

משרד החקלאות - דו"ח לתוכניות מחקר
לקרן המדען הראשי

קוד ויהוי	493-0006-14	א. נושא המחקר (בעברית) שיפור ניהול חקלאי בר-קיימא באמצעות נתוני משקעים ברזולוציה גבוהה ממערכת מיקרו מכ"ם מטאורולוגי
-----------	-------------	--

ג. כללי			
מוסד מחקר של החוקר הראשי			
האוניברסיטה העברית בירושלים			
טוג הדו"ח		תאריכים	
מסכם	תקופת המחקר		
	עבודה מוגשת הדו"ח		
	התחלה	סיום	
	שנה חודש	שנה חודש	שנה חודש
	3/2012	8/2015	9/2015

ב. צוות החוקרים		
שם פרטי	שם משפחה	
אפרת	מורין	חוקר ראשי
חוקרים משניים		
דוד	בונפיל	1
		2
		3
		4
		5
		6
		7

ד. מקורות מימון עבורם מיועד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
מחקרי איטליה-ישראל לשכת המדען	02-7182	240,000

ה. תקציר שיט לב - על התקציר להיכתב בעברית לפי סעיף ה' שבהנחיות לכתובת דיווחים.

הצגת הבעיה: נתוני משקעים ברזולוציות זמן-מרחב גבוהה הם מידע חיוני לחקלאים באמצעותו יוכלו להנהל בצורה מיטבית את הגידולים החקלאיים. המחקר הנוכחי מתבסס על הערכת משקעים באמצעות מערכת כח"ש בגודל קטן יחסית בתחום ה-X-band, המוצבת באזור מחקר, בשילוב עם מדי גשם, ומאפשרת מדידת גשם ברזולוציה גבוהה ברדיוס של עד 30 קילומטר. מטרת המחקר: (1) פיתוח אב-טיפוס למערכת למדידת גשם ברזולוציה גבוהה, (2) פיתוח ויישום שיטות של חיזוי לטווח קצר, (3) יישום נתוני הגשם המדויקים והחזויים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח קצר ולטווח בינוני, (4) ניתוח התלות המרחבית של היבול במאפייני הגשם. שיטות העבודה: (1) התקנת מערכת המכ"ם, מדי גשם ומערכת מחשוב לקליטה ועיבוד בזמן אמת, (2) פיתוח ויישום אלגוריתמים פיזיקליים לתיקון שגיאות וכיוול באמצעות מדי גשם, (3) הערכת דיוק הנתונים באמצעות מדידים מקובלים, (4) פיתוח שיטה לחיזוי לטווח קצר על בסיס עקיבה אחר הסופה, (5) שימוש בנתוני הגשם לקבלת החלטות והשוואת היבול המתקבל לחלקות ביקורת, (5) שילוב עם נתוני חישה מרחוק של יבול חקלאי וניתוח סטטיסטי מרחבי. תוצאות ומסקנות עיקריות: עיקר המחקר הוקדש לנושא מדידת הגשם מהמכ"ם, הקמת מערכת המדידה והמחשוב, ופיתוח השיטות לתיקון שגיאות וכיוול הנתונים. פותח אב-טיפוס של המערכת. דיוק הנתונים שהתקבל היה מספק, אך יש להקפיד על מניעת תקלות וקליטה רציפה של הנתונים. יש עדיין לשפר חלק מהאלגוריתמים. הנתונים הזמינים בזמן אמת וברזולוציה גבוהה משפרים את יכולת החקלאים לנהל את המערכות שבאחריותם אך יש עוד להמשיך במחקר ליישום שיטות ספציפיות והערכה כמותית של השיפור המחקרי.

1. אישורים

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

מנהל הרשות למחקר ופיתוח

אמר כלות (רשות המחקר)
רשות המחקר

מנהל המכון
(פקולטה)

מנהל המחלקה

חוקר ראשי



Prof. Vered Vinitzky-Seroussi
Dean, Faculty of Social

שיפור ניהול חקלאי בר-קיימא באמצעות נתוני משקעים ברזולוציה גבוהה ממערכת מיקרו מכ"ם מטאורולוגי

Towards sustainable agricultural management using high-resolution X-band radar precipitation estimates

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות, ע"י

אפרת מורין המחלקה לגאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

דוד בונפיל מרכז מחקר גילת, מנהל המחקר החקלאי

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

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

תקציר

הצגת הבעיה: נתוני משקעים ברזולוציית זמן-מרחב גבוהה הם מידע חיוני לחקלאים באמצעותו יוכלו לנהל בצורה מיטבית את הגידולים החקלאיים. המחקר הנוכחי מתבסס על הערכת משקעים באמצעות מערכת מכ"ם בגודל קטן יחסית בתחום ה-X-band, המוצבת באזור מחקר, בשילוב עם מדי גשם, ומאפשרת מדידת גשם ברזולוציה גבוהה ברדיוס של עד 30 קילומטר. מטרות המחקר: (1) פיתוח אב-טיפוס למערכת למדידת גשם ברזולוציה גבוהה, (2) פיתוח ויישום שיטות של חיזוי לטווח קצר, (3) יישום נתוני הגשם המדודים והחזויים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח קצר ולטווח בינוני, (4) ניתוח התלות המרחבית של היבול במאפייני הגשם. שיטות העבודה: (1) התקנת מערכת המכ"ם, מדי גשם ומערכת מחשוב לקליטה ועיבוד בזמן אמת, (2) פיתוח ויישום אלגוריתמים פיזיקליים לתיקון שגיאות וכיול באמצעות מדי גשם, (3) הערכת דיוק הנתונים באמצעות מדדים מקובלים, (4) פיתוח שיטה לחיזוי לטווח קצר על בסיס עקיבה אחר הסופה, (4) שימוש בנתוני הגשם לקבלת החלטות והשוואת היבול המתקבל לחלקות ביקורת, (5) שילוב עם נתוני חישה מרחוק של יבול חקלאי וניתוח סטטיסטי מרחבי. תוצאות ומסקנות עיקריות: עיקר המחקר הוקדש לנושא מדידת הגשם מהמכ"ם, הקמת מערכת המדידה והמחשוב, ופיתוח השיטות לתיקון שגיאות וכיול הנתונים. פותח אב-טיפוס של המערכת. דיוק הנתונים שהתקבל היה מספק, אך יש להקפיד על מניעת תקלות וקליטה רציפה של הנתונים. יש עדיין לשפר חלק מהאלגוריתמים. הנתונים הזמינים בזמן אמת וברזולוציה גבוהה משפרים את יכולת החקלאים לניהל את המערכות שבאחריותם אך יש עוד להמשיך במחקר ליישום שיטות ספציפיות והערכה כמותית של השיפור המתקבל.

הצהרת החוקר הראשי:

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

תאריך: 16/9/2015



חתימת החוקר

רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר:

Marra F., Lokshin A., Notarpietro R., Gabella M., Branca M., Bonfil D.J., and Morin E. (2015) High resolution X-Band radar rainfall estimates for a Mediterranean to hyper-arid transition area, short paper for ICEAA 15, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 7-11 September 2015, Torino, Italy.

Marra F. and Morin E. (2015) Use of radar QPE for hydrological design in a range of climatic regimes: Intensity-Duration-Frequency curves. In press. J. Hydrol.

תוכן עניינים

תקציר.....	3
1. מבוא.....	3
2. מטרות המחקר.....	4
3. תוצאות המחקר.....	5
4. דיון ומסקנות.....	13
5. פרסומים מדעיים.....	14
6. רשימת ספרות.....	14

תקציר

הצגת הבעיה: נתוני משקעים ברזולוצית זמן-מרחב גבוהה הם מידע חיוני לחקלאים באמצעותו יוכלו לנהל בצורה מיטבית את הגידולים החקלאיים. המחקר הנוכחי מתבסס על הערכת משקעים באמצעות מערכת מכ"ם בגודל קטן יחסית בתחום ה-X-band, המוצבת באזור מחקר, בשילוב עם מדי גשם, ומאפשרת מדידת גשם ברזולוציה גבוהה ברדיוס של עד 30 קילומטר. **מטרות המחקר:** (1) פיתוח אב-טיפוס למערכת למדידת גשם ברזולוציה גבוהה, (2) פיתוח ויישום שיטות של חיזוי לטווח קצר, (3) יישום נתוני הגשם המדודים והחזויים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח קצר ולטווח בינוני, (4) ניתוח התלות המרחבית של היבול במאפייני הגשם. **שיטות העבודה:** (1) התקנת מערכת המכ"ם, מדי גשם ומערכת מחשוב לקליטה ועיבוד בזמן אמת, (2) פיתוח ויישום אלגוריתמים פיזיקליים לתיקון שגיאות וכיול באמצעות מדי גשם, (3) הערכת דיוק הנתונים באמצעות מדדים מקובלים, (4) פיתוח שיטה לחיזוי לטווח קצר על בסיס עקיבה אחר הסופה, (4) שימוש בנתוני הגשם לקבלת החלטות והשוואת היבול המתקבל לחלקות ביקורת, (5) שילוב עם נתוני חישה מרחוק של יבול חקלאי וניתוח סטטיסטי מרחבי. **תוצאות ומסקנות עיקריות:** עיקר המחקר הוקדש לנושא מדידת הגשם מהמכ"ם, הקמת מערכת המדידה והמחשוב, ופיתוח השיטות לתיקון שגיאות וכיול הנתונים. פותח אב-טיפוס של המערכת. דיוק הנתונים שהתקבל היה מספק, אך יש להקפיד על מניעת תקלות וקליטה רציפה של הנתונים. יש עדיין לשפר חלק מהאלגוריתמים. הנתונים הזמינים בזמן אמת וברזולוציה גבוהה משפרים את יכולת החקלאים לניהל את המערכות שבאחריותם אך יש עוד להמשיך במחקר ליישום שיטות ספציפיות והערכה כמותית של השיפור המתקבל.

1. מבוא

נתוני משקעים ברזולוצית זמן-מרחב גבוהה הם מידע חיוני לחקלאים באמצעותו יוכלו לנהל בצורה מיטבית את הגידולים החקלאיים. הנתונים יכולים לאפשר קבלת החלטות אגרוטכניות מידיות על פי המידע על מערכות הגשם הצפויות להגיע לשדות, להעריך את היבול ואיכותו בשדות השונים ובהתאם לכך לתכנן את הקציר, ולסייע בניתוח נכון של השונות המרחבית כפי שמתבטאת במפות היבול (לדוגמה, Bonfil et al., 2004; Basso et al., 2010; Har-Gil et al., 2011).

נתוני גשם מתקבלים באופן סטנדרטי מרשת מדי גשם, אולם אחד הקשיים העיקריים בשימוש בנתונים אלו לצרכים חקלאיים הוא המרחק הגדול יחסית בין נקודות המדידה והחוסר במידע על שטחים גדולים בין נקודות המדידה (לדוגמה, (Krajewski et al., 2003). באזורים מדבריים וחצי מדבריים בעיה זו מחריפה בהרבה מכיוון שהגשם מתאפיין בשטח כיסוי קטן במיוחד ושונות מרחבית גדולה (לדוגמה, (Sharon, 1972; Karklinsky and Morin, 2006). בעשורים האחרונים מתפתחות מערכות למדידת גשם המבוססות על טכנולוגיית חישה מרחוק, ובפרט מערכות מכ"ם מטאורולוגי. מערכת המכ"ם המטאורולוגי משדרת וקולטת קרינה אלקטרומגנטית המוחזרת מטיפות גשם בעננים. את עצמת הקרינה המוחזרת ניתן לתרגם לעצמת גשם בשיטות שונות (Krajewski and Smith, 2007; Morin and Gabella, 2002) אשר בדרך כלל נעזרות גם בנתונים ממדי גשם המשמשים לכיול המכ"ם. לעיתים, למערכות המכ"ם מתווספות טכנולוגיות משופרות כגון מערכת דופלר או שידור/קליטה בשני קיטובים התורמות לדיוק המדידות המתקבלות. מערכת מכ"ם מטאורולוגי אזורית (בתחום אורכי גל של C-band ו-S-band) מאפשרת קבלת נתוני עצמות גשם בזמן אמת ברזולוציה אופיינית של 5 דקות בזמן ו-1 קמ"ר במרחב ולרדיוס אופייני של 150 קילומטר. השגיאה בהערכות הגשם מהמכ"ם גדלה עם המרחק מהמכ"ם וכן בהשפעת טופוגרפיה הגורמת הן להפרעות והן להסתרות של אזורים מסוימים (Krajewski et al., 2010).

מכ"ם מטאורולוגי מסוג X-band פועל באורכי גל קצרים יותר לעומת המכ"מים האזוריים, הוא מתאפיין בהספק נמוך יותר ואנטנה קטנה יותר מה שמאפשר תפעול פשוט יותר של המכ"ם. רדיוס הכיסוי שלו גם כן קטן יותר, סדר גודל של 30 קילומטר, ולכן מתייחסים אליו פעמים רבות כאל מכ"ם לוקלי (לעומת האזורי). בשנים האחרונות מוקמות מערכות מכ"ם מסוג X-band באתרים שונים הנמצאים תחת כיסוי של מכ"מים אזוריים לקבלת נתונים ברזולוציה ובאיכות גבוהות יותר מאלו של המכ"ם האזורי (Turso et al., 2013).

במסגרת המחקר הנוכחי אנו בוחנים יישום של מערכת מכ"ם מסוג X-band בשילוב מדי גשם בקבלת החלטות הנוגעות לניהול המערכת החקלאית לטווחים הקצר, הבינוני והארוך באזורי מחקר בישראל ובאיטליה. אנו מאמינים כי מחקר זה ייתן לחקלאים כלים לניהול בר-קיימא של המערכות החקלאיות שבאחריותם בדגש על שימוש מיטבי במשאבים והקטנת זיהומים תוך שיפור יבול ואיכות חיטה. יתרה מזאת, ניתן יהיה בעלות נמוכה יחסית להקים באזורים חקלאיים נוספים מערכות מהסוג המוצע במחקר זה וליישם שיטות שיפוחו בו.

2. מטרות המחקר

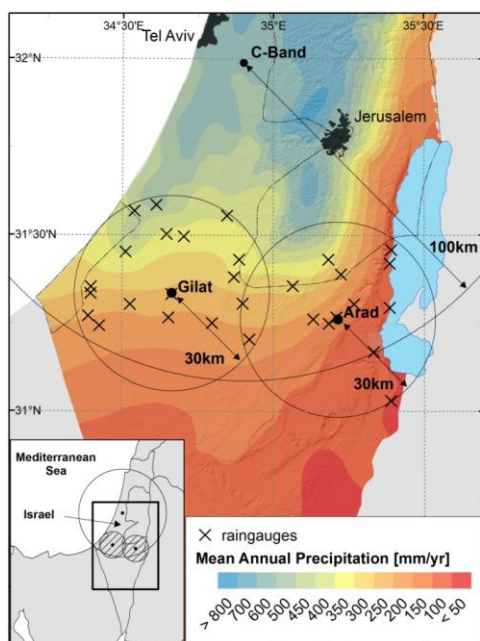
- (1) פיתוח אב-טיפוס למערכת למדידת גשם ברזולוציה גבוהה המבוססת על מכ"ם X-band לוקלי המוצב באזור המחקר ורשת מדי גשם והפעלתו בשני אזורי מחקר בישראל ואיטליה.
- (2) פיתוח ויישום שיטות של חיזוי לטווח קצר (Nowcasting) לקבלת מפות גשם חזויות בטווח זמן של עשרות דקות.

- (3) יישום נתוני הגשם המדודים והחזויים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח קצר ליישום דשנים, קוטלי עשבים וקוטלי פטריות על בסיס הפירוס המרחבי של הגשם.
- (4) יישום נתוני הגשם המדודים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח בינוני הקשורות לאיכות וכמות היבול.
- (5) שילוב נתוני הגשם המדודים ברזולוציה הגבוהה עם נתוני חישה מרחוק של משתנים חקלאיים על מנת ללמוד את התלות המרחבית של יבול הגידולים החקלאיים במאפייני הגשם.

3. תוצאות המחקר

1) התקנות, הקמת המערכת וטיפול בתקלות

שתי מערכות מכ"ם הותקנו במסגרת מחקר זה: אחת במרכז המחקר החקלאי בגילת, ישראל, והשנייה במרכז המחקר החקלאי באזור פוגיה שבדרום איטליה. יש לציין כי מספר מערכות מכ"ם נוספות הותקנו במסגרת מחקרים אחרים של חוקרים בקבוצה, ונתונים מהמערכות הללו תורמות גם כן למחקר הנוכחי, כאשר בישראל פועלת מערכת מכ"ם נוספת בערד. איור 1 מציג את מיקום מערכות המכ"ם של גילת וערד בישראל.



איור 1. מכ"םי ה-X-band בגילת וערד על רקע מפת המשקעים השנתית הממוצעת. העיגולים מציינים את תחום הכיסוי הפוטנציאלי של מערכות המכ"ם, וכן מסומן מיקום מדי הגשם ששימשו בניתוח. מיקום מערכת המכ"ם מסוג C-band של שח"ם מסומנת.

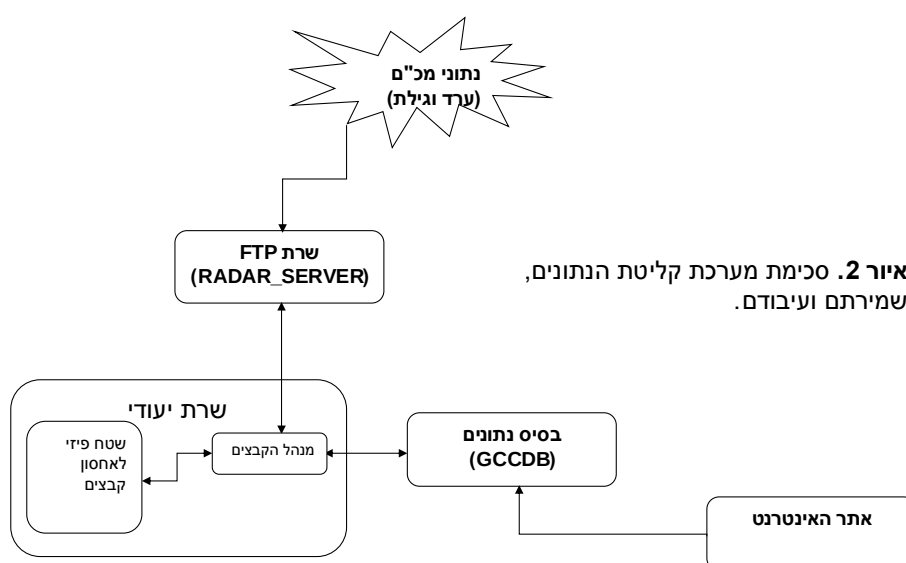
לאחר התקנת המכ"ם באוקטובר 2012, נבחנו מספר זוויות הגבהה אפשריות כאשר השאיפה היא מציאת גובה אופטימלי כך שמצד אחד תהייה הקטנה של הדי קרקע וחסימות מעצמים הקרובים למכ"ם ומצד השני הקטנת הגובה מעל פני הקרקע ממנו מתקבלים הנתונים. זווית ההגבהה הראשונית שנקבעה למכ"ם גילת במהלך אוקטובר היתה 3.2 מעלות. לאחר כחודש, בשל הדי הקרקע הרבים יחסית, הוחלט להעלות את הזווית ל-4.5 מעלות, ובמהלך פברואר אנטנת המכ"ם הונמכה לזווית של 3.8 מעלות. בנוסף, נמצא כי ישנן הסתרות רבות יחסית הקשורות בקבוצות עצים הקרובות למערכת המכ"ם בגילת. לצורך שיפור הכיסוי חלק מעצים אלו הורדו (ואחרים נשתלו במקומם).

באופן יחסי למערכות מכ"ם רגיונליות, מערכת זו לא דורשת טיפול שוטף אינטנסיבי, אולם מניסיון הפעלת המכ"ם בשלוש השנים הראשונות נמצא כי כל מספר חודשים נדרש לעשות כיוון של הפילטר במערכת, וכן ישנן תקלות תקשורת מפעם לפעם הדורשות טיפול. בנוסף, התרחשה תקלה משמעותית שהתרחשה במהלך אוקטובר 2014 דרשה נסיעה לאיטליה על ידי אחד החוקרים הראשיים (בונפיל) ותיקון המערכת במעבדה, המכ"ם חזר לעבודה במהלך נובמבר 2014.

לצורך הערכה כמותית של עצמות וכמויות גשם יש להשתמש בנוסף לנתוני המכ"ם גם בנתוני מדי גשם האפשריים כיוול ואימות הנתונים. נאספו נתונים מכ- 30 מדי גשם (ברזולוציה של 1 דקה - 1 שעה) ממקורות שונים, ובהם השירות המטאורולוגי, רשות ניקוז ים המלח ומשרד החקלאות ופיתוח הכפר (איור 1). בנוסף, השווינו את נתוני המכ"ם שהתקבלו במחקר לנתוני מכ"ם C-band מכוילים (Marra and Morin, 2015). יתרון בהשוואה עם נתוני מכ"ם מעבר למדי גשם הוא הכיסוי המרחבי. המכ"ם של שח"ם הממוקם בשדה התעופה בן גוריון שימש להשוואה זו (איור 1). טבלה 1 מציגה את הפרמטרים של מכ"ם ה-X-band וכן את אלו של מכ"ם ה-C-band של שח"ם.

טבלה 1. פרמטרים של מכ"מי ה-X-band ומכ"ם C-band של שח"ם

	X-Band	C-Band
Peak power	10.0 kW	250.0 kW
Frequency	9410 MHz	~5550 MHz
PRF	800 Hz	250 Hz
Gain	34 dB	44 dB
3dBZ Beamwidth	3.6°	1.0°
Elevation angle	1.2° (Arad), 3.6° (Gilat)	0 - 5°
Spatial res.	15 m x 0.09°	1000 m x 1.4°
Temporal res.	1 min	~5 min
Output res.	50x50 m ²	1x1 km ²
Range	~30 km	~260 km

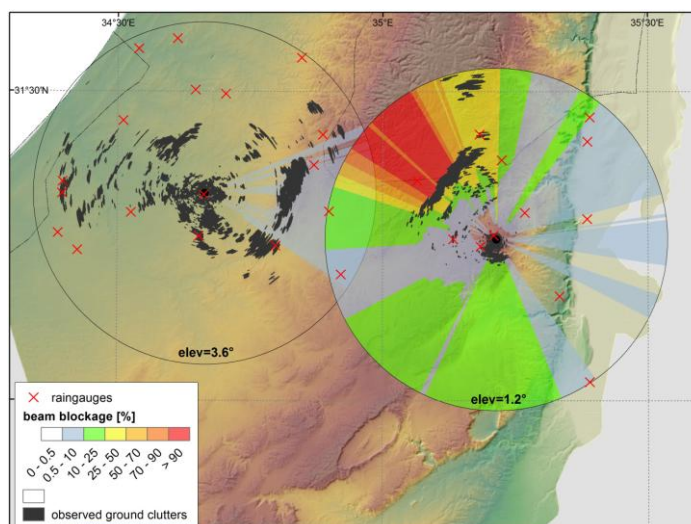


מכיוון שמערכת המכ"ם משדרת מפות גשם כל דקה היה צורך במסגרת המחקר גם להקים את מערכת קליטת הנתונים, עיבודם והצגתם. הוקם שרת ובסיס נתונים ונכתבו תוכנות מתאימות לקליטת הנתונים, אחסונם בשרת, עיבוד הנתונים והצגתם באתר אינטרנט בזמן אמת (איור 2). במהלך השנה הראשונה (2012/13) נשמרו נתוני המכ"ם בפורמט רסטרי בלבד (ראו פרטים מטה), והחל מנובמבר 2013, לאחר שנמצא שיש צורך בנתונים פולריים, החלו להשמר גם נתונים אלו. קליטת נתונים ברשת היא בקצב של 6 מגה-בייט בדקה, כ- 5600 קבצים ליום, כ- 2 טרה-בייט לשנה.

(2) אלגוריתמים פיזיקליים לתיקון שגיאות וחישוב עצמות גשם על בסיס נתוני המכ"ם

מערכת המכ"ם תוכננה לשמור נתונים בפורמט רסטרי המייצגים נתונים הניתנים להמרה לנתוני רפלקטיביות ($Z, mm^6 m^{-3}$), כל 1 דקה במטריצה שגודלה 1024×1024 פיקסלים, כאשר כל פיקסל מייצג שטח של $60 \times 60 m^2$, כאשר המכ"ם נמצא במרכז המטריצה והנתונים הם עד לטווח של כ- 30 ק"מ. מטריצה זו מחושבת במערכת המכ"ם על בסיס נתונים פולריים, כלומר נתונים לכל זווית וטווח מהמכ"ם, ברזולוציה של $3.6^\circ \times 60m$. במהלך המחקר מצאנו כי יש צורך לשמור גם את הנתונים הפולריים עבור חלק מהעיבודים הדרושים (כפי שיוסבר בהמשך) והחברה האיטלקית בצעה את השינוי הדרוש לשמירת הנתונים הללו ושידורם כל דקה. נתונים אלו קיימים החל מנובמבר 2013. חישוב עצמות הגשם מהמכ"ם כללה הפעלת מספר אלגוריתמים פיזיקליים לתיקון שגיאות ולאחריהם כיול בעזרת נתוני מדי גשם (Marra et al., 2015):

(1) ניקוי הדי קרקע בעזרת אלגוריתם דינמי (Marra et al., 2015): פיקסל פולרי מוגדר כהדי קרקע אם הוא מעל $5 dBz$ לפחות 90% מהשעתיים הקודמות. לאחר הניקוי הראשוני, החזרים ששטחם קטן מסף נתון ושאינן בקרבתם החזרים נוספים, מוגדרים גם כן כהדי קרקע (איור 3). עבור פיקסלים שזוהו כהדי קרקע, הנתון הממוצע לשעתיים האחרונות מחוסר מהנתון המדוד.



איור 3. אחוז החסימה כתוצאה מטופוגרפיה המחושב מנתוני DTM ומשוואות מעבר קרינה, בנוסף מסומנים אזורים עם הפרעות הדי קרקע ומוצג מיקום מדי הגשם.

(2) תיקון אזורים חסומים (Marra et al., 2015): החסימה הנובעת מטופוגרפיה מחושבת באמצעות סימולציה נומרית של מעבר קרינה (Pellarin et al., 2002) (איור 3). התיקון מתבצע לאזורים בהם

החסימה היא לפחות 70%. תיקון חסימות הנובעות מביינים, בתים וגורמים לא טופוגרפיים אחרים עדיין לא הופעל. חסימות אלו משמעותיות עבור מכ"ם גילת ואנו בתהליך של פיתוח אלגוריתם מתאים.

(3) תיקון אטנואציה (החלשת הד המכ"ם כתוצאה מגשם): בעיית האטנואציה ידועה כמשמעותית במיוחד למכ"ם מי X-band בגלל אורך הגל הקצר. אלגוריתמים לתיקון אטנואציה במכ"ם אלו המודדים בקיטוב יחיד קיימים אך ידועים כלא יציבים. במחקר זה הפעלנו אלגוריתם המתבסס על האלגוריתם של Hirschfeld and Bordan (1954), עם התאמות (Marra and Morin, 2015). מקדם האטנואציה k חושב על ידי: $k = 0.013 \cdot R^{1.22}$, המתאים לגשמים קונבקטיבים ולאורך הגל של מכ"ם ה-X-band, והוא הוגבל ל-12 dBz כדי למנוע אי יציבות נומרית (Marra et al., 2015). אטנואציה הקשורה ברדום רטוב לא טופלה עדיין ותבחן במחקר המשך.

(4) הפעלת פונקציה Z-R: נתוני הרפלקטיביות ($Z, \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$) המתקבלים מהמכ"ם מתורגמים לעצמת גשם ($R, \text{mm h}^{-1}$) באמצעות הקשר $Z = 316 \cdot R^{1.5}$, אשר נמצא מתאים לאזור במחקר קודם (Morin and Gabella, 2007). בנוסף, סף עליון של 250 מ"מ/שעה מופעל למניעת הערכת יתר של עצמות גשם במצב של החזרים מוגברים מחלקיקי ברד.

(5) כיול באמצעות מדי גשם: נתוני עצמות הגשם המתקבלים מהמכ"ם לאחר הפעלת אלגוריתמים שונים המתוארים לעיל עוברים כיול באמצעות השוואה עם נתונים הנמדדים במדי גשם. בשלב הנוכחי הופעלה הוצאת הטייה ממוצעת שמתקבלת על ידי הכפלת נתוני הגשם המתקבלים מהמכ"ם בפקטור תיקון השווה להופכי של מדד ה-Bias המוצג למטה. התיקון נעשה עבור כל אחד מאירועי הגשם בנפרד.

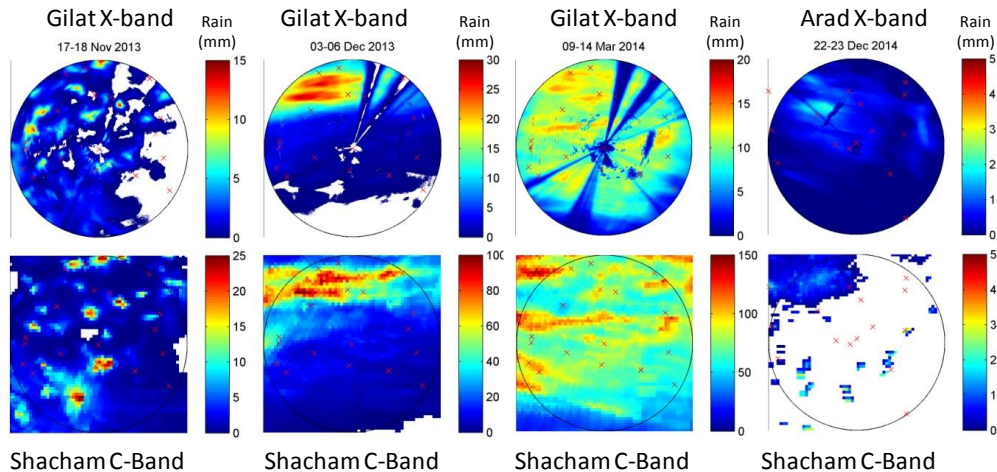
(3) הערכת מידת הדיוק של נתוני הגשם

כדי לבחון את מידת הדיוק של נתוני הגשם שחושבו מהמכ"ם הושו הערכות הגשם הן עם נתוני מדי גשם והן עם נתוני גשם מכוילים ממכ"ם ה-C-band של שח"ם (Marra and Morin, 2015). המאפשרים כיסוי מרחבי טוב מזה של מדי הגשם. שלושה מדדים שימשו בהשוואה של נתוני המכ"ם:

כאשר r_i מייצג נתון ממכ"ם ה-X-band ואילו g_i מציג נתון ממד הגשם או ממכ"ם ה-C-band. ההשוואה עם מדי הגשם נעשתה בין פיקסל מעל מד הגשם לנתון מד הגשם, ואילו בהשוואה בין שני המכ"ם, נתוני מכ"ם ה-X-band מוצעו לפיקסל של 1 קמ"ר כך שיתאימו לרזולוציה של נתוני מכ"ם ה-C-band.

(4) ניתוח הנתונים לאחר הפעלת האלגוריתמים הפיזיקליים

בשלב ראשון נבחנו הערכות הגשם המתקבלות מהאלגוריתמים הפיזיקליים בלבד, ללא כיול עם מדי גשם. איור 4 מציג את מפות הגשם הסופתיות של ארבעה אירועי גשם: 3-17-18/11/2013, 6/12.2013, 9-14/3/2014, ו-22-23/12/2014 ממכ"ם ה- X-band (ממכ"ם גילת עבור שלושת האירועים הראשונים, ומכ"ם ערד עבור הרביעי) ואת מפות הגשם ממכ"ם ה- C-band.



איור 4. מפות גשם עבור ארבע סופות נבחרות, השוואה בין מכ"ם ה- X-band של גילת או ערד (שורה עליונה) עם מכ"ם ה- C-band של שח"ם (שורה תחתונה).

טבלאות 2 ו-3 מציגות את ה- Bias וה- CC על בסיס הערכות שעתיות ממכ"מי ה- X-band בהשוואה למדי הגשם (טבלה 2) ולמכ"ם ה- C-band (טבלה 3) לאחר הפעלת כל אחת מהאלגוריתמים המתוארים לעיל.

טבלה 2. מדדי דיוק הנתונים לאחר הפעלת האלגוריתמים הפיזיקליים ביחס לנתוני מדי גשם

	Raw	Ground clutter	Beam blockage	Attenuation
Bias	12.4	0.14	0.15	0.10
CC	-0.077	0.28	0.27	0.39

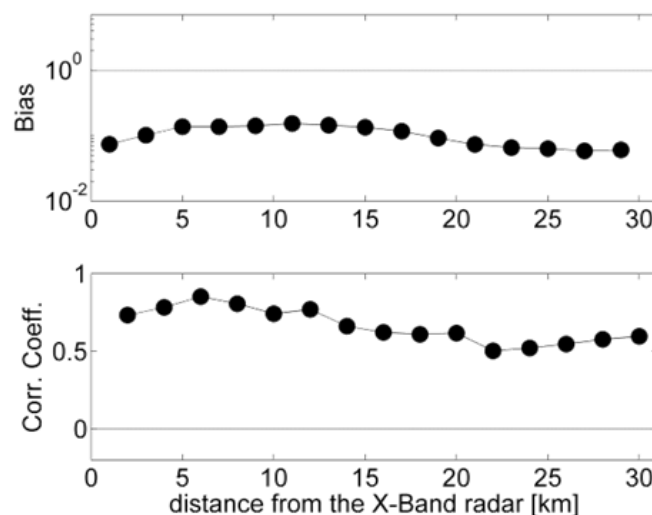
טבלה 3. מדדי דיוק הנתונים לאחר הפעלת האלגוריתמים הפיזיקליים ביחס לנתוני מכ"ם C-band של שח"ם

	Raw	Ground clutter	Beam blockage	Attenuation
Bias	0.70	0.10	0.11	0.11
CC	0.35	0.62	0.63	0.64

כפי שניתן לראות מערכי ה- Bias המאוד נמוכים, מלבד במצב הראשוני של הנתונים לפני ניקוי הדי הקרקע, ההערכות מהמכ"ם נתונות לתת-הערכה משמעותית מאוד של כ- 85%. תת הערכה זו קשורה כנראה בבעיה של כיול מערכת המכ"ם עצמה.

ניתן לראות שיפור בקורלציה עם הפעלת האלגוריתמים השונים, כאשר השיפור המשמעותי ביותר מתקבל לאחר הפעלת אלגוריתם ניקוי הדי הקרקע. הקורלציה המירבית המתקבלת בהשוואה עם מדי הגשם היא 0.39 שהוא ערך נמוך. יש לציין כי יתכן וקשור בבעיות של דגימה וייצוג של מד גשם

את פיקסל המכ"ם (ברזולוציה שעתית). בהשוואה עם מכ"ם ה-C-band הקורלציה עולה ל- 0.64 שזו תוצאה סבירה עבור הערכות גשם ממכ"ם. איור 5 מציג את השינוי בממדי ה- Bias ו-CC עם המרחק מהמכ"ם. כצפוי, ישנה ירידה בדיוק הנתונים במרחקים גדולים מ- 10-15 ק"מ מהמכ"ם.



איור 5. שינוי המדדים Bias ו-CC עם הטווח מהמכ"ם (ללא כיול באמצעות מדי גשם).

5) מפות גשם לאזור גילת לשנת 2014/15 והערכת דיוק הנתונים

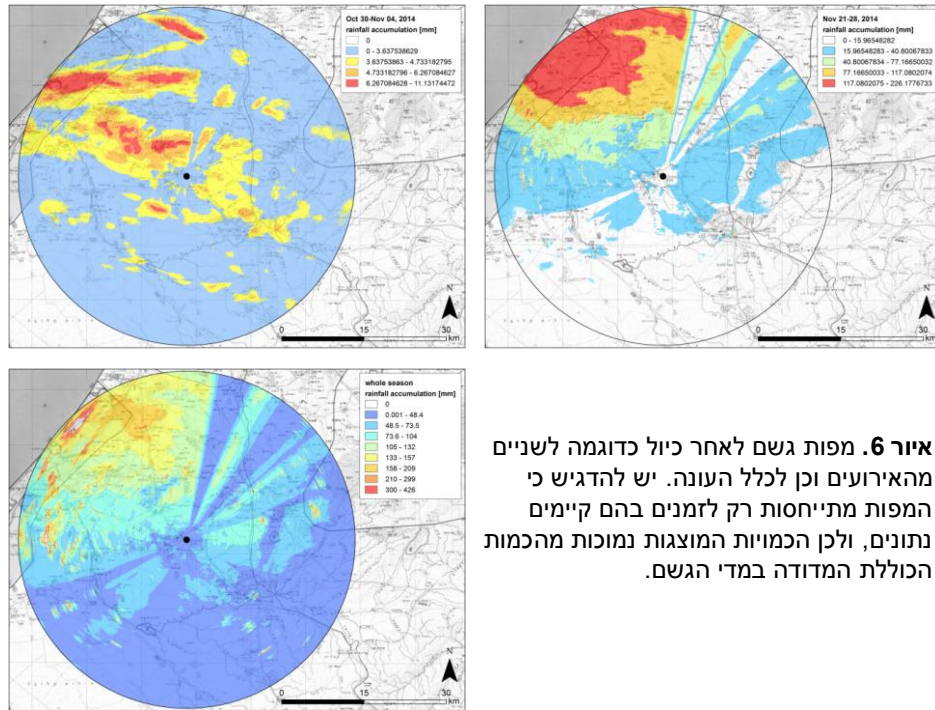
10 סופות גשם התרחשו באזור מכ"ם גילת במהלך שנה זו והן מוצגות בטבלה 4. לשלוש מהסופות לא נשמרו מספיק נתונים והן לא נותחו על בסיס סופתי. האלגוריתמים הפיזיקליים המוצגים לעיל הופעלו בשלב ראשון. אחרי כן, לכל אחת מהסופות ולכלל העונה חושב ה-Bias על ידי השוואה עם נתוני מדי גשם על פי הנוסחה למעלה, ובהתאם כוילו נתוני המכ"ם (הכפלה בפקטור תיקון שווה להופכי ל-Bias). מדדי FSE ו-CC חושבו לנתונים הגשם המכילים בהשוואה לנתוני מדי גשם על בסיס עובי גשם כולל. טבלה 4 מציגה את המדדים השונים לכל הסופות ולכלל העונה. יש לציין כי כל ההשוואות נעשו רק עבור זמנים בהם קיימים נתונים מספיקים מהמכ"ם (נכללו שעות בהן קיימות לפחות 60% מהסריקות האפשריות) וממדי הגשם. פרקי זמן בהם המכ"ם לא עבד הוצאו מהניתוח.

טבלה 4. סופות שהתרחשו באזור מכ"ם גילת בשנת 2014/15 והמדדים שקבלו עבורן ולכל העונה

Event	From	To	Duration [h]	Available	Bias	FSE	CC
1	30/10/2014	4/11/2014	62	68%	0.08	1.62	0.20
2	16/11/2014	17/11/2014	46	100%	0.12	1.38	0.62
3	21/11/2014	28/11/2014	190	100%	0.14	1.47	0.48
4	3/1/2015	4/1/2015	46	100%	0.14	1.56	0.59
5	7/1/2015	11/1/2015	100	29%	0.05	1.40	0.27
6	15/1/2015	17/1/2015	/	/	/	/	/
7	13/2/2015	16/2/2015	94	96%	0.11	1.24	0.42
8	18/2/2015	21/2/2015	90	80%	0.05	1.26	-0.01
9	28/3/2015	1/4/2015	/	/	/	/	/
10	11/4/2015	12/4/2015	/	/	/	/	/
Whole season	27/10/2014	24/5/2015	5005	29%	0.25	1.32	0.54

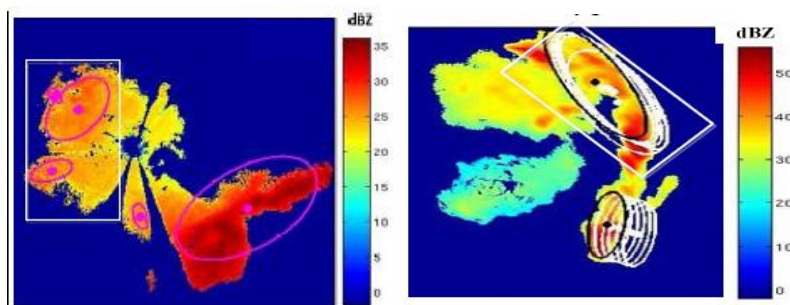
כפי שניתן לראות ה-Bias ממשיך להציג את תת ההערכה המשמעותית שתוארה לעיל. המדדים FSE ו-CC עבור חלקה מהסופות סבירים בהשוואה לערכי מדדים אלו מתוצאות שהתקבלו על בסיס מכ"ם ה-C-band של שח"ם. לחלק מהסופות המדדים אינם טובים ונראה כי דרוש עדיין שיפור של האלגוריתמים. במיוחד, נראה כי אלגוריתם האטנואציה עדיין אינו פועל היטב בגלל שהוא מבוסס על נתונים שנתונים לתת הערכה משמעותית.

איור 6 מציג מפות גשם למספר סופות לאחר כיול לכלל העונה.



איור 6. מפות גשם לאחר כיול כדוגמה לשניים מההירושים וכן לכלל העונה. יש להדגיש כי המפות מתייחסות רק לזמנים בהם קיימים נתונים, ולכן הכמויות המוצגות נמוכות מהכמות הכוללת המדודה במדי הגשם.

6) שיטות לחיזוי טווח קצר (nowcasting)



איור 7. שמאל: זיהוי תאי הגשם בעזרת האלגוריתם שפותח במחקר זה, המבוסס על ספים ברמות שונות, ימין: עקיבה אחר תאי הגשם עם הזמן. מוצג עבור המכ"ם בטורינו, איטליה.

נבחנו מספר אלגוריתמים קיימים (לדוגמה, TITAN, SCIT, ETITAN), אולם נמצא ששיטות אלו, המבוססות על סף יחיד לזיהוי "תאי" הגשם, לא נותן תוצאות מספקות למחקר. פותח אלגוריתם חדש המבוסס על ספים ברמות שונות לזיהוי תאי גשם ועקיבה אחריהם. האלגוריתם נבחן על נתוני המכ"ם

הממוקם בטורינו, איטליה. איור 7 מציג דוגמה לזיהוי ועקיבה. האלגוריתם דורש עדיין בדיקה בצורה נרחבת יותר לפני יישומו האופרטיבי עבור המכ"מים בישראל.

(7) יישומים חקלאיים

יישום נתוני הגשם מהמכ"ם ביישומים חקלאיים התעכב ביחס לתכנית המקורית מכיוון שנושא הערכות הגשם, פיתוח ויישום האלגוריתמים המפורטים לעיל וכן תקלות שהתרחשו במערכת, אשר דרשו מאמץ מחקרי רב וחלק זה בוצע רק באופן חלקי. אנו מתכננים את המשך הניתוחים ובחינת היישומים החקלאיים בעתיד הקרוב. עם זאת אשתקד הצגנו את הפוטנציאל לשימוש במכ"ם גם בהדברת עשבים (טבלה 5). הרחבת ניסוי מעין זה תלויה באיכות נתוני הגשם ולכן לא הוצבו בתשע"ה ניסויים נוספים מעין זה.

טבלה 5. השפעת מועד יישום קוטל עשבים על יעילות ההדברה בגילת

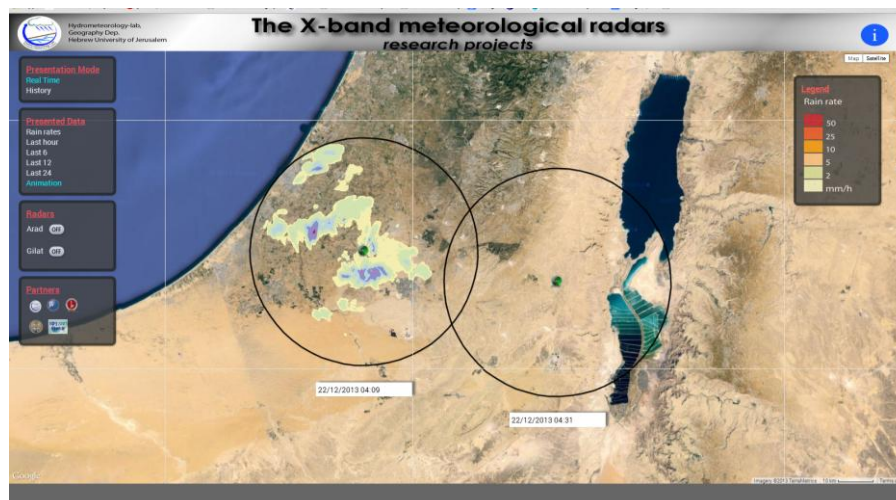
טיפול	יישום		יעילות הדברה		אחוז כיסוי
	תאריך	תזמון	שעות עד גשם	13/02/2014	13/02/2014
A	08/01/2014	בוקר	>24	80	95
A	08/01/2014	בוקר	>24	90	95
A	08/01/2014	בוקר	>24	95	95
A	08/01/2014	בוקר	>24	90	95
B	09/01/2014	אחה"צ	12	60	50
B	09/01/2014	אחה"צ	12	50	30
B	09/01/2014	אחה"צ	12	50	90
C	26/01/2014	בוקר	>24	0	80
C	26/01/2014	בוקר	>24	0	90
D	27/01/2014	בוקר	>24	0	90
D	27/01/2014	בוקר	>24	0	80
D	27/01/2014	בוקר	>24	0	80

יש לציין כי על פי דיווח בעל פה מהחקלאים, היכולת לקבל תצוגת מפות גשם בזמן אמת וברזולוציה גבוהה (כולל אפליקצית סמרטפון) מאפשרת להם קבלת החלטות מושכלת בדבר יישום פעולות חקלאיות מתוכננות, ובכך משפרת את יכולת הניהול החקלאי באופן כללי. הערכה כמותית של מידת השיפור וכן ניתוחים כמותיים נוספים יתקבלו בהמשך.

(8) הקמת אתר אינטרנט להצגת הנתונים בזמן אמת

למרות שהחברה האיטלקית סיפקה אתר אינטרנט ואפליקציית סמרטפון (אנדרואיד) שאיפשר ויזואליזציה של הנתונים בזמן אמת, לא ניתן היה להתאים את האתר לדרישותינו, וכמו כן לא ידוע אם האתר יהיה זמין עבורנו בעתיד, ולכן במסגרת המחקר הקמנו אתר אינטרנט המציג את הנתונים בזמן

אמת. בנוסף, אנו עובדים כעת על שיפור האתר להצגת נתוני עבר, עצמות גשם, גשם מצטבר ואנימציה. איור 8 מציג את אתר האינטרנט במתכונתו הנוכחית ואת הלינק. יש לציין כי מצאנו כי יש כניסות רבות לאתר לצפייה במצב הגשמים במהלך עונת הגשמים.



Link: <http://www.hydrometeorology-lab.huji.ac.il/index.php/x-band-experimental-site>

איור 8. אתר אינטרנט שהוקם במסגרת המחקר להצגת נתוני המכ"ם

4. דיון ומסקנות

(1) מערכות מכ"ם ה- X-band שהותקנו במסגרת מחקר זה הינן פשוטות יחסית למערכות מכ"ם מטאורולוגי (סריקה בזווית הגבהה יחידה, ללא יכולת דופלר, קיטוב יחיד), ובהתאם לכך גם עלותם נמוכה יחסית, אולם ישנה גם פגיעה בדיוק הנתונים. על פי הממצאים בשלב זה, נראה כי ישנה יכולת להגיע לדיוק סביר של נתוני גשם (ביחס למקובל עבור מערכות מכ"ם) בתנאי שמקטינים את התקלות ובמיוחד מחסור בנתונים לחלק מפרקי הזמן. בנוסף, יש צורך בתחזוק בסיסי, כיול פילטר המכ"ם כל מספר חודשים וטיפול בתקלות (בעיקר תקלות תקשורת) באופן שוטף.

(2) האלגוריתמים הפיזיקליים שפותחו ויושמו משפרים את דיוק הנתונים באופן משמעותי. ישנה חשיבות גדולה לאלגוריתם לניקוי הדי הקרקע שפותח במהלך השנה האחרונה (ויש עדיין לשפרו) שהביא לשיפור הגדול ביותר. אלגוריתם האטנואציה בשלב זה לא שיפר משמעותית את הדיוק, אולם נראה כי יש לשפר ראשית את בעיית תת ההערכה הגבוהה שנמצאה שמונעת יישום יעיל של אלגוריתם זה. מספר נושאים עדיין לא טופלו, ובפרט אטנואציה כתוצאה מהרטבת הרדום וטיפול בחסימות שאינן טופוגרפיות.

(3) נמצא כי קיימת תת הערכה גדולה בהערכות הראשוניות מהמכ"ם (לפני כיול עם מדי גשם). תת הערכה זו מתוקנת כרגע על ידי כיול עם מדי גשם אולם היא מרמזת על בעיה במערכות הדורשת בדיקה נוספת.

(4) לאחר כיול עם מדי גשם (הוצאת הטיה ממוצעת לכל אירוע) דיוק הנתונים הוא סביר ברוב המקרים ביחס למצופה ממערכות מכ"ם, כפי שמתקבל באמצעות מדדים של FSE ו- CC. יש לציין כי חלק

מהשגיאה המתקבלת קשורה בהשוואה של נתונים נקודתיים ממדי גשם עם נתוני גשם מרחבי. כאשר מבצעים את ההשוואה עם נתוני גשם מכוילים ממכ"ם שח"ם מקבלים שיפור בערכי המדדים.

(5) ישנה ירידה בדיוק הנתונים החל מטווח של 10-15 ק"מ מהמכ"ם. ירידת דיוק עם הטווח מוכרת עבור מערכות מכ"ם ובאופן יחסי אינה גבוהה במקרה זה.

(6) הקמת מערכת ותחזוקה דורש הקמה וניהול שוטף של בסיס נתונים המסוגל לקלוט ולעבד בזמן אמת נתונים בהיקף של כ- 2 טרה בשנה.

(7) הוצגה שיטה לחיזוי לטווח קצר. יש עדיין לבחון אותה עבור המערכות בישראל.

(8) יישומים חקלאיים והערכות כמותיות שלהם דורש המשך עבודה וניתוח. נושא זה התעכב בגלל התקלות שהתרחשו והמאמץ הרב שהוקדש להערכות גשם עצמן. יחד עם זאת, היכולת לקבל תמונות גשם בזמן אמת וברזולוציה גבוהה כבר כעת משמש את החקלאיים לניהול משופר של המערכות החקלאיות שבאחריותם.

5. פרסומים מדעיים

Marra F., Lokshin A., Notarpietro R., Gabella M., Branca M., Bonfil D.J., and Morin E. (2015) High resolution X-Band radar rainfall estimates for a Mediterranean to hyper-arid transition area, short paper for ICEAA 15, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 7-11 September 2015, Torino, Italy.

Marra F. and Morin E. (2015) Use of radar QPE for hydrological design in a range of climatic regimes: Intensity-Duration-Frequency curves. In press. J. Hydrol.

6. רשימת ספרות

Basso B., Cammarano D., Troccoli A., Chen D. and Ritchie J. T. (2010) Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: Field data and simulation analysis, Eur. J. Agronomy, 33, 132–138.

Bonfil D. J., Karnieli A., Raz M., Mufradi I., Asido S., Egozi H., Hoffman A. and Schmilovitch Z. (2004), Decision support system for improving wheat grain quality in the Mediterranean area of Israel, Field Crops Res., 89, 153–163.

Har-Gil D., Bonfil D. J. and Svoray T. (2011) Multi scale analysis of the factors influencing wheat quality as determined by gluten index, Field Crops Res., 123, 1-9.

Hitschfeld W. and Bordan J. (1954) Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuation wavelengths. J. Meteorol., 11:5867.

Karklinsky, M., and Morin, E. (2006) Spatial characteristics of radar-derived convective rain cells over southern Israel. Meteorologische Zeitschrift 15, 513–520.

- Krajewski W. F. and Smith J. A. (2002) Radar hydrology: Rainfall estimation, *Adv. Water Resour.*, 25, 1387–1394.
- Krajewski W. F., Ciach G. J. and Habib E. (2003) An analysis of small scale rainfall variability in different climatic regimes, *Hydrol. Sci. J.*, 48, 151– 162.
- Krajewski W. F., Villarini G. and Smith J. A. (2010) Radar-rainfall uncertainties where are we after thirty years of effort? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91(1), 87-94.
- Marra F., Lokshin A., Notarpietro R., Gabella M., Branca M., Bonfil D.J. and Morin E. (2015) High resolution X-Band radar rainfall estimates for a Mediterranean to hyper-arid transition area, short paper for ICEAA 15, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 7-11 September 2015, Torino, Italy.
- Marra F. and Morin E. (2015) Use of radar QPE for hydrological design in a range of climatic regimes: Intensity-Duration-Frequency curves. In press. *J. Hydrol.*
- Morin E. and Gabella M. (2007) Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes. *J. Geophys. Res.* 112, D20108, doi:10.1029/2006JD008206.
- Pellarin T., Delrieu G. and Saulnier G. M. (2002) Hydrologic visibility of weather radar systems operating in mountainous regions: case study for the Ardèche catchment (France). *J. Hydrometeorol.* 3, 539-555.
- Sharon D. (1972) The spottiness of rainfall in a desert area, *J. Hydrol.*, 17, 161-175.
- Turso, S., Paoletta, S., Gabella, M. and Perona, G. (2013) MicroRadarNet: A network of weather micro radars for the identification of local high resolution precipitation patterns, *Atmos. Res.*, 119, 81-96.

סיכום עם שאלות מנחות

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).

שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

הערה: נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
1. אב-טיפוס למערכת למדידת גשם ברזולוציה גבוהה המבוססת על מכ"ם X-band לוקלי, 2. פיתוח ויישום שיטות של חיזוי לטווח קצר 3. יישום נתוני הגשם המדודים והחזויים במערכת קבלת החלטות חקלאיות לטווח קצר, 4. טווח בינוני, ו-5. טווח ארוך.
עיקרי התוצאות.
עיקר המחקר הוקדש לנושא מדידת הגשם מהמכ"ם, הקמת מערכת המדידה והמחשוב, ופיתוח השיטות לתיקון שגיאות וכיול הנתונים. פותח אב-טיפוס של המערכת. דיוק הנתונים שהתקבל היה מספק, אך יש להקפיד על מניעת תקלות וקליטה רציפה של הנתונים. יש עדיין לשפר חלק מהאלגוריתמים. הנתונים הזמינים בזמן אמת וברזולוציה גבוהה משפרים את יכולת החקלאים לניהל המערכות. יש עוד להמשיך במחקר ליישום שיטות ספציפיות והערכה כמותית של השיפור המתקבל.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדו"ח?
המטרה העיקרית הקשורה להערכת הגשם מהמכ"ם, וחלק מהמטרות הנוספות הושגו, אולם בשל תקלות ומאמץ מחקרי רב שהיה דרוש עבור פיתוח האלגוריתמים להערכות הגשם ותחזוק המערכת, לא ניתן היה להשלים את כל המטרות.
בעיות שונות לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר
יש להמשיך ולפתח אלגוריתמים של הערכת גשם ופיתוח הפרוצדורות החקלאיות.
יש להמשיך ביישום הנתונים במערכת קבלת החלטות חקלאית.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; הצגה בכנסים בינלאומיים: ספטמבר 2013 בכנס באיטליה, במהלך אפריל 2014 בכנסים בווינגטון ווינה, ספטמבר 2015 בכנס באיטליה.
Marra F., Lokshin A., Notarpietro R., Gabella M., Branca M., Bonfil D.J., and Morin E. (2015) High resolution X-Band radar rainfall estimates for a Mediterranean to hyper-arid transition area, short paper for ICEAA 15, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 7-11 September 2015, Torino, Italy.
Marra F. and Morin E. (2015) Use of radar QPE for hydrological design in a range of climatic regimes: Intensity-Duration-Frequency curves. In press. J. Hydrol.
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)