר, קרינה, עיבוד הקרקע וזנים לא הראו השפעה מהותית כל אחד בנפרד מבחינה מרחבית, והשפעתם ניכרת רק בשילוב של כלל הגורמים שנבחנו במודל. התוצאות של בחינת שינוי אקלים מראות ירידה משמעותית בייצור החיטה כתוצאה מירידה בכמויות הגשם או עלייה בטמפרטורה. ההפחתה מגיעה ל- 17% ביבול בירידה של 5% מכמות גשם ולכ-10% כתוצאה מעלייה של הטמפרטורה במעלה. בנוסף נמצא כי הרגישות לשינויי אקלים משתנה באזור המחקר כתלות בתפוצת הגשם, כאשר הרגישות קטנה יותר באזורים גשומים וכתלות במספר ותפוצת ימי הגשם בעונה. לסיכום, מחקר זה מציג מודל מפורש בזמן ובמרחב לחיזוי יצרנות חיטה. דיוק החיזוי מאפשר לבחון בפירוט רב השערות שונות כדוגמת השפעת שינויי אקלים על ייצור ראשוני של חיטה.

ו. אישורים

הנני מאשר שקראתי את ההנחיות להגשת דיווחים לקרן המדען הראשי והדו"ח המצ"ב מוגש לפיהן



חוקר ראשי	מנהל המחלקה	מנהל המכון (פקולטה)	אמרכלות (רשות המחקר)	רשות המחקר	תאריך (שנה) (חודש) (יום)
-----------	-------------	---------------------	----------------------	------------	--------------------------

יצרנות דגניים ושינויי אקלים חזויים: הערכת התגובה באמצעות מודלים, מדידות שדה וחישה מרחוק

Cereals productivity and projected climate changes: Models, remotely sensed and field observations

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות על ידי

טל סבוראי	המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
אפרת מורין	המחלקה לגאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים
דוד בונפיל	מרכז מחקר גילת, מינהל המחקר החקלאי
רמי זיידנברג	המחלקה לסקר ויעוד קרקע, משרד החקלאות
אופיר מילר	המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

Tal Svoray, Department of Geography & Environmental Development, Ben-Gurion University of the Negev, P.O.B 653, Beer-Sheva, E-mail: tsvoray@bgu.ac.il

Efrat Morin, Department of Geography, Hebrew University of Jerusalem, Mount Scopus, 91905 Jerusalem, E-mail: msmorin@mscc.huji.ac.il

David J. Bonfil, Agricultural Research Organization Department, Gilat Research Center, 85280, E-mail: bonfil@volcani.agri.gov.il

Ram Zaidenberg, Department of Soil Conservation & Drainage, Ministry of Agriculture, P.O.B 30 Beit Dagan
E-mail: ramiz@moag.gov.il

Ofir Miller, Department of Geography & Environmental Development, Ben-Gurion University of the Negev, P.O.B 653, Beer-Sheva, E-mail: ofirmi@bgu.ac.il

אפריל 2012

ניסן תשע"ב

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

חתימת החוקר

1. תקציר

השפעה סביבתית ואקלימית על ייצור ראשוני, במיוחד באזורים חקלאיים, מורכבת ותלויה בגורמים רבים. מודלים מפורשים בזמן ובמרחב עוזרים בהתמודדות עם מורכבות זו באמצעות תיאור קרוב יותר למציאות. במסגרת מחקר זה, פותח מודל פיזיקלי גנרי (ללא כיוול) ייחודי המשלב מערכות אקלים, סביבה וצומח בפירוט מרחבי ועיתי רב. המודל כולל חיזוי צימוח של חיטה (ביומסה וגרעינים) וחיזוי של זמינות המים בקרקע תוך התבססות על תהליכים הידרולוגיים בפני השטח. בפיתוח הושם דגש על בסיס הידרולוגי חזק המשלב תוכנה נומרית למידול חדור מים לתת הקרקע (Hydrus 1D), נתוני מכ"מ מטאורולוגי והערכת נגר בקנ"מ של דקות. אימות נערך בשדות חיטה ברמות יששכר לשתי עונות גידול (2010-2011 ו-2011-2012) באמצעות דגימות וחישני רטיבות. המחקר בחן גם את ההשפעה המרחבית של מספר גורמים סביבתיים על תכולת הרטיבות ועל יצרנות החיטה. בנוסף, נערכה באמצעות המודל בדיקה כיצד שינויים בטמפרטורה וגשם עשויים להשפיע על יצרנות החיטה בשטח המחקר.

נמצא כי המודל חוזה טוב את זמינות המים בקרקע והייצור הראשוני בשדות חיטה. תוצאות המודל נמצאו גם מספקות לצורך בחינת השפעתם המרחבית של גורמים שונים. מבחינה זו נמצא כי הגורמים הקשורים ישירות לזמינות המים: מרקם הקרקע ותפרושת הגשם לפי המכ"מ, הם הגורמים המשפיעים ביותר על דיוק המודל. שאר הגורמים שנבחנו: נגר, קרינה, עיבוד הקרקע וזנים לא הראו השפעה מהותית כל אחד בנפרד מבחינה מרחבית, והשפעתם ניכרת רק בשילוב של כלל הגורמים שנבחנו במודל.

התוצאות של בחינת שינוי אקלים מראות ירידה משמעותית בייצור החיטה כתוצאה מירידה בכמויות הגשם או עלייה בטמפרטורה. ההפחתה מגיעה ל- 17% ביבול בירידה של 5% מכמות גשם ולכ-10% כתוצאה מעלייה של הטמפרטורה במעלה. בנוסף נמצא כי הרגישות לשינויי אקלים משתנה באזור המחקר כתלות בתפרושת הגשם, כאשר הרגישות קטנה יותר באזורים גשומים וכתלות במספר ותפרושת ימי הגשם בעונה.

לסיכום, מחקר זה מציג מודל מפורש בזמן ובמרחב לחיזוי יצרנות חיטה. דיוק החיזוי מאפשר לבחון בפירוט רב השערות שונות כדוגמת השפעת שינויי אקלים על ייצור ראשוני בחיטה.

2. מבוא

כתוצאה מההתחממות הגלובלית נצפו שינויים במשטר האקלימי באזורים שונים בעולם ורבים משערים כי לשינויים אלו תהיה השפעה על ייצור ראשוני של מערכות אקולוגיות וחקלאיות [1]. יתרה מכך, נמצא כי רגישות היצרנות לשינויי אקלים היא גבוהה יחסית באזור אגן הים התיכון, ובישראל בפרט [2]. הצמחים המבויתים רגישים עוד יותר ופחות עמידים לשינוי בזמינות המים ובטמפרטורה. השפעת שינויי האקלים על ייצור ראשוני היא מורכבת וכוללת מספר גדול יחסית של גורמים [3]. בשל כך, מחקר של השפעות סביבתיות ואקלימיות על גידולים חקלאיים מצריך גישה רב תחומית אשר מתארת מחד את השונות בזמן ובמרחב בתנאים ומאידך את השונות בתגובת הצומח על פני שטחים נרחבים. מרבית המחקרים אשר בדקו את השפעת שינויי האקלים על הייצור הראשוני בשטחים נרחבים מוגבלים בעיקר ע"י הרזולוציה המרחבית והעתית [4-7]. לרזולוציה גבוהה יש חשיבות במיוחד במדינות כמו ישראל שהשטח שלהן קטן ומאופיין בשונות אקלימית גבוהה ומלווה באי ודאות גבוהה [8]. ע"י שילוב של מודלים מבוססי תהליך עם מערכות מידע גיאוגרפיות (ממ"ג), ניתן להגיע לתיאור מפורט של הסביבה המשפיעה על היצרנות הראשונית [9,10]. גישה זו הוכחה כיעילה ושימושית במודל שפותח באוניברסיטת בן גוריון לחיזוי יצרנות ראשונית בסביבה טבעית [9]. לפי גישה זו, פותח במחקר מודל לחיזוי יצרנות דגניים בשדות חקלאיים המבוסס על השמה מרחבית והתאמה של מודל צימוח קיים [11]. מודל הצימוח אשר פותח במרכז המחקר החקלאי גילת הוכח כבעל יכולות חיזוי טובה לחלקות ניסוי. המונח יצרנות דגניים בהקשר החקלאי יכול להיות מורכב ועל כן ראוי לציין כי עבודה זו מתמקדת בעיקר ביבול כולל (ביומסה) ויבול גרעינים. מכיוון שגידול הדגניים הדומיננטי בארץ הוא חיטה (בהיקף זרוע של כמיליון דונם), המודל מתמקד בו. בפיתוח המודל הושם דגש על רזולוציה מרחבית ועיתית גבוהה ועל שיפור הפן ההידרולוגי-תהליכי לחיזוי זמינות המים לצומח. לצורך כך נעשה שימוש בנתונים של שכבות ממ"ג, מכ"מ גשם וחישני רטיבות קרקע. מטרת המחקר העיקרית היא להגיע באמצעות פיתוח של מודל מפורט

להערכה טובה יותר של השפעת שינויי האקלים על ייצור הדגניים ולהסיק מסקנות לגבי אופן ועוצמת השפעות אלו, כך שניתן יהיה להיערך אליהם בהתאם.

3. מטרות המחקר (כפי שהופיעו בהצעת המחקר המקורית)

1. הסבה ופרמטריזציה של מודל שפותח באוני' בן גוריון לסביבת דגניים (חיטה ושעורה) בשדות חקלאיים.
2. בחינת המודל המוסב כנגד קצירים והערכת אי הוודאות והיציבות שלו בחיזוי היצרנות.
3. שילוב נתוני מכ"ם מטאורולוגי במנגנון הסקה להערכה כוללת של השפעת תכונות הגשם על היצרנות.
4. הרצת סימולציות של שינויי אקלים חזויים על יצרנות הדגניים מתוך המודל.
5. הסקה כללית לגבי מידת ההשפעה של התרחישים החזויים על יצרנות הדגניים.
6. בחינה, באמצעות סימולציות של המודל, של פתרונות מוצעים לבעיות שיתעוררו כתוצאה משינויי אקלים חזויים. פתרונות אלו יכולים להיות פשוטים כמו שינוי מימשק אגרוטכני (אי פליחה, מועד זריעה, רמת דשן, גידול/זן, וכדומה) אך יכול להיות מורכב בהרבה (למשל התאמת אזורים בחלקות למימשק גידול על בסיס שיפוע, פנות וכדומה).

4. חשיבות המחקר

1. החשיבות בפיתוח מודל מרחבי החוזה תכולת רטיבות וייצור ראשוני היא במתן הערכה מפורטת על פוטנציאל הגידול בשדות החקלאיים. הערכה זו יכולה לשמש כעזר לחקלאים בקבלת החלטות מושכלות מבחינה ביצועית וכלכלית.
2. חשוב לבחון ברזולוציה גבוהה את השפעת שינויי האקלים אשר יכולה להיות מוטה על ידימאפיינים מקומיים ומוכללת במחקרים גלובליים. שינויי אקלים יכולים לגרום להרעה בתנאי הגידול ולכן צריך להיערך אליהם מבעוד מועד. יתרה מכך, בחינה של השפעת הגורמים המרחביים על הרגישות לשינויי אקלים יכולה להוביל למסקנות ופעולות אשר יצמצמו את הפגיעה העתידית.

5. שיטות

5.1 רקע כללי על המודל

המודל שפותח במסגרת עבודה זו הוא מודל פיזיקלי מבוסס תהליך מפורש בזמן ובמרחב. מטרתו לחזות ייצור ראשוני של חיטה בשדות חקלאיים על פני שטחים נרחבים. העיקרון המנחה של המודל הוא דימוי מרחבי ופיזיקלי של הקשרים המורכבים במציאות בין אקלים, סביבה חקלאית וצומח. שטח המחקר חולק לתאים באמצעות מטריצה ראסטריט והחישוב במודל בוצע לכל תא בנפרד. המודל מסוגל לחזות לכל תא את הרטיבות ברזולוציית זמן של דקות ואת הביומסה והגרעינים ברזולוציה יומית. כל תא מוזן על ידי פרמטרים מרחביים שונים על פי בסיס נתונים מרחבי. ניתן לחלק את החיזוי במודל לשלושה תהליכים עיקריים: 1. מידול של זמינות המים לצמח בקרקע ע"י מודל הידרולוגי; 2. מידול של התפתחות הצומח בהתבסס על זמינות המים ותנאים נוספים אחרים כמו טמפרטורה וקרינה על פי המודל של Amir and Sinclair [11]; 3. מידול של הפיזיקים הקיימים בין הצומח לתכולת הרטיבות בקרקע. הקוד הראשי של המודל נכתב ב-Matlab והוא מקשר בין בסיס הנתונים והתהליכים השונים. הרזולוציה המרחבית שנקבעה במחקר זה היא בגודל תא של 50X50 מ"ר. גודל זה נבחר על פי העדפה של רזולוציה מרחבית גבוהה ככל הניתן במגבלות של זמני הרצה בקנ"מ של אזור המחקר. במודל ישנה אופציה לבחור את סקאלת הזמן, אולם חישוב הסעת נגר נעשית רק בסימולציות בפירוט דקתי. בעבודה זו, לצורך חישוב בזמני הרצה, נבחרה סקאלה משולבת יומית ודקתית: בימים הגשומים בעונה החישוב הוא דקתי וכולל הסעת נגר ובימים היבשים החישוב הוא יומי ומכיל רק מידול של איבוד המים מהקרקע. מהלך העבודה כלל שלושה שלבים עיקריים:

1. איסוף וארגון בסיס הנתונים;
2. פיתוח המודל והרצתו;
3. אימות המודל על פי נתוני דיגום וחיישני לחות קרקע על פני שתי עונות גידול.

5.2 ארגון בסיס הנתונים להרצת המודל

5.2.1 נתונים נקודתיים

נתוני אקלים יומיים נלקחו מתחנה מטאורולוגית סטנדרטית של משרד החקלאות הנמצאת בסמוך לאזור המחקר בתל יוסף. נתונים אלו נדרשים לחישוב התאדות פוטנציאלית: קרינה מצטברת, טמפ' מקסימאלית ומינימאלית, לחות יחסית ומהירות רוח.

5.2.2 נתונים מרחביים

בסיס הנתונים המרחבי מורכב משכבות ממ"ג המכילות מידע סביבתי, נתוני מכ"מ מטאורולוגי ונתונים אגרו-טכניים לפי חלקות חקלאיות.

1. שכבות ממ"ג המכילות מידע סביבתי: שכבת הבסיס היא שכבת גבהים דיגיטלית (Digital Elevations Model) DEM. שכבת ה-DEM מהווה שכבת ייחוס לכל שאר שכבות הקלט במודל. על פיה נקבע גודל התא והייחוס המרחבי של התוצרים. על בסיס ה-DEM חושבו שכבות נוספות הנחוצות למודל: שכבת כיווני זרימה, שכבת הצטברות נגר ושכבת קרינה מרחבית המופקת על בסיס ה-DEM, חישוב אזורי הצללה וזוויות השמש.

2. נתוני מכ"מ מטאורולוגי: שכבת פוליגונים בממ"ג מייצגת תאי מכ"מ מטאורולוגי של שח"ם מקורות, הממוקם בשדה התעופה בן גוריון. לכל תא ישנו מספר זיהוי ייחודי ואליו משויכים נתוני עוצמות הגשם ברזולוציית זמן של 5 דקות. הנתונים הומרו לרזולוציה של דקות ע"י אינטרפולציה ליניארית. נתוני המכ"ם כוילו בשיטה של הוצאת הטייה ממוצעת ובשימוש נתוני מד הגשם הממוקם בבית השיטה.

3. נתונים על פי חלקות חקלאיות: הנתונים שנאספו על פי חלקה מכילים נתונים אגרו-טכניים שנאספו מהחקלאים: תאריכי זריעה, זנים ועיבוד הקרקע ונתוני מרקם הקרקע שנדגמו על פי חלקה מהלך שתי עונות גידול חיטה (2010-2011, 2011-2012).

הפרמטרים ההידרולוגיים של הקרקע אשר משמשים למידול החידור חולצו מנתוני מרקם הקרקע. בשל מגבלת גודל השטח, נלקחו דגימות קרקע מייצגות לכל חלקה בהנחה שבקנ"מ של חלקה, עם היסטוריה משותפת של עיבודים וטיפולים, השינוי במרקם אינו משמעותי. בכל דגימה נבדקה התפלגות גודל הגרגר ובאמצעות שיטת Neural Network חולצו ממרקם הקרקע 5 פרמטרים הידראוליים של הקרקע המאפיינים את עקום התאחיזה של המים בקרקע [12]: θ_s - תכולת רטיבות ברוויה. θ_r - תכולת רטיבות שאריתית, K_s - מוליכות הידראולית ברוויה, n ו- α - קבועים המאפיינים את עקום התאחיזה של המים בקרקע.

5.2.3 סידור נתוני השכבות בטבלת קלט מרכזית

טבלת קלט אחת מרכזת את כל המידע לכל תא במודל. כל רשומה בטבלה מגדירה תא יחיד עם מאפיינים ייחודיים בכל עמודה. חלקם של המאפיינים בעמודות הם במקורם נתונים משכבות ממ"ג המבטאים את השונות המרחבית. עמודות נוספות מכילות ערכים לא מרחביים אחידים לכל התאים אשר נחוצים כפרמטרים לחישוב במודל ונוספו ישירות לטבלה.

5.3 פיתוח המודל והרצתו

איור 1 מציג תרשים זרימה הממחיש את הבסיס התפיסתי של המודל. המודל נכתב ב-Matlab ומקשר בין בסיסי הנתונים למודלים של חיזוי זמינות המים בקרקע ושל חיזוי התפתחות הצומח ולבסוף מאמת את התוצאות לפי נתוני האימות.

5.3.1 מידול של זמינות המים לצומח בקרקע

מידול של זמינות המים נעשה בעיקר ע"י Hydrus1D [13]. תוכנה המתמחה בתיאור של תהליכים הידרולוגיים בתת הקרקע כמו חידור של מים בשדות חקלאיים. נתוני הקלט שהוכנסו לתוכנה זו: (1) נתוני גשם מהמכ"מ בדקות בנוסף לנגר המגיע מהתאים במעלה המדרון. (2) נתונים מטאורולוגיים יומיים לחישוב התאדות פוטנציאלית לפי שיטת פנמן-מונטיס. (3) פרמטרים הידראוליים המשפיעים על אופן חידור המים לקרקע אשר חולצו לפי בדיקת מרקם הקרקע. נתוני הפלט הם: (1) פירוט של תכולת הרטיבות לכל עומק הפרופיל. (2) כמות המים שלא הצליחה לחדור והפכה לנגר ישיר. תוכנת Hydrus-1D מחשבת בכל פעם את פרופיל הלחות לתא בודד במהלך יום. כאשר ההרצה על כל הימים בעונה וכל התאים במרחב

בנוסף למידול הצומח והנגר נעשים באמצעות קוד ב-Matlab. בסוף כל יום מחושב לכל תא ערך של זמינות המים שנקרא: Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW). משתנה זה מייצג ערך יומי של תכולת רטיבות ממוצעת לבית השורשים המנורמלת לטווח הרטיבות הזמין לצומח (נוסחא 1).

$$FTSW = \frac{\theta_{rz} - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}} \quad (1)$$

θ_{rz} היא תכולת הרטיבות הממוצעת לבית השורשים ומחושבת לפי מיצוע של תכולת הרטיבות המתקבלת מהחישוב ב-Hydrus-1D לאורך פרופיל הקרקע עד לעומק השורשים בכל יום. עומק השורשים משתנה בכל יום כפי שיפורט בהמשך. θ_{fc} הוא קיבול השדה של הקרקע ו- θ_{wp} היא נקודת הכמישה.

5.3.2 מידול הסעת נגר

מלבד חישוב נגר ישיר ממאזן ההידרולוגי על פי עודפי המים שלא חדרו לקרקע, מודל זה מכיל רכיב ייחודי המחשב גם את הסעת הנגר במרחב לפי שכבת כיווני הזרימה. לצורך כך פותחה פונקציה המסדרת את התאים בטבלת הקלט על פי סדר זרימה כך שתא מסוים אינו יכול להתנקז לאחד התאים הנמצאים מעליו בטבלה. לצורך הסידור הפונקציה נעזרת בשכבת כיווני הזרימה, הצטברות נגר ו-DEM. כמות הנגר העוברת מתא לתא חושבה על פי משוואת של זרימה עילית למרווח זמן של דקה.

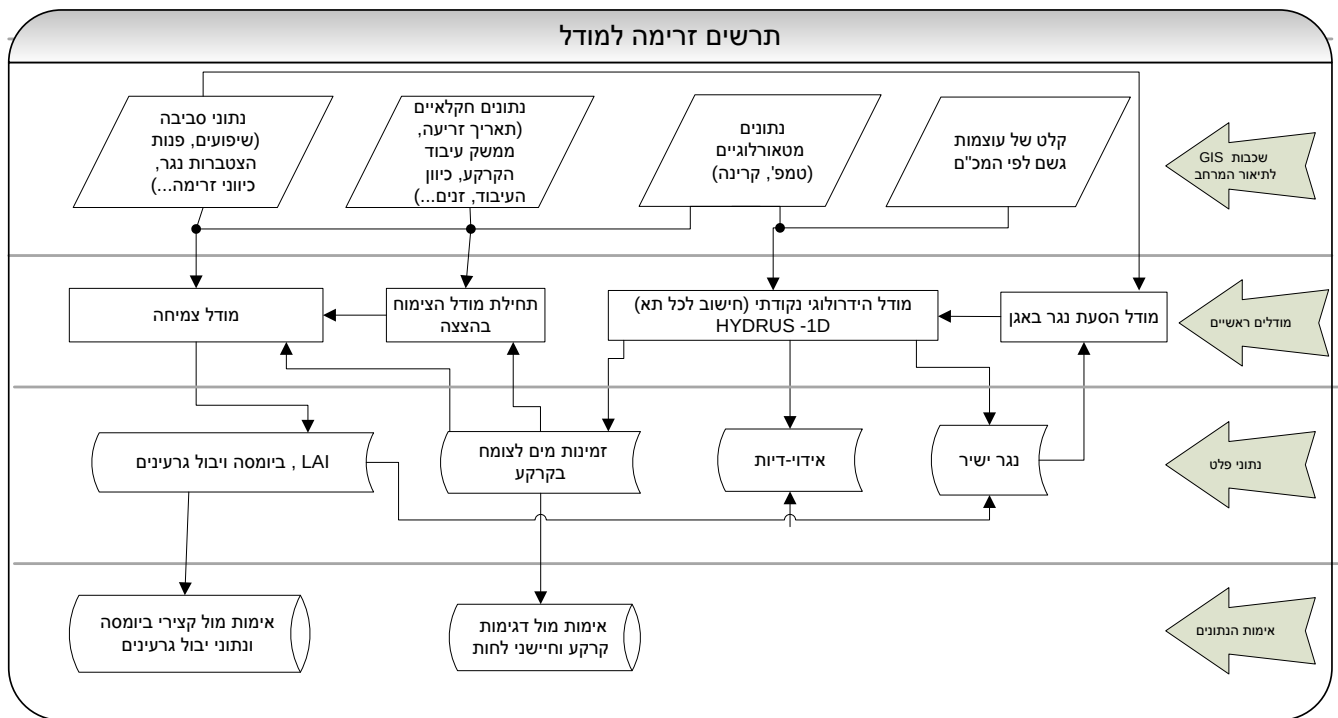
5.3.3 מידול של צימוח החיטה במהלך העונה

פיתוח מודל הצימוח נעשה לפי התאמה של מודל מבוסס תהליך [11] המאופיין לחלקות ניסוי, עבור שטחים נרחבים. למעשה מודל הצימוח רץ על כל תא לפי המאפיינים הייחודיים לו ברזולוציית יומית, המודל פשוט יחסית ומבוסס על כמה יחסים משמרים בין קרינה וטמפרטורה לחיזוי התפתחות, גדילה ויבול של החיטה.

תחילה מודל זה חוזה את התפתחות הצמח לפי קליטה מצטברת של יחידות טמפרטורה בצמח (Thermal Units) TU - ממוצע בין מקסימום למינימום טמפ' יומית. כל עלה וכל שלב גידול מאופיין בכמות TU הנחוצים להשגתו. לפי חיזוי מספר העלים מחושב ה-LAI ע"י פונקציה אמפירית. הקרינה האקטיבית הפוגעת בצומח מעורכת לפי ה-LAI. הכפלת הקרינה האקטיבית בערך קבוע וידוע של כמות ביומסה מצטברת לכל יחידת קרינה (Radiation Use Efficiency) RUE נותנת את הביומסה. לבסוף מחשב המודל את יבול הגרעינים לפי מדד ה-harvest index (HI). מדד זה מבטא את היחס בין משקל הגרעינים היבש לכלל הביומסה [14].

לאורך כל חיזוי התפתחות הצומח, השפעת מגבלת המים באה לידי ביטוי ע"י הכפלה בפקטור קבוע בין 0-1. הפקטור מחושב לפי פונקציות אקספוננציאליות אמפיריות התלויות במשתנה של כמות המים הזמינים לצמח FTSW (אשר חושב לפי המודל ההידרולוגי). הגבלת המים משולבת במודל בשלושה אופנים:

- הגבלת התפתחות העלים.
- הפחתת הערך הקבוע של כמות הביומסה הנקלטת ליחידת קרינה RUE (כתוצאה מסגירת פיוניות).
- קיצור של שלבי הגידול בתנאי יובש קיצוניים (הוספת יחידות טמפרטורה).
- מודל הצימוח נוספו מספר שיפורים שלא חושבו במקור:
- מועד הצצה: הצימוח מתחיל ביום ההצצה ולכן נוסף גם מידול של מועד ההצצה לפי תאריך הזריעה ותכולת הרטיבות בעומק הזריעה. אם עוברים 5 ימים עם תכולת רטיבות בעומק הזריעה הגדולה או שווה לנקודת הכמישה, ההערכה היא כי יומיים לאחר מכן (ביום ה-7) תתרחש ההצצה.
- גידול השורשים: לצורך הערכה יותר מדויקת של זמינות המים על פי המשתנה FTSW נעשה מיצוע של תכולת הרטיבות בפרופיל הקרקע רק עד לעומק בית השורשים ולא לפרופיל כולו. מידול עומק השורשים נעשה על פי הערכה המקורבת כי בכל יום ממועד ההצצה אורכם גדל בס"מ אך לא עובר את חזית ההרטבה.



איור 1: תרשים זרימה להמחשת המודל הקונספטואלי: תחילה המודל מתבסס על בסיס נתונים מרחבי. על פי נתונים אלו כלל תא באזור המחקר מחושב מאזן המים הנקודתי ע"י ה-HYDRUS. תוצרי חידור המים לאחר התחשבות בהתאדות ובהסעת הנגר מתורגמים למים זמינים לצומח בקרקע. נתון זה משמש כגורם מגביל למודל החווה את היצרנות הראשונית לפי התנאים הסביבתיים והאקלימיים. לבסוף היצרנות והיבולים בנוסף לזמינות המים בקרקע מאומתים אל מול נתונים אמפיריים וחיישנים רטיבות קרקע.

5.3.4 מידול של הפידבקים הקיימים בין הצומח לתכולת הרטיבות בקרקע

למעשה ישנה השפעה דו כיוונית בין חיזוי תכולת הרטיבות לחיזוי התפתחות הצומח. משתנים של הצומח משפיעים על מאזן המים בקרקע לאורך העונה ומשתנים של תכולת הרטיבות מכתיבים את התפתחות הצומח:

- FTSW: הוא משתנה המבטא את זמינות המים לצומח ומגביל את התפתחותו במודל הצימוח. המשתנה מחושב לפי תוצר תכולת הרטיבות ב-Hydrus-1d.
- אורך שורשים: אורך השורשים נדרש לחישוב זמינות המים לצומח ולמשתנה של לקיחת מים ע"י השורשים. מצד שני לצורך מידול אורך השורשים, נדרש המשתנה של עומק חזית ההרטבה המוערך ב-Hydrus-1D.
- מועד הצצה. מועד ההצצה נקבע על פי תכולת הרטיבות בקרקע לאחר הזריעה ולמעשה הוא קובע את חיזוי תחילת התפתחות הצמח.
- LAI: ה-LAI מחושב במודל לכל יום על פי מודל הצימוח. לאחר כל יום נכנס הערך העדכני לחישוב תכולת הרטיבות ב-Hydrus-1D בשני מקומות: 1. על פי ה-LAI ההתאדות הפוטנציאלית מחולקת לאידיוי פוטנציאלי מהקרקע ודיות פוטנציאלית מצומח. חישוב זה נחוץ להערכת לקיחת המים מהקרקע ע"י השורשים. 2. ה-LAI נכנס בתור פרמטר של צומח במשוואת פנמן-מונטיס להערכת השפעת הצומח על ההתאדות כתוצאה מגידול בחספוס.

5.4 אימות המודל:

המודל לא כויל על פי נתונים מקומיים במטרה להשאיר אותו מספיק גנרי לצורך התאמה למקומות שונים וזמנים שונים. ההנחה כי תיאור הקשרים הפיזיקליים שלו מספקים להערכה טובה של יצרנות חיטה. טיב החיזוי מוערך על פי נתוני אימות אשר חלקם נדגמו בשטח וחלקם נאספו מנתוני החקלאים בשתי עונות גידול: 2010-2011 ו-2011-2012. במחקר זה נדגמו 40 נקודות במרחב בהתחשב במגבלות של גודל אזור המחקר. נקודות הדגום נבחרו בקפידה על מנת שייצגו בצורה הטובה ביותר את השונות המרחבית בשטח המחקר. האימות בוצע לשלושה תוצרים מהמודל:

- תכולת רטיבות: נלקחו דגימות קרקע משני עומקים: עומק רדוד בין 5-10 ס"מ ומשכבה עמוקה יותר ב-30 ס"מ.

בנוסף, תכולת הרטיבות אומתה גם מול חיישני לחות קרקע לצורך בחינת החיזוי ברזולוציית זמן גבוהה של דקות.

- ביומסה: במיקום של דגימות הקרקע נדגמה ביומסת חיטה על קרקעית בשלבי גידול שונים.
- יבול גרעינים: נתוני יבול הגרעינים ממוצעים לכל חלקה התקבלו מהמגדלים. מידע אשר נרכש במהלך. בשל כך נעשה מיצוע ליבול הגרעינים החזויים במודל לכל התאים בחלקה.

6. תוצאות ודיון

תוצאות האימות לפי דגימות הקרקע מסוכמות בטבלה 1, לפני ואחרי מיצוע ערכי נקודות הדיגום לכל חלקה. אחת הבעיות העיקריות באימות של תא בודד היא כאשר השונות בתוכו גבוהה ומספר הדגימות אינו מספק להעריך את הממוצע נכון. מיצוע של תאים לפי חלקה חקלאית משפר את יכולת האימות בכך שמספר הדגימות הנקודתיות להערכת יחידת שטח גדל ומספק אומדן יותר טוב. זאת כאשר חלקה חקלאית מבטאת לרוב יחידה הומוגנית מבחינה אגרוטכנית. המדדים לאחר המיצוע לחלקה השתפרו באופן גורף בשתי העונות כאשר השיפור במדד R^2 יותר בולט בעונת הדיגום השנייה. ייתכן והזריעה ברטוב בעונה זו והצצה לא אחידה מחזקת את הצורך במיצוע לחלקה. ניתן להסיק כי המיצוע לפי חלקה של דגימות השדה עזר להתאמה בין נתוני החיזוי לדיגום ולכן בהמשך הפרק יוצגו תוצאות האימות על פי המיצוע. מבחינה זו יבול הגרעינים יוצא דופן משום שנתוני האימות שנאספו הם מראש בערכים ממוצעים לחלקה.

טבלה 1: השוואה בין מדדי האימות של תוצאות החיזוי במודל מול המדוד בדיגום שדה, לפני ואחרי מיצוע ערכי דיגום לחלקה.

תוצר המודל ממוצע לחלקה:	R^2		RMSE	
	לפני	אחרי	לפני	אחרי
עונה 2010-2011				
תכולת רטיבות 5-10 ס"מ	0.82	0.83	0.06	0.05
תכולת רטיבות 30 ס"מ	0.56	0.62	0.07	0.06
ביומסה	0.91	0.93	165.13	144.97
גרעינים	---	0.55	---	86.6
עונה 2011-2012				
תכולת רטיבות 5-10 ס"מ	0.55	0.64	0.06	0.05
תכולת רטיבות 30 ס"מ	0.43	0.50	0.06	0.06
ביומסה	0.75	0.82	63.83	59.93
גרעינים	---	0.83	---	59.3

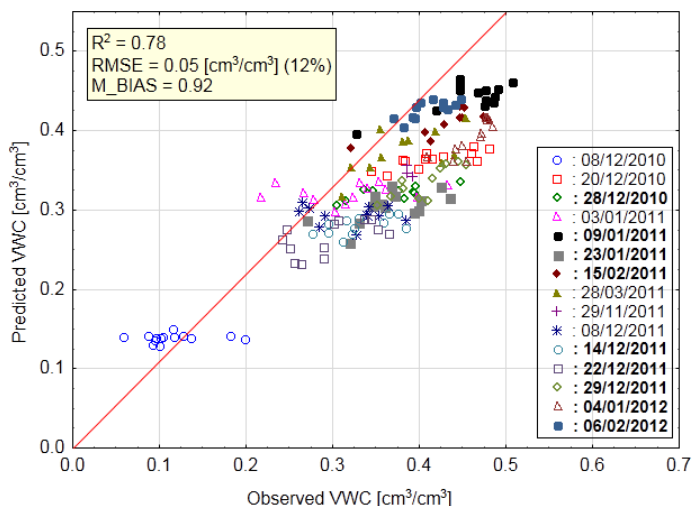
6.1 תוצאות אימות תכולת רטיבות לעומק 5-10 ס"מ

בעונה הראשונה נמצאה התאמה מהותית ($R^2 = 83\%$) בין תוצאות המודל לנתונים המדודים ובעונה השנייה נמצאה התאמה של ($R^2 = 64\%$). בשתי העונות השגיאה RMSE עמדה על 0.05 בערכי תכולת הרטיבות (טבלה 1). באיור 2 מוצגות תוצאות האימות על פי דגימות שנלקחו מעומק 5-10 ס"מ לשתי עונות הדיגום יחד. התוצאות מוצגות באמצעות דיאגרמת פיזור של חזוי מול מצוי, תכולת הרטיבות המדודה בציר ה-X מול תכולת הרטיבות החזויה בציר ה-Y. מדד M_BIAS (Multiplicative Bias) בנוסחה 1 נותן הערכה לכיוון ועוצמת הסטייה של ממוצע הערכים החזויים ביחס לממוצע הערכים המדודים.

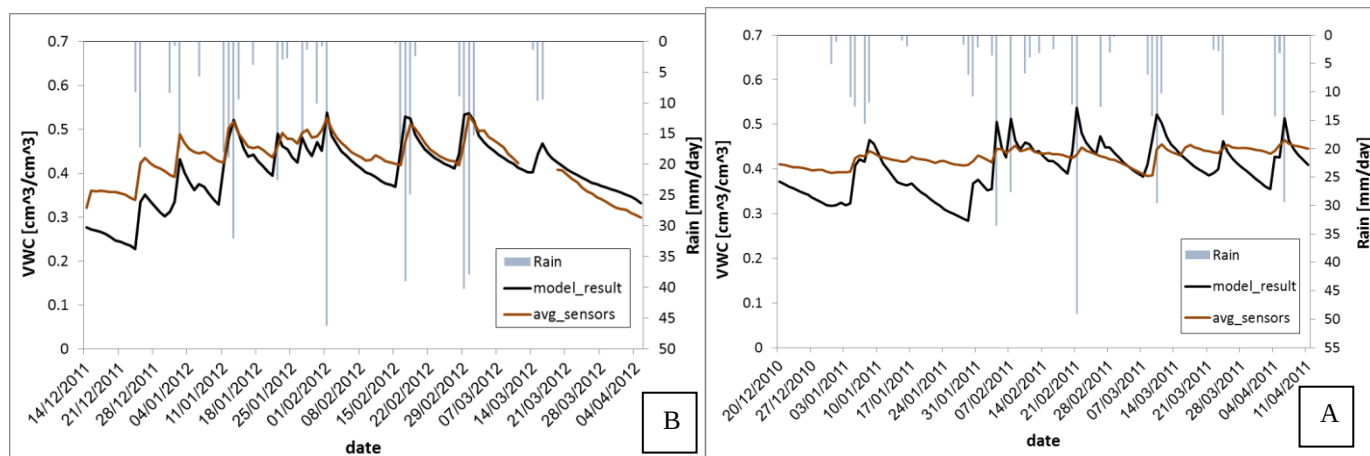
$$M_BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n pre_i}{\sum_{i=1}^n obs_i} \quad (1)$$

התוצאות הכוללות לשתי העונות בעומק 5-10 ס"מ מראות הערכת חסר קטנה יחסית ($M_BIAS < 1$) עם התאמה של ($R^2=0.78$) ושגיאה ממוצעת של ($RMSE=0.05$), המהווה כ-12% שגיאה מנורמלת מטווח ערכי תכולת הרטיבות המדודות. ניתן לראות באיור 2 קבוצה מופרדת של ערכי תכולת רטיבות נמוכים אשר נמדדו לפני תחילת הגשמים בעונה הראשונה ומראים חוסר רגישות במודל. בהמשך העונה, לאחר הגשם הראשון ובמהלך תקופת הדיגום, הקרקע לא

התקרבה לרמת יובש דומה. ההתאמה הפחות טובה של העונה השנייה ביחס לעונה הראשונה יכולה להעיד על טווח מצומצם יותר של ערכי תכולת רטיבות שנדגמו בעונה השנייה. בעונה זו הגשם התחיל מוקדם יותר ולכן לא נדגמו ערכים של קרקע יבשה. באיור 3 מוצגת השוואה בין ערכי תכולת הרטיבות החזויים בעומק 10 ס"מ לבין ממוצע ערכי החיישנים מאותו עומק על בסיס יומי. בציר משני מוצגות עוצמות הגשם. בעונה הראשונה ניתן לראות כי תכולת הרטיבות במודל הייתה רגישה יותר לאירועי הגשם לאורך העונה לעומת החיישנים. במודל, ההתייבשות יותר מהירה ותכולת הרטיבות המקסימלית לאחר סופה גבוהה יותר. החיישנים מראים תנודות יותר מתונות ובמצב ייבוש הערכים של המודל בהערכת חסר משמעותית לעומתם. בעונה השנייה עוצמת התנודות בתכולת הרטיבות בין המודל לחיישנים תואמת הרבה יותר מהעונה הראשונה אולם גם כאן בתקופה של קרקע יבשה נצפתה הערכת חסר.



איור 2: אימות תכולת הרטיבות בעומק 5-10 ס"מ לשתי עונות הדיגום יחד על פי חלוקה לתאריכים. מודגשים תאריכי דיגום בהם האימות יצא מובהק סטטיסטית ברגרסיה לינארית.

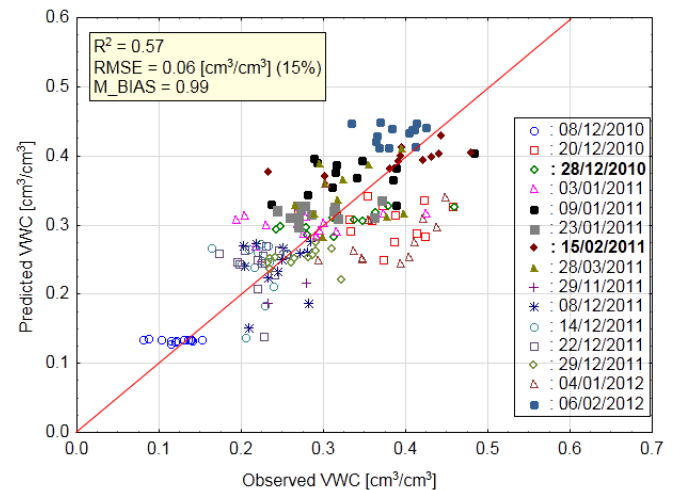


איור 3: השתנות תכולת הרטיבות בעומק 5-10 ס"מ על בסיס יומי לפי ממוצע החיישנים (חום) לעומת החיזוי במודל (שחור) לעונה הראשונה (A) ולעונה השנייה (B).

6.2 תוצאות אימות תכולת רטיבות בעומק 30 ס"מ.

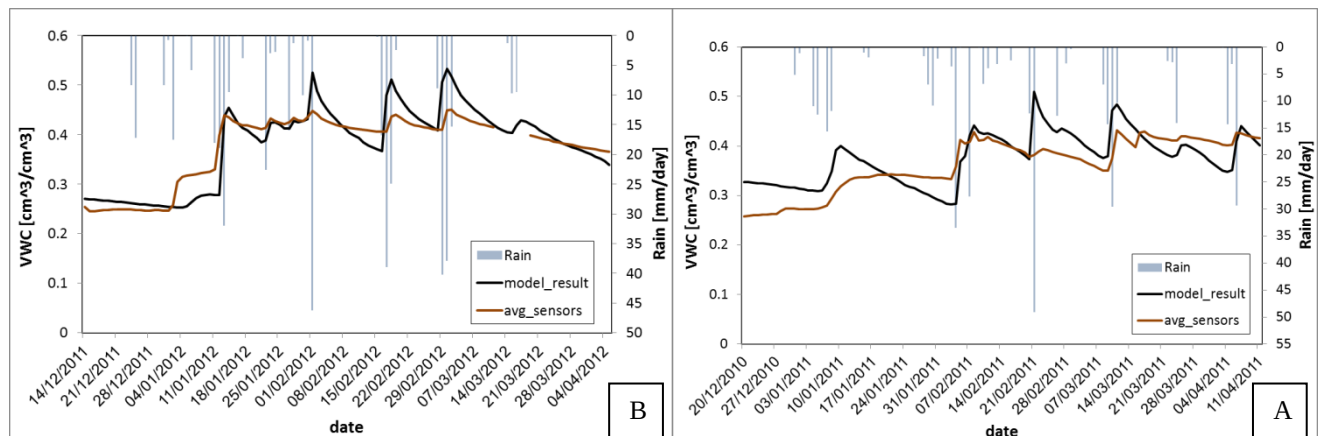
באיור 4 מוצגת דיאגרמת פיזור לשתי עונות הדיגום של תכולת רטיבות חזויה מול מדודה בעומק 30 ס"מ. התוצאות מראות התאמה של ($R^2 = 57\%$) עם שגיאה ממוצעת ($RMSE = 0.05$) המהווה כ-15% שגיאה מנורמלת מטווח ערכי תכולת הרטיבות המדודות. תוצאות האימות בעומק 30 ס"מ לשתי העונות מראות התאמה פחות טובה בין המודל לדיגום מאשר בעומק 5-10 ס"מ (טבלה 1). חשוב לציין כי מרקם הקרקע נדגם רק בעומק 10 ס"מ ויושם במודל לכל עומק הפרופיל. ייתכן ולכך יש תרומה על ההתאמה הנמוכה יותר בעומק 30 ס"מ. בעונה הראשונה נמצאה התאמה של ($R^2 = 62\%$) בין המודל לדיגומים הקרקע ובעונה השנייה ההתאמה אף נמוכה יותר ($R^2 = 50\%$). השגיאה הממוצעת לשתי העונות עומדת על ($0.06 =$

(RMSE) בערכי תכולת רטיבות. הסיבה לכך שמדדי האימות פחות טובים בעונה השנייה קשורה בפחות מועדי דיגום וטווח צר יותר של ערכי תכולת רטיבות.



איור 4: אימות תכולת הרטיבות בעומק 30 ס"מ לשתי עונות הדיגום יחד על פי חלוקה לתאריכים.

החיישנים בעומק 30 ס"מ בעונה הראשונה (איור 5A) מראים יותר תנודות של הרטבה וייבוש לעומת עומק 10 ס"מ באותה עונה (איור 3A) ובכך דומים יותר למודל. למרות זאת עדיין ניתן לראות כי תהליכי ההרטבה והייבוש פחות עוצמתיים מהמודל בעיקר במצב של ערכי תכולת רטיבות גבוהים. בעונה השנייה, בעומק 30 ס"מ (איור 6B), החיישנים מראים תגובה דומה למודל במעבר ממצב של קרקע יבשה לקרקע רטובה ובהמשך העונה, כאשר הקרקע רטובה יותר, החיישנים מראים פחות רגישות לסופות חזקות מאשר המודל.

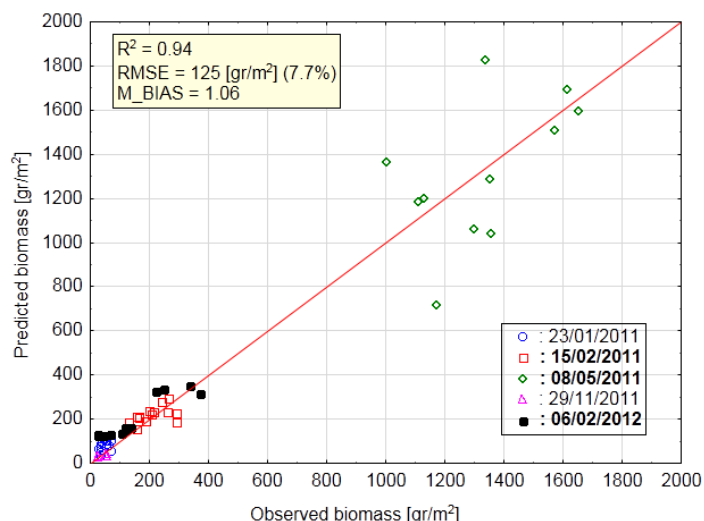


איור 5: השתנות תכולת הרטיבות בעומק 30 ס"מ על בסיס יומי לפי ממוצע החיישנים לעומת החיזוי לעונה הראשונה (A) ולעונה השנייה (B).

6.3 תוצאות אימות ביומסה

תוצאות אימות ערכי הביומסה החזויים מול קצירי השדה לשתי עונות הדיגום מוצגות באיור 6. מדדי אימות לביומסה מראים התאמה גבוהה ($R^2 = 94\%$) עם שגיאה ממוצעת ($RMSE = 125 [מ'גרי]$) המהווה 7.7% טעות מנורמלת מטווח ערכי קצירי הביומסה המדודים לשתי העונות. באופן גורף מדדי האימות בביומסה מציגים התאמה טובה יותר מאשר בתכולת הרטיבות (טבלה 1). הביומסה פחות מושפעת בטווח הקצר מתהליכים רגועים כמו גשם וטמפרטורה לעומת תכולת הרטיבות. לכן היא מכילה פחות תנודות במהלך העונה ובכך היא יותר קלה לאימות בנקודות זמן מעטות. בעונה הראשונה נדגמה ביומסה בשלושה תאריכים ($R^2 = 93\%$) ובעונה השנייה נדגמה ביומסה רק בשני תאריכים בשל תנאי השטח ($R^2 = 82\%$). בעונה השנייה ההתאמה פחות טובה ביחס לעונה הראשונה בשל טווח ערכי דיגום יותר צר.

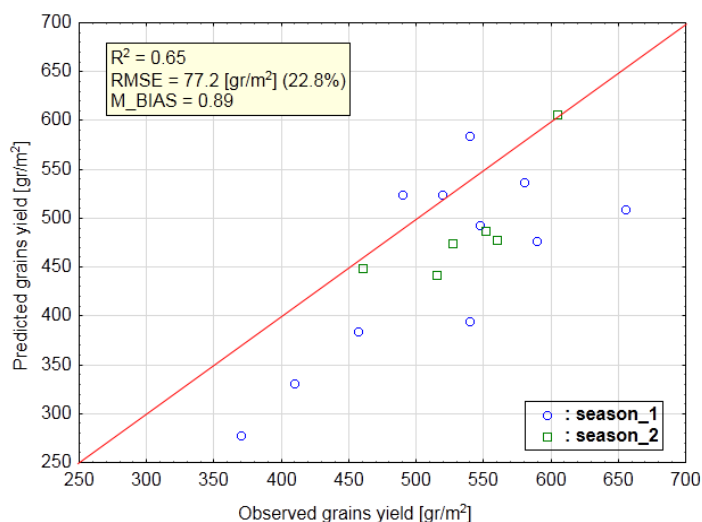
בתאריך הראשון בעונה השנייה נדגמו רק החלקות שנזרעו לפני הגשם הראשון ובתאריך השני נדגמו כל החלקות באזור המחקר.



איור 6 : אימות ביומסה לשתי עונות הדיגום יחד על פי חלוקה לתאריכים.

6.4 תוצאות אימות יבול גרעינים

אימות יבול הגרעינים נעשה בדרך שונה משאר התוצרים במודל כאשר נתוני האימות מכילים את ערכי קציר הגרעינים כפי שנמדדו באמצעות הקומביין במוצק לחלקה. זהו למעשה היבול הסופי והמקסימלי לאחר תהליך מילוי הגרגר. בעונה הראשונה אומתו 13 חלקות ובעונה השנייה 7. באיור 10 מופיעות תוצאות האימות לחיזוי יבול הגרעינים לשתי העונות. חשוב לציין שחלק מהחלקות שנדגמו לביומסה נקצרו לשחת/תחמיץ ולכן אינן מופיעות באימות. התוצאות מראות התאמה של ($R^2 = 65\%$) עם שגיאה ממוצעת ($RMSE = 77.2$ [גר'/מ²]) המהווה 22.8% טעות מנורמלת ממוצח ערכי יבול הגרעינים לשתי העונות. השגיאה המנורמלת יחסית גדולה בשל מספר מוגבל של חלקות עם נתונים. בחיזוי הגרעינים ישנה הערכת חסר משמעותית של כ-10%. האימות לעונה הראשונה מראה התאמה בינונית ($R^2 = 55\%$). בעונה השנייה ההתאמה טובה יותר ($R^2 = 83\%$).



איור 7 : אימות יבול גרגרים לשתי עונות הדיגום יחד על פי חלוקה לעונה.

6.5 בחינת השפעתם של גורמים מרחביים על הדיק בחיזוי המודל.

באיורים 2, 4 ו-6 ניתן להבחין בברור בשונות קטנה של ערכים בתאריך בודד ביחס לשוני הגדול בערכים בין תאריכים. מכאן שהמודל חוזה בצורה טובה את ההשתנות בזמן אך מוגבל מבחינת החיזוי המרחבי. מספר רב של גורמים יכולים להסביר את מגבלת המודל בחיזוי מרחבי, ביניהם השונות בתוך התא, טעויות דיגום ומס' מוגבל של נתוני אימות. למרות

זאת, המודל עדיין מצליח להסביר בצורה מובהקת חלק מהשונות המרחבית במספר רב של תאריכים. באיורים 2, 4 ו- 6 מודגשים תאריכי הדיגום עם תוצאות אימות מובהקות, P_value קטן מ- 0.05 ברגרסיה לינארית. בכדי לאמוד את ההשפעה המרחבית של כל גורם יש לבחון את תוצאות האימות לפי תאריכים בודדים ובכך להזניח את ההשפעה של השונות העיתית. לפי תאריכי הדיגום שהמודל מצליח לחזות בצורה טובה ניתן להסיק לגבי התרומה של כל גורם מרחבי. לצורך ההערכה זו בוצע ניתוח רגישות למודל בכל תאריך אימות בו החיזוי היה מובהק. הניתוח התבסס על הוצאה בכל פעם של גורם מרחבי אחד והחלפתו בערך אחיד ומייצג. לאחר הוצאת ההשפעה המרחבית של כל גורם נבדק השינוי במדד R^2 המבטא את היכולת בחיזוי השונות המרחבית. בנוסף, לצורך בדיקת השפעת שילוב כלל הגורמים המרחביים, הורץ המודל כאשר כל הגורמים הוחלפו בערך אחיד. הגורמים המרחביים שנבדקו הם: נגר עילי, קרינה, גשם, מרקם קרקע, קבוצות זני חיטה, ושיטות עיבוד. תוצאות הניתוח מוצגות בטבלה נפרדת לכל תוצר במודל: תכולת רטיבות, ביומסה וגרעינים (טבלה 2 A-D). בטבלאות מוצגות תוצאות רק לתאריכי הדיגום בשתי העונות בהם האימות יצא מובהק כולל תוצאות לכלל העונות. הגורם בעל ההשפעה המרחבית הגדולה ביותר, כלומר החלפתו בערך יחיד מייצג גרמה להקטנה הגדולה ביותר ב- R^2 , נצבע באפור כהה, השני באפור בהיר יותר והשלישי באפור בהיר ביותר. ערכים שלא השתנו משמעותית לא נצבעו.

טבלה 2: בחינת ההשפעה של כל גורם מרחבי במודל, ע"י החלפתו בערך אחיד ומייצג, על ההתאמה (R^2) בין החזוי במודל למדוד בערכי תוצרי המודל. בעמודה הראשונה מוצגות התוצאות ללא החלפת הגורמים המרחביים כלל, לצורך השוואה ובעמודה האחרונה מוצגות התוצאות לאחר החלפת כל הגורמים המרחביים בערך אחיד.

שינוי הגדול ביותר שינוי שני בגודלו שינוי שלישי בגודלו

A2 תכולת רטיבות עומק 5-10 ס"מ:

תאריך	הגורם המוחלף בערך אחיד ומייצג:						
	ללא החלפה	נגר	קרינה	גשם	מרקם קרקע	קבוצות זן	סוג עיבוד
28/12/2010	0.29	0.26	0.29	0.19	0.19	0.29	0.18
09/01/2011	0.51	0.53	0.51	0.58	0.10	0.51	0.46
23/01/2011	0.35	0.30	0.34	0.33	0.08	0.35	0.38
15/02/2011	0.59	0.59	0.59	0.61	0.03	0.59	0.60
כלל עונה 1	0.83	0.83	0.83	0.83	0.80	0.83	0.83
14/12/2011	0.31	0.30	0.31	0.32	0.10	0.31	0.23
22/12/2011	0.32	0.31	0.32	0.32	0.25	0.32	0.30
29/12/2011	0.65	0.64	0.64	0.37	0.26	0.65	0.63
04/01/2012	0.70	0.69	0.70	0.07	0.35	0.70	0.67
06/02/2012	0.53	0.53	0.54	0.18	0.19	0.53	0.52
כלל עונה 2	0.64	0.64	0.64	0.65	0.61	0.64	0.63

B2 תכולת רטיבות עומק 30 ס"מ:

תאריך	הגורם המוחלף בערך אחיד ומייצג:						
	ללא החלפה	נגר	קרינה	גשם	מרקם קרקע	קבוצות זן	סוג עיבוד
28/12/2010	0.62	0.64	0.63	0.64	0.55	0.62	0.54
15/02/2011	0.52	0.54	0.52	0.54	0.15	0.52	0.52
כלל עונה 1	0.62	0.61	0.62	0.61	0.60	0.62	0.61
כלל עונה 2	0.50	0.48	0.50	0.54	0.54	0.50	0.49

תאריך	הגורם המוחלף בערך אחיד ומייצג:						
	ללא החלפה	נגר	קרינה	גשם	מרקם קרקע	קבוצות זן	סוג עיבוד
15/02/2011	0.24	0.24	0.22	0.002	0.25	0.24	0.26
08/05/2011	0.29	0.28	0.32	0.001	0.23	0.29	0.33
כלל עונה 1	0.93	0.93	0.94	0.92	0.94	0.93	0.93
06/02/2012	0.85	0.84	0.85	0.65	0.74	0.85	0.84
כלל עונה 2	0.82	0.81	0.81	0.67	0.74	0.82	0.82

D2: יבול גורמים :

עונה	הגורם המוחלף בערך אחיד ומייצג:						
	ללא החלפה	נגר	קרינה	גשם	מרקם קרקע	קבוצות זן	סוג עיבוד
2010-2011	0.55	0.53	0.47	0.251	0.48	0.56	0.55
2011-2012	0.83	0.82	0.86	0.82	0.69	0.84	0.80

באופן כולל ניתן לראות כי שילוב כלל הגורמים המרחביים במודל הוא בעל השפעה מהותית על טיב החיזוי. כמעט בכל התאריכים בתכולת רטיבות ויבול הגרעינים השפעה של שילוב הגורמים היא הגדולה ביותר ובביומסה ההשפעה שנייה בגדולה לאחר הגשם. דבר זה מדגיש את המציאות המורכבת והנחיצות בשילוב כלל הגורמים לחיזוי מרחבי. מבחינת גורמים בודדים נראה כי למרקם הקרקע השפעה גדולה על כל התוצרים שנחזו במודל. המרקם למעשה קובע את שיעור חידור המים לקרקע במודל ולכן בעל השפעה חזקה על תפירות המים וזמינותם לצומח מבחינה מרחבית. לתפירות הגשם לפי המכ"מ נמצאה השפעה מרחבית על תכולת הרטיבות בעומק 5-10 ס"מ במספר תאריכים אולם ההשפעה המהותית ביותר נצפתה על הביומסה (טבלה 2C). עיבוד הקרקע מראה השפעה מרחבית על תכולת הרטיבות בכמה תאריכי דיגום בעיקר בתחילת העונה. הכנסת קרינה מרחבית למודל השפיעה רק על יבול הגרעינים בעונה השנייה. לא נראה כי לגורמים נגר וזן חיטה הייתה השפעה על טיב החיזוי המרחבי באופן עצמאי אלא ייתכן ותרמו בשילוב עם שאר הגורמים. הוצאת הגורמים המרחביים בקושי השפיעה על מדדי החיזוי לכלל העונות המושפעות יותר מהשונות העתית.

6.6 תוצאות שינויי אקלים:

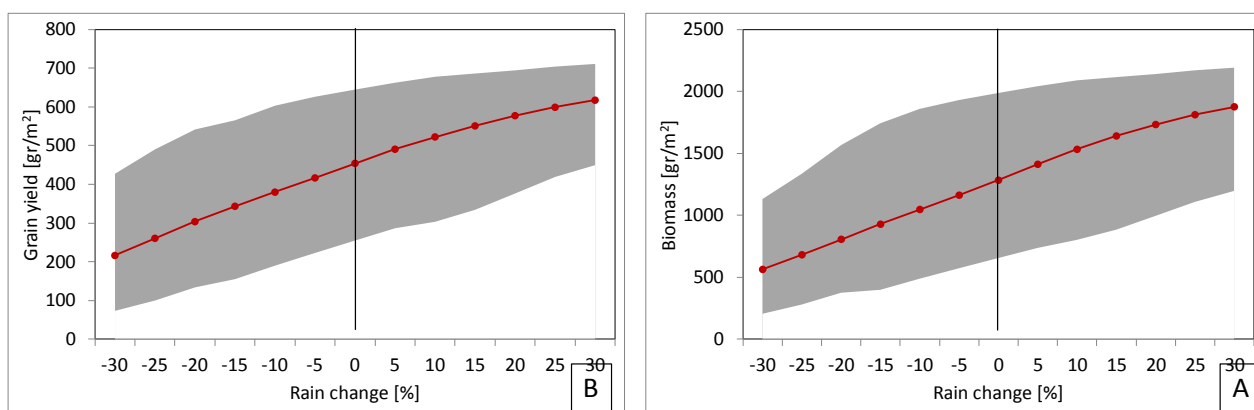
במסגרת המחקר הנוכחי, נבחנה ההשפעה האפשרית של תרחישים שונים על יצרנות החיטה. הניתוח בשלב זה מוגבל לשינויים ביחס לעונה המדודה ובהתאם לכך המסקנות. בנוסף, הניתוח התבצע בפירוט עיתי של יום וללא חישוב רכיב הנגר העילי (הדורש הרצות בפירוט עיתי גבוה משמעותו משך זמן ארוך בהרבה) זאת לאחר שעבור העונה המדודה ואזור המחקר שנותחו במחקר זה, לא נמצא כי יצירת נגר עילי משמעותית בהקשר ליצרנות החיטה (ממצא זה כמובן יכול להשתנות במקרה הכללי).

השפעת שינויי האקלים נבחנה במספר אופנים. בשלב ראשון בדקנו שינוי של גשם וטמפרטורה בנפרד, כאשר לכל מקרה בדקנו הן את ההשפעה הכוללת באזור המחקר והן את השונות המרחבית של השפעה זו עבור מקרים נבחרים. בשלב השני בדקנו שילוב של שינוי טמפרטורה, גשם, ימי גשם ועונתיות על יצרנות החיטה.

6.6.1 השפעת שינוי בכמויות גשם כוללות.

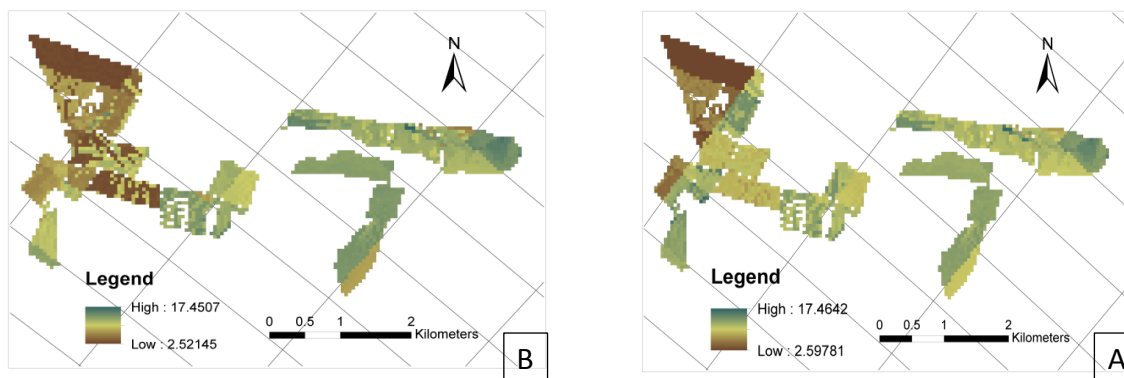
נבחנה השפעת תרחישים המתארים תוספת או הפחתה של כמויות הגשם, עד 30% שינוי מהכמות הכוללת בשנת המחקר (2010/11), כאשר השינוי מתבטא בהכפלת הגשם בפקטור קבוע בזמן ובמרחב. איור 8 מציג את הביומסה (A) ויבול הגרעינים (B) עבור שינויי הגשם בתחום של בין 30%- לבין 30%+, כאשר הקו האדום מציג את הערך הממוצע לאזור המחקר והתחום האפור את תחום ההשתרעות של הערכים עבור התאים שבאזור המחקר.

נמצא כי לכמות הביומסה המקסימלית לעונה, הממוצעת לשטח המחקר, תלות ליניארית חיובית בשינוי של כמות הגשם, כאשר בממוצע לכל אחוז אחד הפחתה של גשם הביומסה קטנה ב- 21.9 גר' למ"ר. הירידה בכמות הביומסה מאוד משמעותית ומגיעה לחצי מהכמות ההתחלתית בהפחתה של כ-25% מכמות הגשם הממוצעת. ביחס לעונה 2010-2011 מדובר בירידה של כ- 600 גרם למ"ר בביומסה המקסימלית. תרחיש בעל הסתברות נמוכה יותר, של עליה בכמות הגשם הממוצעת, מראה לפי הניתוח לעיל עלייה בייצור הביומסה מלווה בהתמתנות מסוימת של שיפוע הגרף של הביומסה הממוצעת ובאופן ברור יותר התמתנות של ערכי המקסימום בשדה. התמתנות זאת מצביעה על תופעה של סף קיבולת הקרקע לאגירת מים מעל כמות גשם מסוימת, כאשר סף זה תלוי במאפייני הקרקע, ובנוסף, יתכנו גורמים מגבילים אחרים התלויים בדשן, זן, מחלות ועוד. השינוי ביבול הגרעינים מראה מגמה דומה של הפחתה ליניארית בקצב ממוצע של הפחתה של 6.7 גר' למ"ר לכל הפחתה של אחוז אחד של גשם כאשר גם במקרה זה עליית כמות הגשם מביאה לעליה ביבול הגרעינים בשיפוע הולך ומתמתן. השינוי ביבול מאוד משמעותי ומגיע לחצי מהכמות ההתחלתית בהפחתה של כ- 30% מכמות הגשמים. זאת כאשר מדובר בהפחתה של כ- 240 גר' למ"ר ביבול בהשוואה לעונת הייחוס.



איור 8: שינוי בביומסה (A) וביבול הגרעינים (B) כתוצאה משינוי אחיד בגשם בתחום של -30% ועד +30%. הקו האדום מייצג את הממוצע והתחום האפור את המינימום והמקסימום על פני התאים השונים באזור המחקר.

כאמור לעיל, התגובה לשינוי אינה אחידה בשדה. הפירוס המרחבי של השינוי בביומסה (A) וביבול הגרעינים (B) מוצג באיור 9 כדוגמה עבור הקטנת משקעים של 5%. השינוי הממוצע לאזור המחקר הוא של 10% (כ- 130 גר' למ"ר) בביומסה ושל 8.8% (כ- 45 גר' למ"ר) ביבול הגרעינים ביחס לעונה הנבחרת. ניתן לראות בברור את ההשפעה של השינוי המרחבי בכמות הגשם הכוללת בין תאי מכ"ם (המסומנים בקווים אפורים ברקע של איור 9), כאשר גרדיאנט הגשם צפון-מערב לדרום-מזרח קובע במידה רבה את השינוי הן בביומסה והן ביבול הגרעינים, עם קורלציה של 0.91 ו- 0.88 בין כמות הגשם הכוללת לביומסה וליבול הגרעינים, בהתאמה.



איור 9: מידת ההפחתה באחוזים בביומסה (A) וביבול הגרעינים (B) בתגובה להפחתה אחידה של 5% בכמויות המשקעים. קוי גריד אפורים מייצגים את תאי המכ"ם באזור המחקר.

מעבר להשפעת הגשם, השונות המרחבית של השינוי יכולה להיות קשורה בשינויים של מאפייני הקרקע, הטופוגרפיה, הגידול והטיפול החקלאי. בדקנו את הרגישות של הביומסה ויבול הגרעינים למאפיינים השונים ללא שינוי בגשם לעומת

הרגישות למאפיינים אלו כאשר כמויות הגשם קטנות ב- 5%. הניתוח התבצע על אחד מתאי המודל כאשר הגשם נלקח מתא המכ"ם שבמרכז השדה. אינדקס הרגישות הלוקלי S1 מוגדר על ידי היחס בין אחוז השינוי בבידול או ביבול הגרעיניים לאחוז השינוי של פרמטר נתון (ללא שינוי בפרמטרים האחרים), כאשר החישוב התבצע ל- 5% שינוי בערך הפרמטר. התוצאות מוצגות בטבלה הבאה:

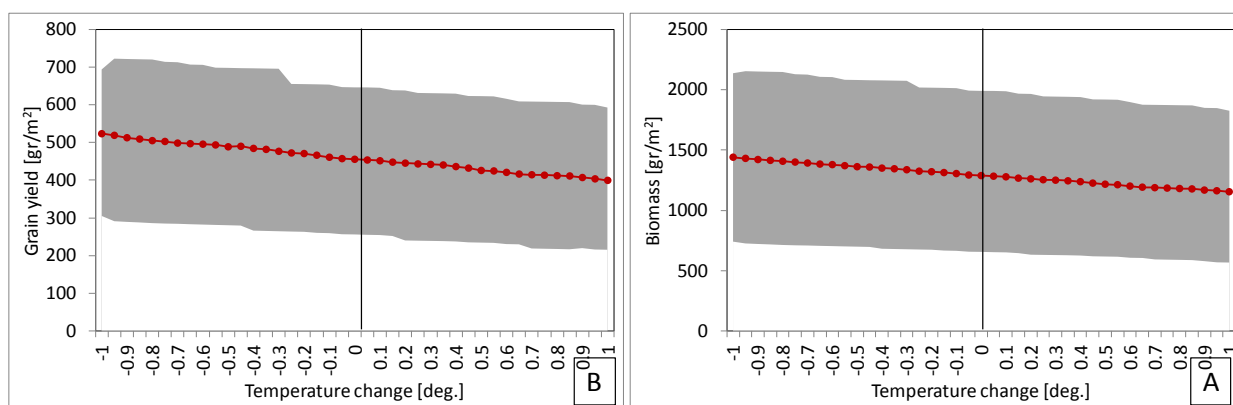
טבלה 3: רגישות הבידול ויבול הגרעיניים לפרמטרים במודל בהקטנת כמויות הגשם ב- 5%

פרמטר	ללא שינוי		הקטנת כמויות גשם ב- 5%	
	S1 בידול גרעיניים	S1 בידול גרעיניים	S1 בידול גרעיניים	S1 בידול גרעיניים
θ_r	0.22	0.22	0.46	0.40
θ_s	3.07	1.85	3.40	2.64
α	0.17	0.17	0.43	0.42
n	3.97	2.72	4.71	3.22
Ks	0.21	0.21	0.48	0.42
L	0.06	0.06	0.08	0.08
$\theta_{initial}$	0.30	0.30	0.53	0.44
Initial crop height	0.16	0.16	0.44	0.42
Initial albedo	0.31	0.31	0.57	0.43
POP	0.06	0.06	0.32	0.43
Wilting point	3.23	2.01	3.72	2.98
Field capacity	0.86	0.86	0.71	0.43
Radiation factor	0.77	0.77	0.52	1.15

כפי שניתן לראות, אינדקס הרגישות לכל הפרמטרים עלה עם הירידה בכמויות הגשם. בנוסף, הן הבידול והן יבול הגרעיניים רגישים ביותר לחלק מהפרמטרים הקובעים את זמינות המים בקרקע ובפרט לפרמטר n (המאפיין את עקום התאחיזה של המים בקרקע), לנקודת הכמישה ולתכולת המים ברוויה, כאשר לבידול רגישות גבוהה יותר לפרמטרים אלו מזו של יבול הגרעיניים.

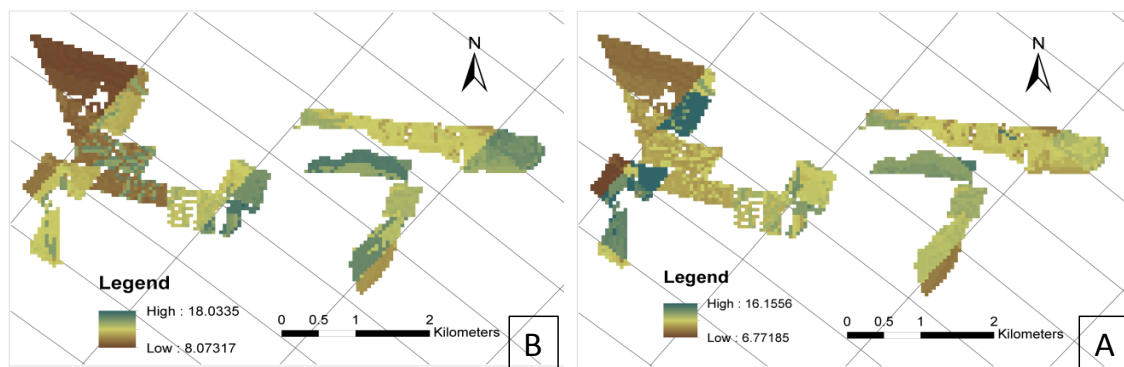
6.6.2 השפעת שינויי טמפרטורה.

נבחנו השפעת תרחישים המתארים עליה וירידה של הטמפרטורה של עד 1°C , כאשר השינוי התבטא בתוספת או הפחתה קבועה הן מטמפרטורת המינימום והן מטמפרטורת המקסימום, המהוות קלט למודל. איור 10 מציג את התגובה הממוצעת (קו אדום) ואת תחום השתרעות השינוי (תחום אפור) של הבידול (A) ויבול הגרעיניים (B) בתגובה לשינוי בטמפרטורה. התגובה הממוצעת היא של -143 גר' למ"ר בידול גרעיניים ו-61.8 גר' למ"ר יבול גרעיניים למעלת צלזיוס. עליית טמפרטורה באה לידי ביטוי במודל בהגברת ההתאדות וזירוז שלבי הגידול וכתוצאה מכך בהתקצרות העונה. לפי כך העלייה בטמפרטורה מורידה את פוטנציאל היצרנות של החיטה. ישנו קשר לינארי בירידה של יבול הבידול כתלות בעליית הטמפרטורה עד להבדל של כ- 10.5% בירידה של מעלה אחת, שהם שווים ל- 150 גר' למ"ר ביחס לעונת הנבדקת. בתסריט פחות סביר של ירידה בטמפרטורה המודל חזה עלייה לינארית ביבול. השינוי ביבול הגרעיניים גם מראה קשר לינארי עם ירידה של כ- 12% בעליה של מעלה, שהם שווים ל- 56 גר' למ"ר ביחס לנתוני העונה הנבדקת.



איור 10: כמו איור 1 רק עבור שינוי אחד בטמפרטורה בתחום של -1° עד $+1^\circ$.

השונויות המרחביות של התגובה לעליה במעלה אחת מוצגת באיור 11. כמו באיור 9 לעיל, גם פה ניכרת ההשפעה העיקרית של כמות הגשם המשתנה בין תאי המכ"ם, כאשר הקורלציה בין כמות הגשם הכוללת לבין הביומסה ויבול הגרעינים היא 0.90 ו-0.88, בהתאמה. חישוב אינדקס הרגישות מוצג בטבלה 4 עבור מצב של עליית הטמפרטורה במעלה אחת (אינדקס הרגישות ללא שינוי מוצג בטבלה 3 לעיל). ניתן לראות מגמות דומות עם רגישות גבוהה לשלושת הפרמטרים המוזכרים לעיל כאשר הרגישות אליהם עולה עם עליית הטמפרטורה. עבור הפרמטרים להם הרגישות נמוכה יותר, רואים בחלק מהמקרים הקטנה מסוימת של הרגישות עם עליית הטמפרטורה.



איור 11: כמו איור 2 רק עבור העלאת הטמפרטורה ב-1°.

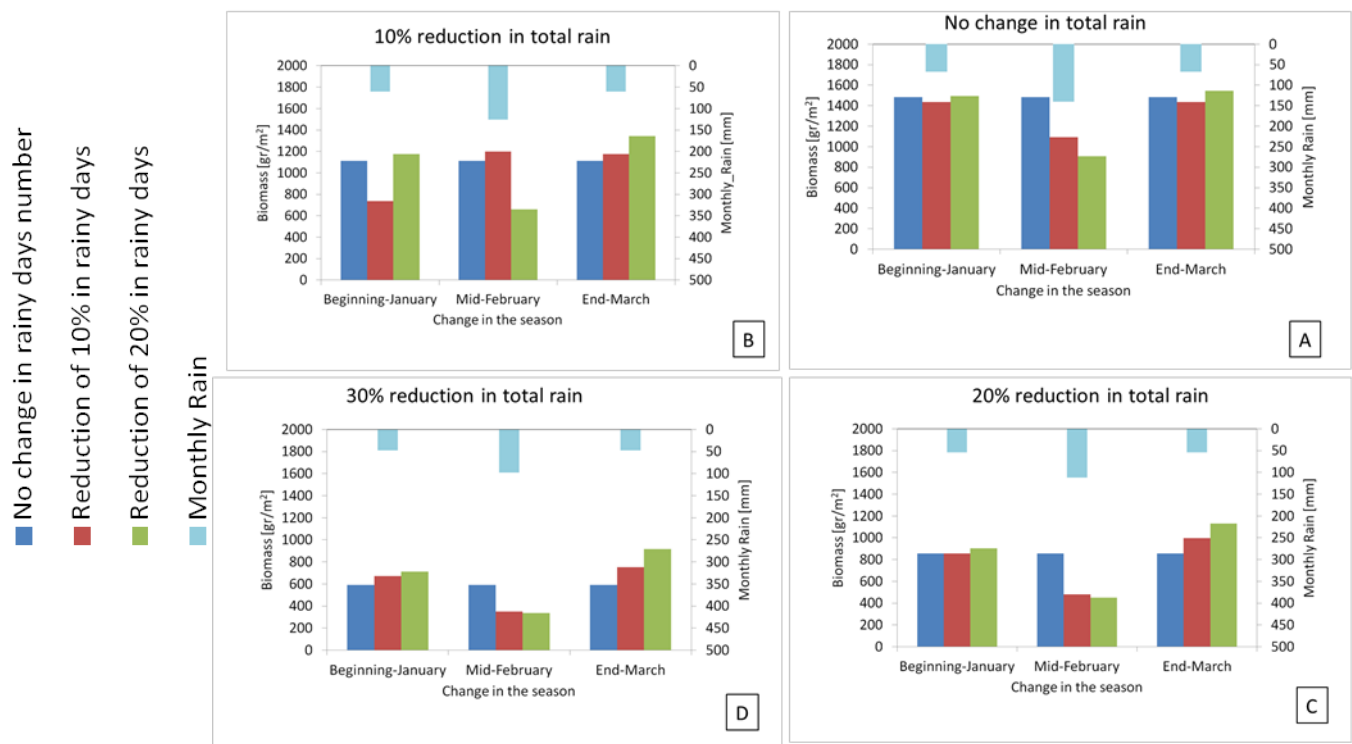
טבלה 4: רגישות הביומסה ויבול הגרעינים לפרמטרים במודל בהגדלת הטמפרטורה ב-1°.

הגדלת הטמפרטורה ב-1°		
פרמטר	S1 ביומסה	S1 יבול גרעינים
θ_r	0.20	0.20
θ_s	3.45	2.18
α	0.16	0.16
n	4.67	3.37
K_s	0.19	0.19
L	0.06	0.06
θ initial	0.23	0.23
Initial crop height	0.16	0.16
Initial albedo	0.24	0.24
POP	0.03	0.03
Wilting point	3.71	2.44
Field capacity	1.48	0.51
Radiation factor	0.81	0.81

6.6.3 השפעת שינויים בחלוקת הגשם במהלך העונה.

בנוסף לשינויים אפשריים בכמויות הגשם הכוללות, ישנם מחקרים שמצביעים על שינויים בחלוקת הגשם במהלך העונה, תוך התגברות אפשרית של אירועים קיצוניים והגדלת המרווחים בין אירועי הגשם וכן שינויים בתחילת וסוף עונת הגשמים. במסגרת המחקר הנוכחי בחנו השפעה של הקטנת כמויות הגשם עד ל-30% תוך הקטנת מספר ימי הגשם עד 20% כאשר מיקום השינוי ביחס לעונה המדודה, שהשתרעה על התקופה מה-1 בדצמבר 2010 עד סוף יולי 2011, נלקח בתחילת עונת הגשם (תחילת ינואר), אמצע עונת הגשם (אמצע פברואר) וסוף עונת הגשם (סוף מרץ). הניתוח התבצע על אחד מתאי המודל כאשר הגשם נלקח מתא המכ"ם שבמרכז השדה.

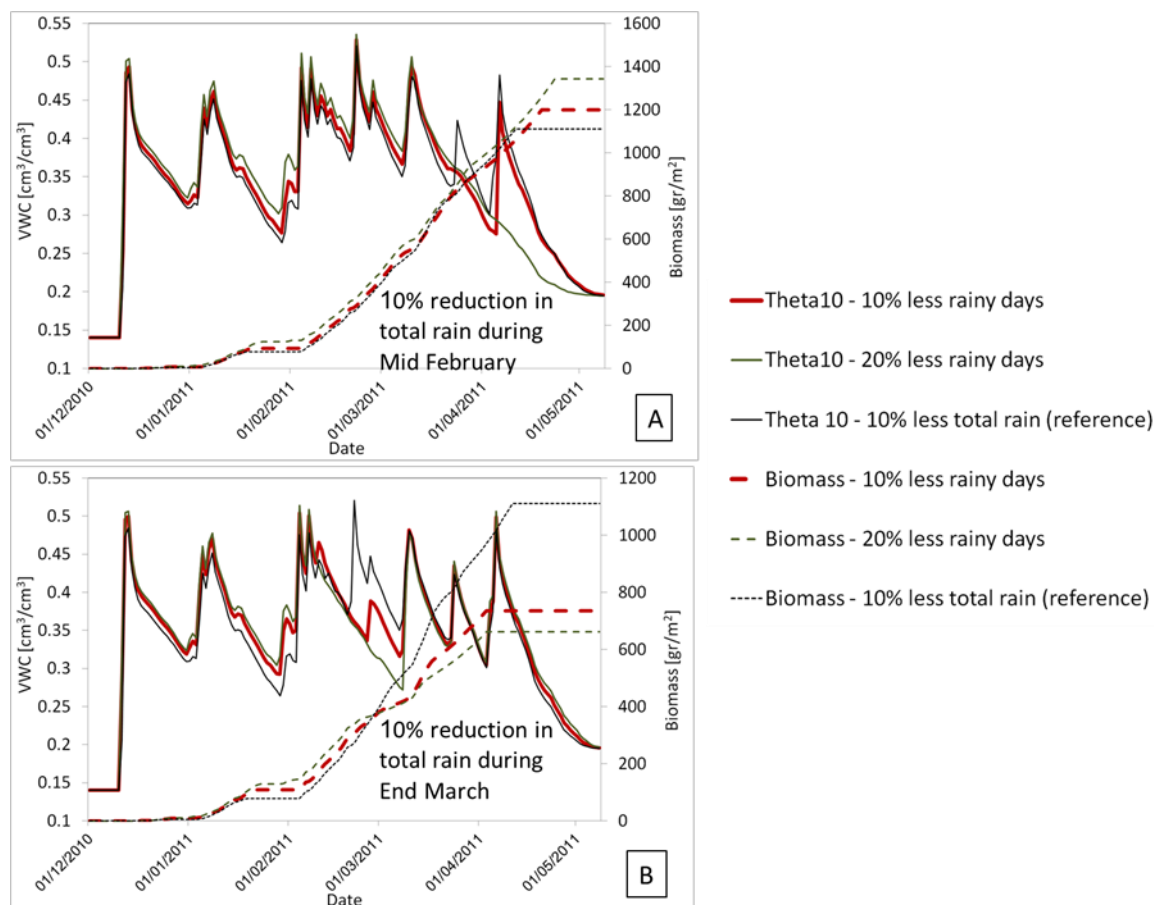
איור 12 מציג את התוצאות עבור הביומסה (הניתוח עבור יבול הגרעינים מראה תוצאות דומות ולכן לא מוצג). הממצאים מצביעים על כך שבנוסף להקטנת כמות הגשם הכוללת, לה כמובן יש חשיבות גדולה כפי שהוצג לעיל, הקטנת מספר ימי הגשם ושינוי המיקום בעונה בה ימים אלו חסרים יכולים להביא לשינוי של עשרות אחוזים בביומסה ויבול הגרעינים. ניתן לראות כי שינויים באמצע עונת הגידול הם המשמעותיים ביותר, כאשר באופן כללי ככל שהגשם מתחלק על פחות ימים היצרנות קטנה יותר. לעומת זאת לשינויים בסוף העונה השפעה קטנה יותר ובנוסף חלוקת הגשם על מספר קטן יותר של ימים בדרך כלל מגדילה את היצרנות.



איור 12: ביומסה עבור שינויים בכמויות הגשמים: (A) ללא שינוי, (B) הקטנה של 10%, (C) הקטנה של 20%, ו- (D) הקטנה של 30%, כאשר לכל רמת שינוי בכמות הכוללת השתנה מספר ימי הגשם: כחול – ללא שינוי, אדום – הקטנה של 10% במספר ימי הגשם, וירוק – הקטנה של 20% במספר ימי הגשם. השינוי בימי הגשם התבצע בשלושה זמנים שונים בעונת הגשם: תחילת ינואר, אמצע פברואר וסוף מרץ. העמודות בחלק העליון של כל גרף מייצגות את כמות הגשם החודשית.

כדי להבין טוב יותר תופעה זו, בחנו (איור 13) את תכולת המים הנפחית בחלק העליון של הקרקע ואת הביומסה לאורך העונה עבור הפחתה של 10%-ו-20% מהמים, כאשר ההפחתה מתבצעת באמצע העונה (A6) ובסוף העונה (B6). בשני המקרים הגשם הופחת ב-10% בכמותו הכוללת. יש לזכור שכאשר הגשם מתחלק על מעט יותר ימים כמות הגשם בכל יום גשום גדולה יותר. ניתן לראות באיור A6 שכתוצאה מכך הן תכולת המים הנפחית והן הביומסה מעט גבוהות יותר במקרה של הפחתה של 20% מהמים לעומת 10% מהמים, עד לזמן באמצע פברואר בו ישנם יותר ימי גשם בהרצה של הפחתה של 10% מימי הגשם לעומת ההרצה השנייה (הפחתה של 20% מימי הגשם). ימי גשם אלו גורמים לגידול הן בלחות הקרקע והן בביומסה בהרצה של 10% הפחתה, ויתרון זה נשמר עד סוף העונה. לעומת זאת באיור B6 ניתן לראות כי הסופה בסוף העונה, שתורמת להרצה של הפחתה ב-10% בימי הגשם אבל לא להרצה של הפחתה ב-20% מימי הגשם, מביאה אמנם לגידול בלחות הקרקע אולם לא לגידול מקביל בביומסה וכך היתרון הראשוני של ההרצה עם 20% הפחתה בימי הגשם (הנובע מכך שבכל יום יורד יותר גשם) נשמר עד הסוף.

יש להדגיש כי יש להמשיך בניתוחים הללו כדי לבדוק את מידת כלליותם מכיוון שבשלב זה הבדיקה נעשתה על סמך רקורד של עונה אחת בלבד ועבור אזור המחקר. אולם הניתוח לעיל ממחיש את החשיבות הגדולה של חלוקת הגשם בעונה הן מבחינת מספר ימי הגשם והן מבחינת מיקומם בעונה.



איור 13: שינוי במהלך העונה של תכולת המים הנפחית ב-10 הס"מ העליונים של הקרקע (קו רציף) ובביומסה (קו מקווקו), בתסריטים של הקטנה ב-10% בכמות הגשם הכוללת כאשר ההפחתה מתקבלת באופן אחיד על פני כל ימי הגשם ללא שינוי במספרם (אפור) ובנוסף על ידי הקטנת מספר ימי הגשם ב-10% (אדום) ו-20% (ירוק), אשר מתרחשת פעם באמצע העונה (A) ופעם בסוף העונה (B).

7. סיכום, מסקנות והמלצות להמשך

במחקר זה פותח מודל לחיזוי יצרנות של חיטה ברזולוציה מרחבית ועיתית גבוהה. ייחודו של מודל זה הוא בשילוב של בסיס הידרולוגי חזק הכולל את התוכנה Hydrus-1D, מידול הסעת נגר ותפרושת גשם לפי מכ"מ עם בסיס נתונים מרחבי בממ"ג ומודל צומח. שילוב זה מאפשר למודל לדמות מערכת מורכבת הכוללת מים, צומח וסביבה חקלאית. באמצעות המודל נערכה בחינה של יכולת השפעת הגורמים המרחביים ושינויי אקלים על החיטה.

מסקנות שעולות לגבי טיב המודל לפי מדדי האימות:

1. דיוק המודל בחיזוי היצרנות ותכולת הרטיבות טוב למדי לאורך כל העונות שנבחנו.
2. המודל הצליח לחזות בצורה מובהקת במרבית תאריכי דיגום חלק מסוים מהשונות המרחבית (25%-85%). חיזוי זה נחשב לסביר במיוחד לאור העובדה כי רעשים שונים, כמו השונות בתוך יחידת התא או החלקה, ממסכים את השונות הניתנת לחיזוי לפי ממוצע דיגום נקודתי.
3. תוצאות האימות למודל לא מכויל בשתי עונות גידול מעידות על יכולתו לתאר תהליכים מורכבים בצורה נכונה ומספיק גנרית כך שלא יהיו מותאמים רק לתנאים וזמנים מסוימים.
4. מסקנות העולות לגבי השפעתם של גורמים מרחביים: שילוב השונות המרחבית של הגורמים הבאים: מרקם הקרקע, תפרושת גשם לפי מכ"מ, עיבוד הקרקע, נגר, קרינה וסוגי זנים הביא לשיפור בחיזוי ובכך ניתן גם להסיק על השפעתם המשולבת של גורמים אלו על תכולת הרטיבות והיצרנות הראשונית.
5. מבחינת כל גורם בנפרד, הגורמים המשפיעים ביותר על היצרנות במרחב קשורים ישירות לזמינות המים: מרקם הקרקע הוא הגורם הדומיננטי ביותר, השפעת תפרושת הגשם משמעותית במיוחד על הביומסה ועיבוד הקרקע משפיע בעיקר על

תכולת הרטיבות בתחילת עונת הגידול. השפעתם של שאר הגורמים קטנה יותר ולכן אינה מורגשת ונבלעת בגורמים הדומיננטיים.

6. היצרנות רגישה ביותר לחלק מהפרמטרים של המודל הקובעים את זמינות המים ובעיקר לפרמטר α (המאפיין את עקום התאחיזה של המים בקרקע), לנקודת הכמיסה ולתכולת המים ברוויה, כאשר לביומסה רגישות גבוהה יותר לפרמטרים אלו מזו של יבול הגרעינים.

מסקנות עיקריות העולות לגבי השפעת שינויי אקלים על פי הרצת תרחישים על עונה אחת:

7. היצרנות בשדות חיטה (ביומסה וגרעינים) רגישה ביותר לשינויים בטמפרטורה וכמות הגשם היומית הממוצעת.

8. עלייה בטמפרטורה וירידה בכמויות הגשם גורמת ליצרנות החיטה להיות רגישה יותר לפרמטרים במודל הקובעים את זמינות המים בעיקר פרמטר α , נקודת כמיסה ותכולת רטיבות ברוויה.

9. לגראדיינט האזורי בכמויות הגשם, המאפיין את אזור המחקר ומיוצג באמצעות נתוני המכ"מ, חשיבות רבה בקביעת הרגישות לשינויי אקלים. כאשר אזורים גשומים יותר פחות פגיעים לשינויים.

10. הפחתה של מספר ימי הגשם בעונה תוך כדי גידול העוצמות באירועים בודדים יכולה להביא לשינוי של עשרות אחוזים בביומסה ויבול הגרעינים. שינוי זה הוא תלוי זמן לאורך העונה: כאשר מספר ימי הגשם פוחתים באמצע העונה ישנה ירידה ניכרת ביצרנות. לעומת זאת כאשר ההפחתה מתרחשת בתחילת העונה אין השפעה על היצרנות ויתרה מכך עוצמות גשם גבוהות יותר עם הפחתה בימי הגשם בסוף העונה גורמים לתופעה של עליה ביבול.

המשמעות הכוללת של מחקר זה היא מתן אפשרות לבחינה ולימוד מעמיק של גורמי מפתח המשפיעים על הייצור במרחב ועל הרגישות לשינויי אקלים. המשמעות היישומית היא בניצול ידע זה לצורך קבלת החלטות תכנוניות וכלכליות עתידיות המתואמות לתנאים המשתנים. מחקר זה מראה כי ההשפעה העיקרית על היצרנות בשדות חיטה ועל הרגישות לשינויי אקלים קשורה בעיקר בגורמים הקובעים את זמינות המים בקרקע. לכן הפגיעה העיקרית כתוצאה משינויים יחסית קטנים בטמפרטורה ובגשם תהיה בשטחים המאופיינים בכמויות גשם קטנות יותר באזור המחקר. ייתכן ובשטחים אלו כדאי לאמץ עיבוד של אי פליחה עם חיפוי קש אשר לפי התוצאות הראה סימנים על שמירת הלחות בתחילת העונה, אם כי לא באופן מובהק ביותר. למרות העבודה היסודית שנעשתה בפיתוח המודל, יש מקום לשיפורים. המודל נמצא טוב בבסיסו התיאורטי והתהליכי אך עדיין מומלץ להמשיך בעבודה למען הגעה לדיוק רב יותר ובחינה מעמיקה יותר של השפעות שינויי אקלים על החיטה.

המשך העבודה המומלץ:

1. אימות המודל לעונות נוספות ותנאים שונים, לבחינת מידת כלליותו.
2. בחינת שינויי אקלים לסדרות זמן ארוכות.
3. בחינת תרחישי אקלים מורכבים יותר הכוללים שילוב גורמים.
4. תיאור יותר מעמיק של עיבוד הקרקע במודל ובחינה מחודשת של ההשפעות על היצרנות.
5. ייתכן ומידול קרום קרקע ישפר את החיזוי של תכולת הרטיבות וזמינות המים.
6. הגדלת רזולוציית נתוני הגשם (למשל באמצעות מכ"ם מסוג X-band) ומתן אפשרות לבחינת שונות תוך שדות.

8. מקורות

1. Rustad, L. E. 2008. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: towards an integrated approach. *Science of the Total Environment* 404(2-3), 222-235.
2. Moldenhauer, O., and M. K. B. Lüdeke. Climate sensitivity of global terrestrial net primary production (NPP) calculated using the reduced-form model NNN. *Climate Research* 21:43-57.

3. Lemmens, C., H. J. D. Boeck, B. Gielen, H. Bossuyt, S. Malchair, M. Carnol, R. Merckx, I. Nijs, and R. Ceulemans. 2006. End-of-season effects of elevated temperature on ecophysiological processes of grassland species at different species richness levels. *Environmental and experimental botany* 56(3), 245-254.
4. Tan, G.X., Shibasaki, R., 2003. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling* 168, 357-370.
5. Liu, J. G. 2009. A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations. *Environmental Modelling & Software* 24:411-422.
6. Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L., 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* 319 (5863), 607–610.
7. de Wit, A.J.W., van Diepen, C.A., 2008. Crop growth modelling and crop yield forecasting using satellite-derived meteorological inputs. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 10 (4), 414–425.
8. Ben-Gai, T., A. Bitan, A. Manes, P. Alpert, and S. Rubin. 1998. Spatial and temporal changes in rainfall frequency distribution patterns in Israel. *Theoret. and Applied Clima.* 61, 177-190.
9. Svoray, T., R. Shafran-Nathan, Z. Henkin, and A. Perevolotsky. 2008. Spatially and temporally explicit modeling of conditions for primary production of annuals in dry environments. *Ecological Modelling* 218:339-353.
10. Wesseling and Feddes, 2006 J.G. Wesseling and R.A. Feddes, Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agric. Water Manage.* **86** (2006), pp. 30–39.
11. Amir, J. and T. R. Sinclair. 1991a. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28:47-58.
- 12 van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J* 1980;44:892–8.
13. Simunek, J., M. Sejna, and M. T. van Genuchten (2005), The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably- Saturated Media, University of California-Riverside Research Reports, 240.
14. Sinclair, 1998 T.R. Sinclair, Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation, *Crop Sci.* **38** (1998), pp. 638–643

9. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
פיתוח מודל מפורש בזמן ובמרחב לחיזוי יצרנות ראשונית בשדות חיטה.
בחינת הרגישות של החיטה לגורמים שונים במרחב.
בחינת תרחישי שינויי אקלים והשפעתם על יצרנות החיטה
עיקרי הניסויים והתוצאות.
המודל אומת מול נתוני דיגום קרקע וחיישנים ונמצא כי הוא חוזה טוב את תכולת הרטיבות והתפתחות הצומח לאורך העונה.
נמצא כי יצרנות החיטה רגישה ביותר לשינויים בטמפרטורה ובגשם.
הרגישות לשינויי אקלים באזור המחקר מושפעת ביותר מהגורמים הקובעים את זמינות המים.
הפחתה בימי הגשם בשלבים שונים בעונה יכולה להביא לשינוי של עשרות אחוזים ביצרנות.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
במהלך תקופת הדו"ח הושגה המטרה של פיתח מודל המתאים לחיזוי יצרנות חיטה. ולאחר מכן נעשה שימוש במודל לבחינת שינויי אקלים. מטרות המחקר הושגו עם מסקנות מדעיות עיקריות: 1. הפגיעה ביצרנות החיטה כתוצאה משינויי אקלים צפויה להיות משמעותית ביותר בתרחישים של שינוי בכמויות גשם, טמפרטורה וימי גשם. 2. האזורים היותר פגיעים לשינויי אקלים באזור המחקר הם האזורים המאופיינים בפחות גשם.
בעיות שונות לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר לגביהן
המודל נמצא בעל יכולת טובה לחזות את היצרנות הראשונית, אולם לצורך הגדלת הדיוק ובחינה מידת כלליותו רצוי בהמשך המחקר לבחון ולאמת עונות גידול נוספות באזורים שונים.
בחינת השפעת שינויי אקלים ממחישה את השינויים הצפויים ביצרנות החיטה, אולם לצורך מסקנות יותר מבוססות יש להמשיך ולבחון תרחישים בתנאי סביבה שונים ולאורך תקופות זמן ארוכות יותר.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב – <u>ציטט</u> ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; פוטנטים – יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון – יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.
עדיין לא פורסם
פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)
➤ ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)