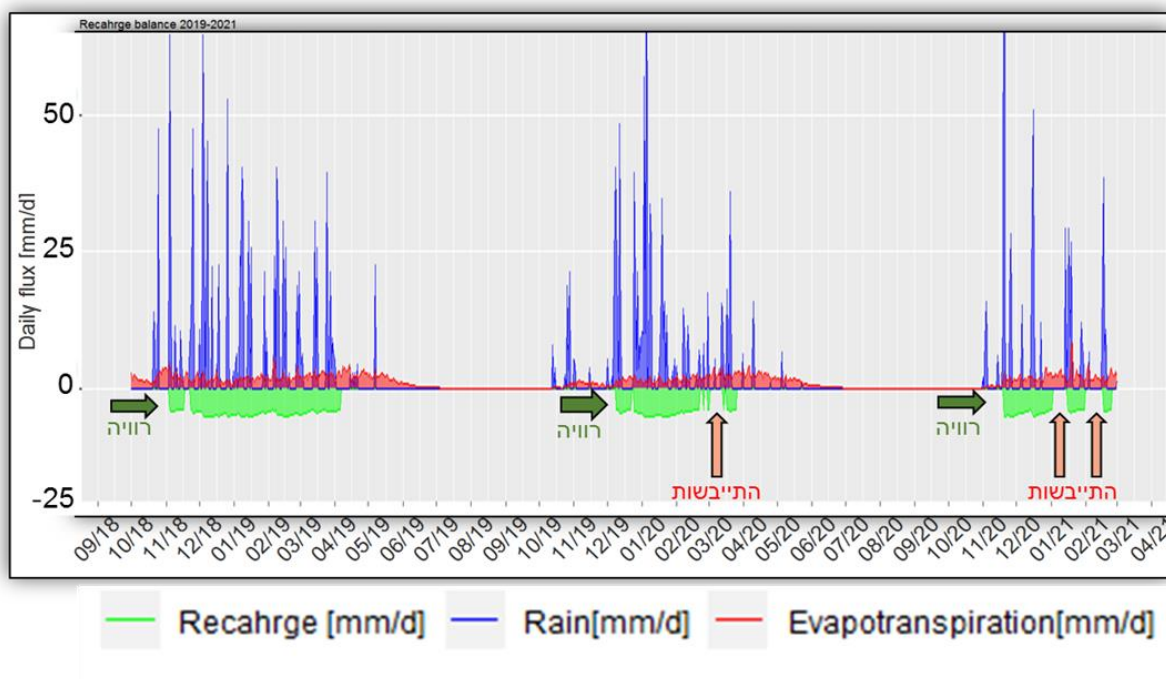


מודל המילוי החוזר לתת הקרקע דו"ח שלב א' פיתוח בסיסי הנתונים למודל חלק א' – בסיס נתוני המשקעים



מאי 2021

יוני יצחק
תחום המודלים - השרות ההידרולוגי

דו"ח השרות ההידרולוגי מספר: IHS/7/2022

תוכן עניינים

1. מבוא	3
2. מטרות	3
3. מקורות הנתונים	3
3.1 מקורות הנתונים	3
3.1.1 מדי גשם	4
3.1.2 נתוני מכ"ם	7
4. בחירת השיטה המיטבית לאנליזת משקעים	8
4.1 שיפור מערכת האינטרפולציה להערכת המשקעים	8
4.1.1 גישת העבודה	8
4.1.1 פירוט שיטות האינטרפולציה	9
4.1.2 בניית מנגנון האימות	10
5. בחינת התוצאות	14
5.1 התפלגות השגיאה לפי Relative Error	14
5.2 ניתוח רגישות	14
5.2.1 צפיפות רשת התחנות	15
5.2.1 אזורים	16
5.2.2 מצבים סינופטיים	16
5.2.3 פיזור המשקעים (Autocorrelation)	17
6. השפעת נתוני הקלט השונים על המודל ההידרולוגי	19
6.1 מודל המילוי החוזר DREAM	19
6.2 המודל ההידרוגיאולוגי	20
6.3 ניתוח התוצאות	21
6.3.1 בחינה כללית של התפלגות השגיאה	21
6.3.2 בחירת פונקציות המטרה ורזולוציית הזמן	22
6.3.3 ניתוח התוצאות	23
7. סיכום ומסקנות	28

1. מבוא

עבודה זו הינה שלב בפרויקט מודל המילוי החוזר הארצי למי התהום. במסגרת שלב זה התמקדנו בהקמת בסיס נתוני המשקעים המשמשים כקלט למודל ובהקמת מנוע להפיכת הנתונים לשריגים אחידים ברזולוציה יומית. שריגי משקעים אלו פותחו על בסיס המלצות עבודת הפיילוט אשר בוצעה לאקוויפר ירקון תננים ובכללן הקביעה כי ניתן להשתמש בנתוני תחנות לצורך הערכת המילוי החוזר לאקוויפר אך יש לבדוק שיטות אינטרפולציה מתקדמות יותר לשם הקטנת השגיאה (Zocatelli at al., 2020, Rep-6).

מודל המילוי החוזר מתבסס על נתוני אידוי פוטנציאלי ונתוני משקעים יומיים. נתונים אלו נדרשים להיות זמנים החל מ-1970 ולהתעדכן באופן יומי בכדי לאפשר בסיס נתונים "חי" המאפשר משיכה של נתונים לזמן ואימות מודלים בכל זמן ובכל מרחב נתון במדינת ישראל. הדרישה לנתונים ברמה יממתית נובעת ממחזורי הייבוש וההרטבה של הקרקע במהלך עונת החורף המשפיעים מאוד על מנגנוני הזרימה בקרקע ובתת הקרקע (Bredenkamp et al., 1995).

נתוני המשקעים מצבים אתגר ייחודי כיוון שתפרוסת המשקעים משתנה מאוד בזמן ובמרחב ואילו נתוני המשקעים מתבססים על רשת תחנות גשם נקודתית או מכ"ם אשר אינם נותנים כיסוי מלא לתפרוסת המשקעים, אתגר זה משמעותי במיוחד בישראל, זאת כיוון שהיא מושפעת ממגוון תהליכים אקלימיים (Alpert at al., 2004) וממבנה טופוגרפי וגיאוגרפי ייחודי למדי היוצרים שונות אזורית משמעותית בתפרוסת המשקעים. שונות זו בתורה משפיעה על מבנה הקרקע וכיסוי הצמחייה (Carmel and Kadmon., 1999) שני גורמים בעלי השפעה משמעותית על המילוי החוזר לתת הקרקע.

2. מטרות

- בחינת מקורות הנתונים השונים להערכת המשקעים ברמה הארצית.
- בחירת השיטה המיטבית לאנליזת משקעים יממתית.
- פיתוח בסיס נתונים ארצי אשר ישמש לנתוני קלט משקעים יממתי למודל המילוי החוזר הארצי.
- פיתוח מערכת לכריית נתוני המשקעים ובניית שריגי המשקעים.

3. מקורות הנתונים

3.1 מקורות הנתונים

מקורות הנתונים מורכבים משני סוגי נתונים בתפרוסת משתנה:

1. מדי גשם.

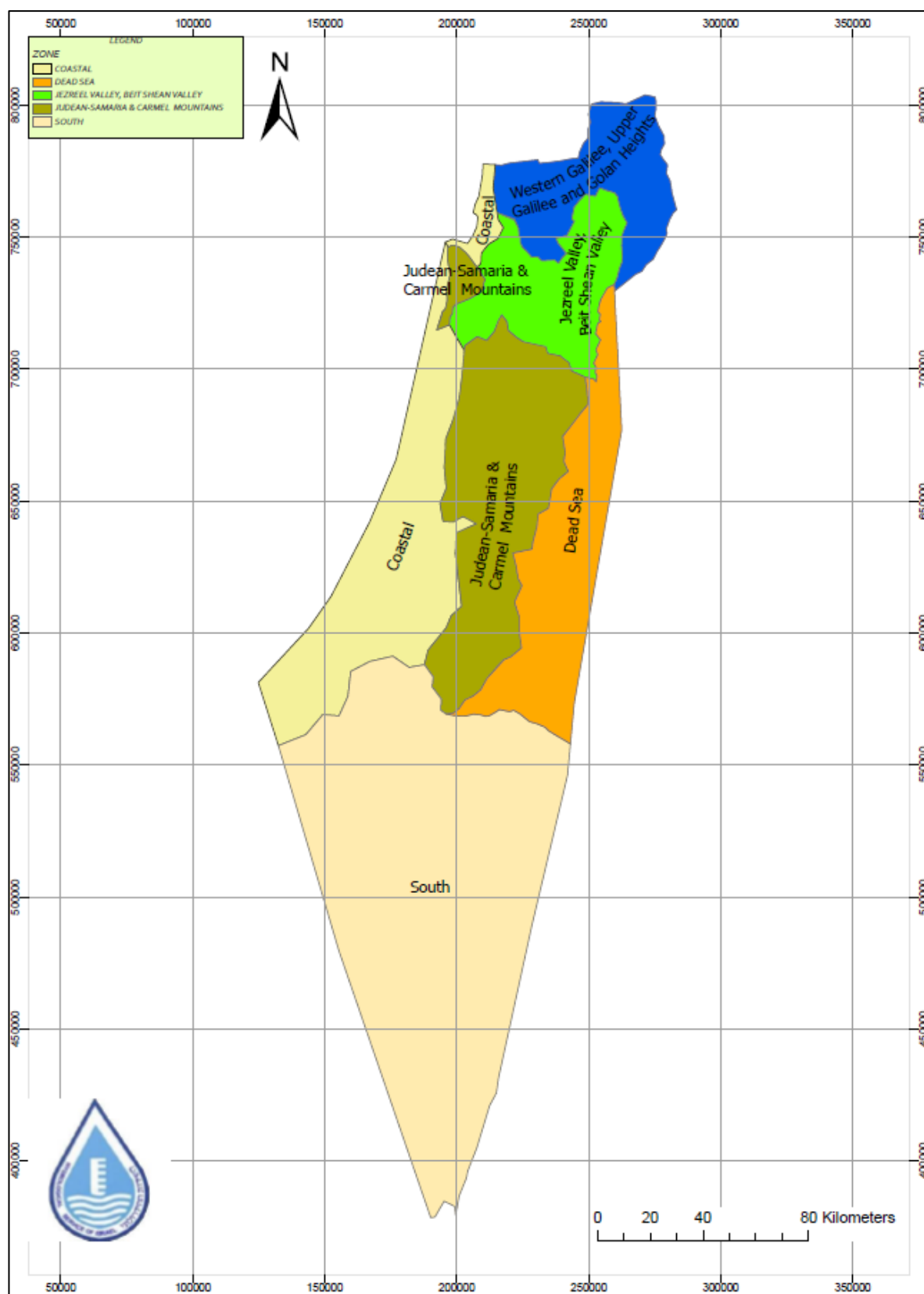
2. נתוני מכ"ם.

3.1.1 מדי גשם

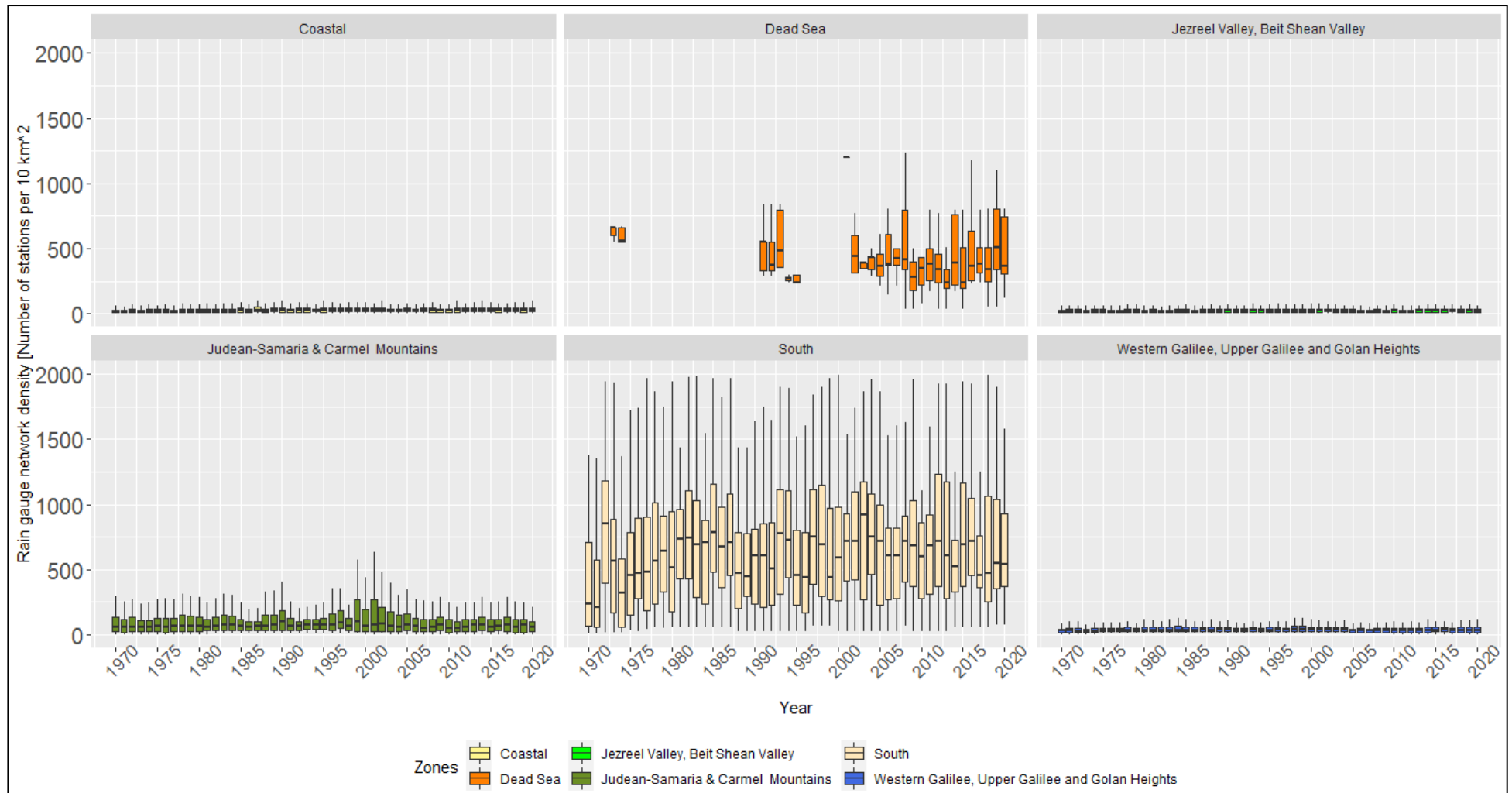
בין השנים 1970-2020 נמדדו כמויות המשקעים היומיות במאות תחנות לאורך מדינת ישראל, הנתונים עובדו וטיבו על ידי השרות המטאורולוגי. לצורך ניתוח הנתונים בוצעה חלוקה לאזורים (איור 3.1) בהתבסס על איזון בין 3 עקרונות:

1. **צפיפות התחנות באזורים השונים** – קו הגבול בין האזורים השונים התבסס על "שברים טבעיים" במספר התחנות בין האזורים.
2. **חלוקה לאגנים הידרוגיאולוגיים** – מטרת העבודה הינה לבחון את נתוני המשקעים כקלט למודלים הידרוגיאולוגיים. מודלים אלו הינם מודלים אזוריים ולשונות בין האזורים חשיבות לגבי אמינות נתוני הקלט בכל אזור.
3. **שונות בדפוסי המשקעים בין האזורים השונים** – כפי שצוין במבוא מדינת ישראל מצויה באזור מעבר אקלימי ועקב כך מאופיינת בשונות אזורית באופי המשקעים. כגון אפיקי ים סוף באזור הערבה, שקעים קפריסאים באזור מישור החוף והצפון וגשמים המבוססים על התפתחות עננות מקומית באזור מדבר יהודה. שונות זו מובילה לדפוסי משקעים שונים.

איור 3.2 מציג את צפיפות רשת התחנות באזורים השונים לאורך התקופה, ניתן לראות שבאזור המרכז מספר תחנות הגשם הולך ויורד עם השנים אך צפיפות תחנות הגשם גבוהה ועומדת על 4-5 תח' גשם ל-10 קמ"ר ואילו באזור ים המלח והערבה צפיפות התחנות נמוכה ביותר ועומדת על פחות מתחנה אחת לכל 10 קמ"ר. הנחת העבודה היא כי צפיפות רשת התחנות משמעותית להצלחת האינטרפולציה המרחבית.



איור 3.1: חלוקה ארצית לאזורי בוחן

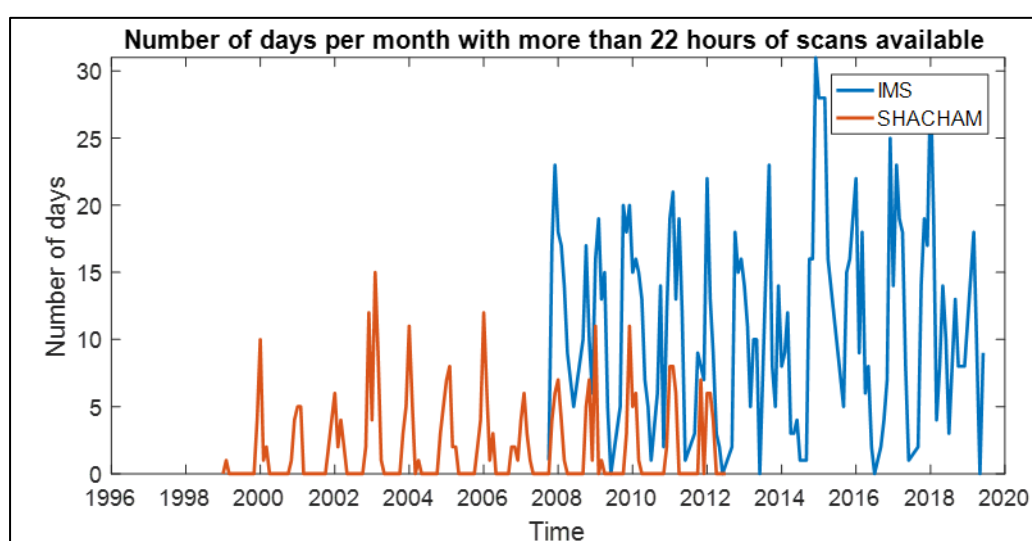


איור 3.2: צפיפות רשת מדי הגשים (מספר תח' ל-10 קמ"ר) לאורך השנים 1970-2020 בחלוקה לאזורים השונים.

3.1.2 נתוני מכ"ם

השימוש בנתוני המכ"ם לצורך הערכת המילוי החוזר נבחנה באופן מעמיק ביותר בעבודת הפיילוט המקדימה לעבודה זו (Zocatelli at al.,2020, Rep-2-6). במסגרתה נבחנו נתוני המכ"ם הזמינים לאורך הזמן ועלה כי זמינות המכ"ם מחולקת לתקופות הזמן הבאות (איור 3.2):

1. מכ"ם שח"ם (מקורות): 2012-1999.
2. מכ"ם השרות המטאורולוגי: 2018-2009.



איור 3.2: רמת הכיסוי (מספר יממות עם נתונים מלאים בחודש) של המכ"ם לאורך השנים 2018-1999 (מתוך Zocatelli at al.,2020, Rep-4)

זמינות נתוני המכ"ם אינה אחידה לאורך הזמן ולמעשה (איור 3.2) למעט בין השנים 2018-2009 הכיסוי היממתי של המכ"ם אינו מלא (Zocatelli at al.,2020, Rep-3). נוסף על כך גם בין השנים 2012-2009 תוצרי מכ"ם השמ"ט היו ברמה שאינה מספיקה לשימוש למודל המילוי החוזר. מעבר לכך במסגרת עבודת הפיילוט עלה כי לשימוש בנתוני המכ"ם יש מספר חסרונות עקרוניים (Zocatelli at al.,2020, Rep-5):

1. למרות שהמכ"ם מזהה היטב את דפוסי המשקעים ולמרות שתיקון הנתונים בשיטות שונות הביא לשיפור משמעותי בדיוק הנתונים, עדיין קיימות שגיאות בכמויות המשקעים המוערכות. שגיאות אלו מביאות לשגיאות בהערכת המילוי החוזר שהן גדולות יותר מאלו שמקורן בתחנות גשם.
2. דפוס הדעיכה של המכ"ם משמעותי גם לאחר תיקון והוא אינו מתאים לאנליזה של אזורים מרוחקים.

4. בחירת השיטה המיטבית לאנליזת משקעים

כאמור, תוצאות עבודת הפיילוט העלו כי בגלל דפוס המילוי החוזר (עיקר המילוי החוזר מתרחש בתנאים בהם המשקעים אחידים וניתן להגיע לתוצאות טובות באמצעות אינטרפולציה) אין עדיפות מוחלטת לשימוש בנתוני המכ"ם לעומת אינטרפולציית תחנות גם בתנאים של כיסוי עיתי מלא ובכל אופן לא ניתן להשתמש בנתוני המכ"ם כמקור מידע יחיד לניתוח המילוי החוזר (Zoccatelli at al., 2020, Rep-5). מנגד, תוצאות העבודה העלו גם כי שימוש בשיטת IDW – לצורך אינטרפולציית תחנות אינה מיטבית כיוון שהיא אינה מצליחה לעקוב בצורה טובה אחר דפוס המשקעים. חסרונות אלו באים לידי ביטוי בעיקר בתנאים של משקעים לא אחידים. חוסר האחידות נמדד בערכי Spatial Autocorrelation (Marra., 2018) (Morin & Morin, 2020, Rep-5) וניתוח תוצאות האינטרפולציה העלה כי השפעת חוסר האחידות על אמינות האינט' גבוהה פי 5 בהשוואה לצפיפות רשת התחנות (Morin at al., 2020, Rep-5).

לאור האמור מסקנת עבודת הפיילוט היא כי השיטה המיטבית לאנליזת המשקעים לטובת הערכת המילוי החוזר לאקוויפר הינה באמצעות שתי חלופות מרכזיות:

1. שילוב מושכל של נתוני המכ"ם ואינטרפולציית תחנות.
2. שיפור משמעותי של האינטרפולציה ללא שימוש בנתוני מכ"ם.

לאור המורכבות הרבה והכיסוי העיתי הנמוך של המכ"ם הוחלט להתקדם בשלב הנוכחי עם חלופה מספר 2 כפי שיוצג בפרקים הבאים.

4.1 שיפור מערכת האינטרפולציה להערכת המשקעים

4.1.1 גישת העבודה

במסגרת עבודת הפיילוט נעשה שימוש באינטרפולציית IDW עם חיפוש לפי רדיוס ומספר תחנות מוגבל, 15 ק"מ ו-1000 תחנות גשם בהתאמה (Zoccatelli at al., 2020, Rep-1). במסגרת העבודה הנוכחית בדקנו בשלב הראשון את השיפור המתקבל בהפעלת אינטרפולציית IDW ללא מגבלה על שטח ומספר התחנות לחיפוש. תוצאות הבדיקה העלו כי השיפור המושג (לפי פונקציות המטרה אשר יוצגו בהמשך הפרק) אינו משמעותי ועומד על פחות מ 1 [mm/d] במדד ה-Bias ופחות מ 0.03 [-] במדד ה-RSQ. יוצא דופן אחד הוא מדד ה-RSQ באזור הערבה (קבוצת South באיורים בפרק 3) בו אינטרפולציה לא מוגבלת ומוגבלת השיגו 0.4 [-] ו-0.27 [-] בהתאמה.

בסופו של דבר, ביחס לערכי המטרה שיפור זה אינו מספק. לכן העבודה התמקדה בהשוואת IDW עם רדיוס חיפוש מוגבל לעומת Kriging עם רדיוס חיפוש לא מוגבל. כאשר צריך לקחת בחשבון כי בתנאים של צפיפות רשת תחנות נמוכה חלק מסויים מן השיפור מושג בזכות הסרת ההגבלה על רדיוס החיפוש ולא בזכות שיפור שיטת האינטרפולציה.

4.1.1 פירוט שיטות האינטרפולציה

במסגרת העבודה נעשתה השוואה בין שתי שיטות אינטרפולציה:

- IDW
- Kriging

Inverse Distance Weighted Interpolation – IDW מתבססת על הביטוי הבא:

$$(1) Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

כאשר Z_p = ערך גשם חזוי בנקודת גריד j ; Z_i = ערך גשם מדוד בנקודה i ; d_i = מרחק בין נקודה i לנקודת הגריד j ; p = פקטור משקל למרחק.

החיסרון העיקרי של שיטת אינטרפולציה זו היא שהיא מתייחסת לאופן פירוס המשקעים בין הנקודות באופן אחיד במרחב ואינה מייצגת לכל ווקטור את אופן הפירוס שלו. לדוגמא, אם סביב נקודת גריד אחת יש 12 נקודות מדידה במרחקים שונים ההבדל היחיד בין הנקודות הוא המרחק תוך הנחה כי סביב הרדיוס כולו קיים יחס דעיכה קבוע כפונקציה של המרחק. קיימות שיטות להתגבר על הבעיה באמצעות הכנסת משתנים מרחביים כגון טופוגרפיה (Tao et al., 2017) אולם אין מדובר על התאמה של השונות המשותפת. גישה זו בעייתית במיוחד לגבי נתוני הגשם כיוון שפירוס הסופות אינו אחיד ומשתנה כפונקציה של מספר רב של גורמים.

היתרון העיקרי של שיטה זו הוא בקלות החישוב, יתרון זה הוא קריטי בפרויקט הנ"ל כיוון שחישוב האינטרפולציה נעשה באופן יומיומי לאורך 51 שנה כך שכח החישוב וזמן החישוב הנדרש גבוה במיוחד.

האינטרפולציה הוגדרה בהתאם לפרמטרים הבאים:

$p = 2$; $R = 0.3$; $N = 12$ כאשר: N – מספר תחנות; R – רדיוס חיפוש [מעלות]; p – מקדם מרחק [-]. כמו כן הוגדר כי ערך משקעים של פחות מ 1 מ"מ ליום הוא מתחת לסף הרגישות של האינטרפולציה.

Kriging – שיטת אינטרפולציה זו מבוססת על אלגוריתם המתבסס גם הוא על חיפוש ברדיוס נתון ומספר שכנים אך נותן משקל לדפוס פרוס המשקעים לאורך ווקטורים סביב נקודת הגריד המחושבת. האלגוריתם מתבסס על שני שלבים:

1. ניתוח סטטיסטי של פרוס ערכי הנקודות המדודות סביב הנקודה המחושבות.

a. יצירת ווקטורים של שונות (Variogram).

b. קביעת המשקלים בין הנקודות בהתאם לחוזק הקשר הסטטיסטי בין הנקודות.

2. חישוב הערכים החזויים בנקודות בהתאם למשקל ובהתאם לפירוס המרחבי בין הנקודות.

שיטה זו מתאימה במיוחד להערכת משקעים כיוון שהיא מתייחסת לפירוס המרחבי של המשקעים. עם זאת, צורת חישוב זו יכולה להיות "כבדה" יותר משמעותית מבחינת כוח החישוב הנדרש.

האינטרפולציה הוגדרה בהתאם לפרמטרים הבאים:

"lags=3 ; model = 'spherical". כאשר: [-] lags – המרחק היחסי לחישוב ה-Variogram.

בעבר בוצעו מספר עבודות אשר השוו בין שיטות האינטרפולציה השונות לאנליזת משקעים (Yunfei et al., 2007; Sarann et al., 2013). אולם מעטות העבודות אשר התייחסו לנושא בהקשר ההידרולוגי (Sarann et al., 2013) וביחוד בהקשר של השפעה על מודל למילוי החוזר. תוצאות ההשוואה העלו כי ל-Kriging ישנם יתרונות מסוימים בתיאור פירוס המשקעים (Yunfei et al., 2007) אולם לא נמצאה בחינה המשווה בין השיטות בתנאי אקלים וטופוגרפיה הדומים לישראל.

4.1.2 בניית מנגנון האימות

על מנת לבחון את אמינות שריגי המשקעים הופעל תהליך האימות הבא (איור 4.1):

1. בסיס הנתונים סווג לאזורים גיאוגרפים לפי החלוקה בפרק לעיל.

2. בכל אזור ולכל נקודת זמן חושבו השטחים המייצגים לתחנות בכל אזור בעזרת Voronoi Polygons (המוכרים גם כ-Thiessen Polygons).

3. לכל אזור z ולכל נקודת זמן t חושב שטח מנורמל לפי הנוסחה הבאה:

$$(2) RZ_t^z = 0.1 \cdot MA_t^z \cdot N_t^z$$

כאשר: $RZ [Km^2]$ – שטח מייצג מנורמל לכל אזור בכל צעד זמן, $N[-]$ – מספר תחנות גשם באזור בצעד הזמן, $MA [Km^2]$ – השטח החציוני של כל התחנות באותו אזור ובאותו צעד זמן.

השימוש בשטח מייצג מנורמל נועד לבדד את רכיב צפיפות רשת התחנות מההשפעה האזורית על ידי איזון בין שני הרכיבים בחלק הימני של המשוואה. כך למשל בערבה בה קיימות מעט תחנות ולכל תחנה שטח מייצג נרחב (N_t^z נמוך ו- MA_t^z גבוה) הערך המייצג יהיה דומה לערך באקוויפר החוף בו השטח החציוני של התחנות הוא נמוך כי יש מספר רב של תחנות (N_t^z גבוה ו- MA_t^z נמוך). האלגוריתם דגם באקראי את קבוצת התחנות באזור הנתון בצעד הזמן עד שסכום השטחים שלהן השיג את השטח המנורמל.

4. הקבוצה שנדגמה הוצאה מבסיס הנתונים הראשי ושמשה לאימות.
5. הופעל מודל האינטרפולציה.
6. בוצעה השוואה כמותית בין נפח הגשם היומי המדוד במדי הגשם בקבוצת האימות לבין הערכת המשקעים לפי האינטרפולציה המבוססת על הקבוצה הראשית.
7. בחינת התוצאות לפי פונקציות מטרה ובחלוקה לגורמי ההשפעה הבאים:
 - a. צפיפות הרשת בנקודת הזמן.
 - b. האזור הנבחר.
 - c. המצב הסינופטי בשעה 12 UTC באותו היום.
 - d. פיזור המשקעים (Autocorrelation).

בחירת פונקציות המטרה

תהליך האימות הכמותי בוצע בשני שלבים ובאמצעות פונקציות מטרה שונות: בשלב הראשון נבחנה התפלגות השגיאה היחסית בין המדידה לחישוב בכל צעד זמן ובכל נקודת שריג בהן נמצאת נקודת אימות לפי הביטוי הבא:

$$(3) \text{ Relative Error } [-] = C_i^t / O_i^t$$

כאשר: C_i – ערך חזוי בתא שריג i בנקודת זמן t ; O_i – ערך מדוד בנקודה המדודה המשוייכת לשריג i באותה נקודת הזמן.

כאשר הערך שואף ל-1 המשמעות היא שבכלל נקודות השריג להם משוייכת נקודת מדידה ישנה התאמה מרבית לערכים המדודים באותה נקודה. המטרה בבדיקה זו היא לתת הערכה ראשונית על מידת ההתאמה שמשיגה האינטרפולציה.

בשלב השני הוגדרו שתי פונקציות מטרה ונבחנה רמת האמינות של האינטרפולציה כפונקציה של גורמי ההשפעה בסעיף 7 לעיל:

1. Bias – מוגדר כהפרש הממוצע בין הנתונים המדודים לנתונים המחושבים בהתאם לביטוי הבא:

$$(4) \text{ Bias}[mm/d] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - C_i)$$

כאשר: n – מספר נקודות התצפית בקבוצה הנבחנת ושאר הרכבים בהתאם למשוואה מספר (3).

כאשר הערך שואף ל-0 המשמעות היא שהסטייה בין הנקודות המדודות לבין תאי השריג המחושבים שואפת לאפס.

2. RSQ – מוגדר כביטוי לעוצמת הקשר הלינארי בין המשתנים המדודים והחזויים לפי

הביטוי הבא (5) :

$$(5) \text{RSQ}[-] = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}}$$

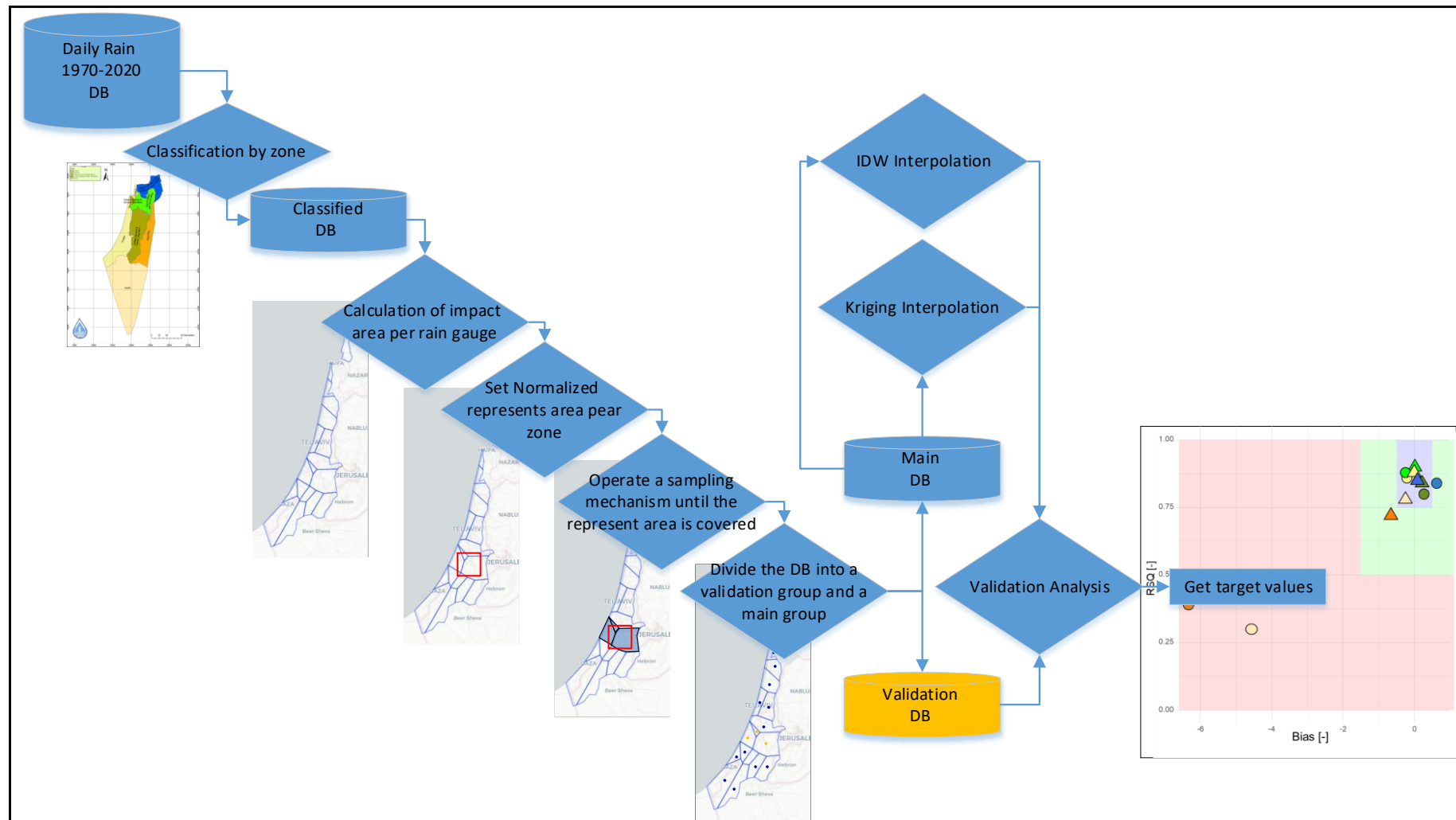
כאשר הערך שואף ל-1 המשמעות היא שהשונות המשותפת בין הנקודות המדודות לבין נקודות השריג המחושבות שואפת לערך המרבי.

השימוש בשתי פונקציות המטרה בא על מנת לתת תיאור מלא גם של הסטייה אשר יוצרת האינטרפולציה וגם למידת היכולת של האינטרפולציה לעקוב אחר המדידה.

הגדרת יעדי המטרה

הוגדרו שלוש רמות (ranks) לפונקציות המטרה המוגדרות בטבלה מספר 1:

- התאמה טובה – RSQ מעל 0.75 ו-Bias בטווח חצי mm/d.
- התאמה סבירה - RSQ מעל 0.5 ו-Bias בטווח אחד וחצי mm/d.
- התאמה נמוכה - RSQ מתחת 0.5 ו-Bias בטווח של יותר מאחד וחצי mm/d.

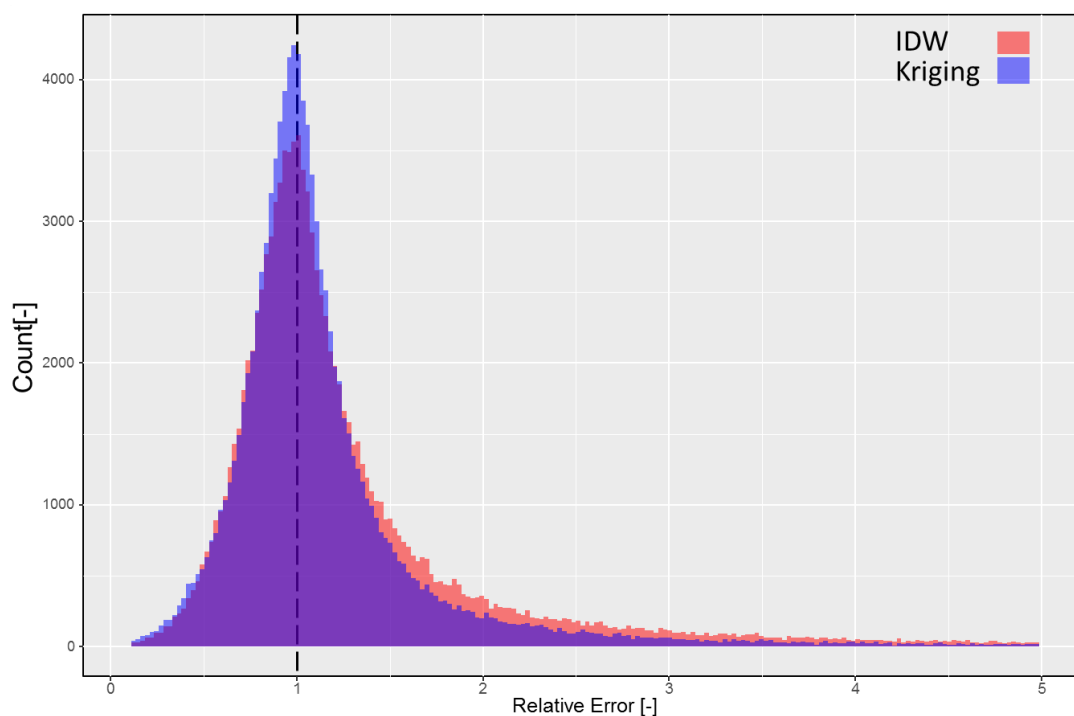


איור 4.1: אלגוריתם האימות

5. בחינת התוצאות

5.1 התפלגות השגיאה לפי Relative Error

איור 5.1 מציג את התפלגות השגיאה היומית לאורך השנים 1970-2020 בכל נקודות השריג. ניתן לראות כי מודל ה-kriging משיג התפלגות טובה יותר סביב ערך המטרה 1. כמו כן ניתן לראות את הערכת היתר של מודל ה-IDW הנגרמת ככל הנראה כתוצאה מפריסה אחידה של המשקעים ללא כיווניות מוגדרת. בחינה כמותית של ההתפלגות מעלה כי בטווח שגיאה של 50% מצויים לפי kriging 70% מנקודות האימות לעומת 66% מנקודות האימות לפי IDW. למרות שבראיה כללית נראה כי מדובר בשיפור יחסית מינורי יש לבחון האם שיפור מאפשר לייצג בצורה טובה יותר אזורים בהם יכולת האינטרפולציה באמצעות IDW אינה טובה. חשוב לציין כי בשלב זה לא בוצע נרמול של השגיאה עם סך המשקעים ולכן בחינה זו רגישה לשגיאות הנגרמות כאשר נפח המשקעים נמוך.



איור 5.1: התפלגות השגיאה היחסית לאורך כל תקופת האימות

5.2 ניתוח רגישות

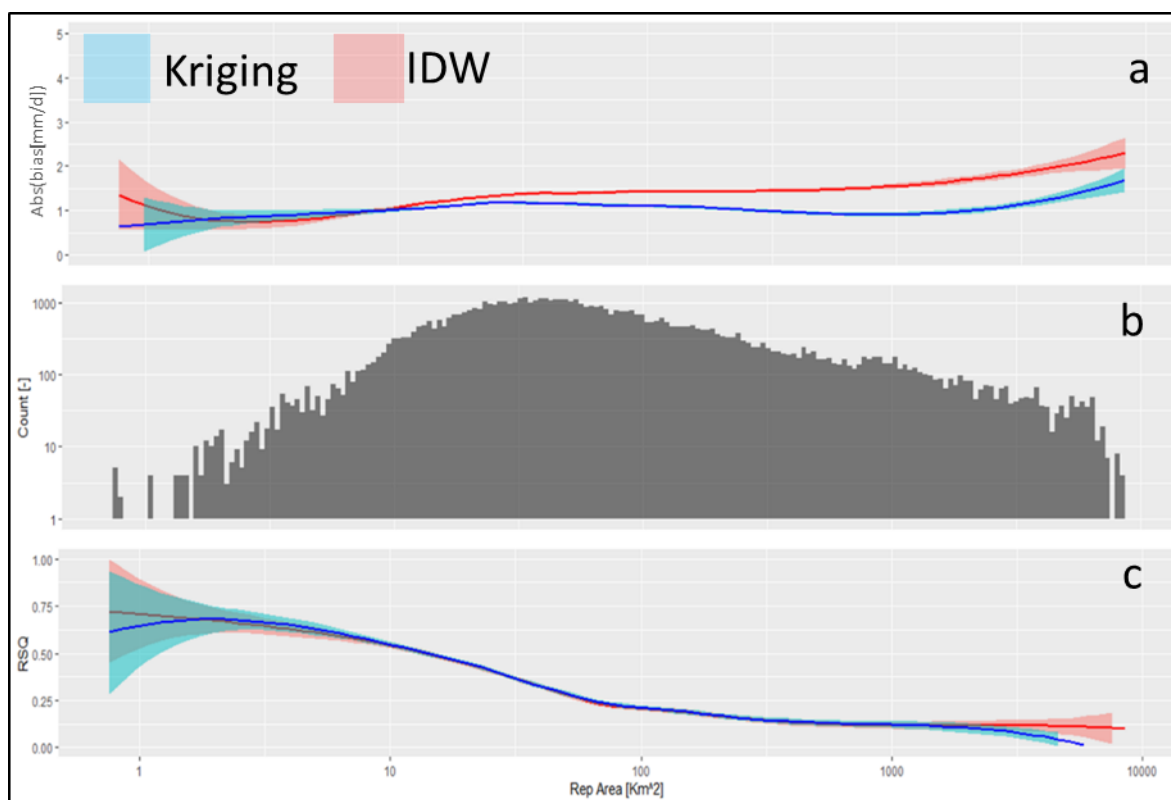
ניתוח הרגישות התייחס לגורמים המשפיעים על רמת האינטרפולציה:

1. צפיפות רשת התחנות.
2. האזור (בהתאם לחלוקה המפורטת בפרק 3 למעלה).
3. המצב הסינופטי.

4. רציפות המשקעים.

5.2.1 צפיפות רשת התחנות

צפיפות רשת התחנות מנורמלת יחסית על ידי אלגוריתם האימות כפי שהוצג בפרק הקודם, עם זאת בחינה ישירה של השגת ערכי המטרה לפי השטח המייצג (איור 5.2) מראה כי לגודל השטח המייצג השפעה משמעותית על אמינות האינטרפולציה, השפעה זו באה לידי ביטוי בעיקר במדד ה-RSQ בשני המודלים (איור 5.3-c) כאשר באופן מפתיע דווקא אינטרפולציה בשיטת IDW משיגה ערכים מעט יותר גבוהים בתנאים בהם יש מעט מאוד תחנות (מעל 5,000 קמ"ר לתחנה). לעומת זאת שיטת Kriging מושפעת פחות מצפיפות הרשת ומצליחה לשמור על ערכי Bias יציבים ונמוכים גם בתנאי צפיפות נמוכה (איור 5.3-a).

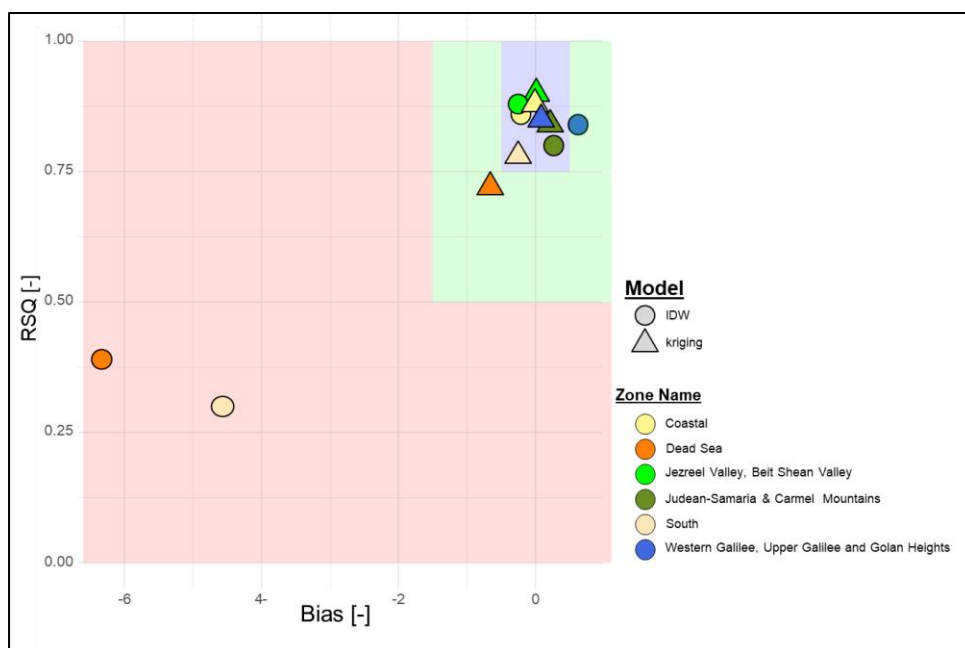


איור 5.3: השוואת השגת יעדי המטרה על ידי מודלי האינטרפולציה השונים כפונקציה של גודל השטח המייצג של התחנה. (a) הערכים המוחלטים של פונקציית ה-Bias. (b) מספר המופעים (היסטוגרמה) של ערכים מדודים מול ערכים מחושבים בכל צפיפות. (c) ערכי פונקציית RSQ.

5.2.1 אזורים

איור 5.2 מציג את מידת הצלחת שיטות האינטרפולציה השונות להשיג את ערכי המטרה באזורים השונים, ניתן לראות כי שני המודלים משיגים במרבית האזורים התאמה טובה (הטווח הכחול) כאשר אינטרפולציית ה-Kriging משיגה התאמה מעט יותר טובה. עם זאת נראה כי יש אזורים בהם אינטרפולציית ה-Kriging משיגה התאמה משמעותית יותר טובה. ניתן לראות כי בשונה מבחינת הרגישות לפי צפיפות רשת התחנות הבחינה לפי אזורים מעלה כי יש הבדל משמעותי בין רמת מודלי האינטרפולציה שאינה קשורה לצפיפות רשת התחנות אלא לאזור ההידרומטאורולוגי, כך לדוגמא ניתן לראות כי באזור ים המלח והערבה מודל ה-IDW אינו מצליח לעלות מעל $RSQ\ 0.5$ ונותן הערכת יתר גבוהה המגיעה למילמטרים רבים בממוצע. חשוב להדגיש כי לא ניתן להבחין בהבדלים אלו כלל כאשר בוחנים את ערכי פונקציית המטרה רק לפי צפיפות רשת התחנות כפי שהוצג למעלה. הבדל זה יכול לנבוע משני גורמים שונים:

1. שכיחות גבוהה של מצבים סינופטיים מורכבים למידול באזורים המדבריים.
2. אחידות פיזור משקעים שונה (Autocorrelation) באזורים המדבריים.

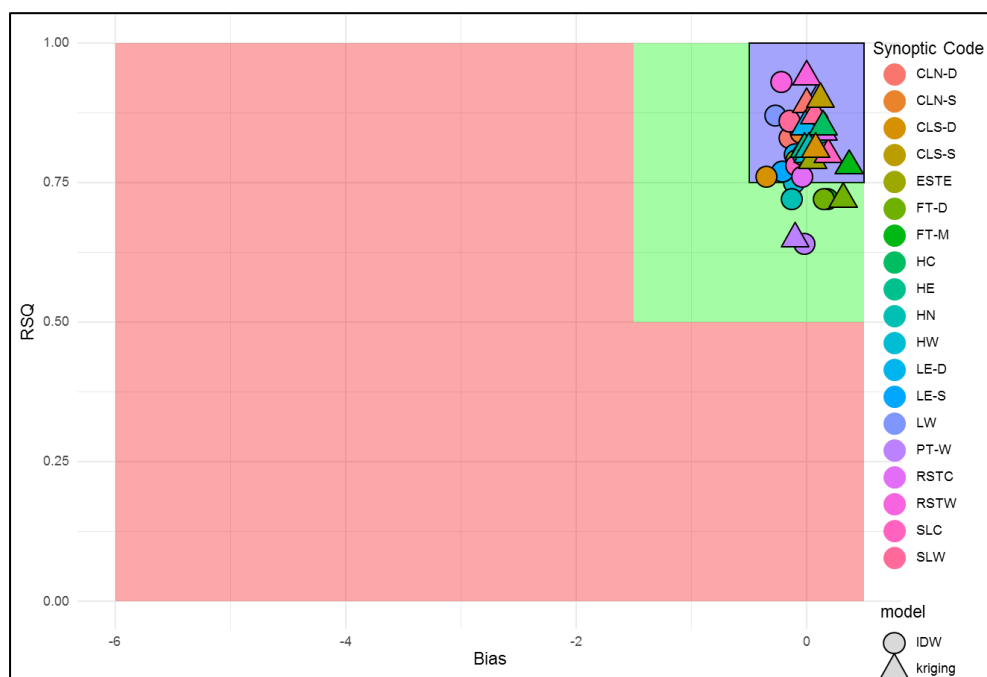


איור 5.2: השוואת השגת יעדי המטרה על ידי מודלי האינטרפולציה השונים כפונקציה של האזור.

5.2.2 מצבים סינופטיים

סיווג המצבים הסינופטיים הוגדרו על ידי אלפרט וחוב' (Alpert et al., 2004) ברמה יממתית (ערך אחד ליום בשעה UTC 12 לפי 19 מצבים סינופטיים). בחינת התוצאות מראות כי למעט בתנאים של אפיק פרסי חלש (PT-W) אין השפעה למצב הסינופטי ערכי פונקציות המטרה (איור 5.3), בהתחשב

בעובדה שמדובר במצב סינופטי טיפוסי של עונת הקיץ אשר אינו נוגע להערכת המילוי החוזר אין להבדל זה משמעות לניתוח הנוכחי. כמו כן, אין הבדל ברמת האינטרפולציה בין IDW לבין Kriging כך שלא ניתן לקבוע כי זהו הגורם להבדל בין האזורים.



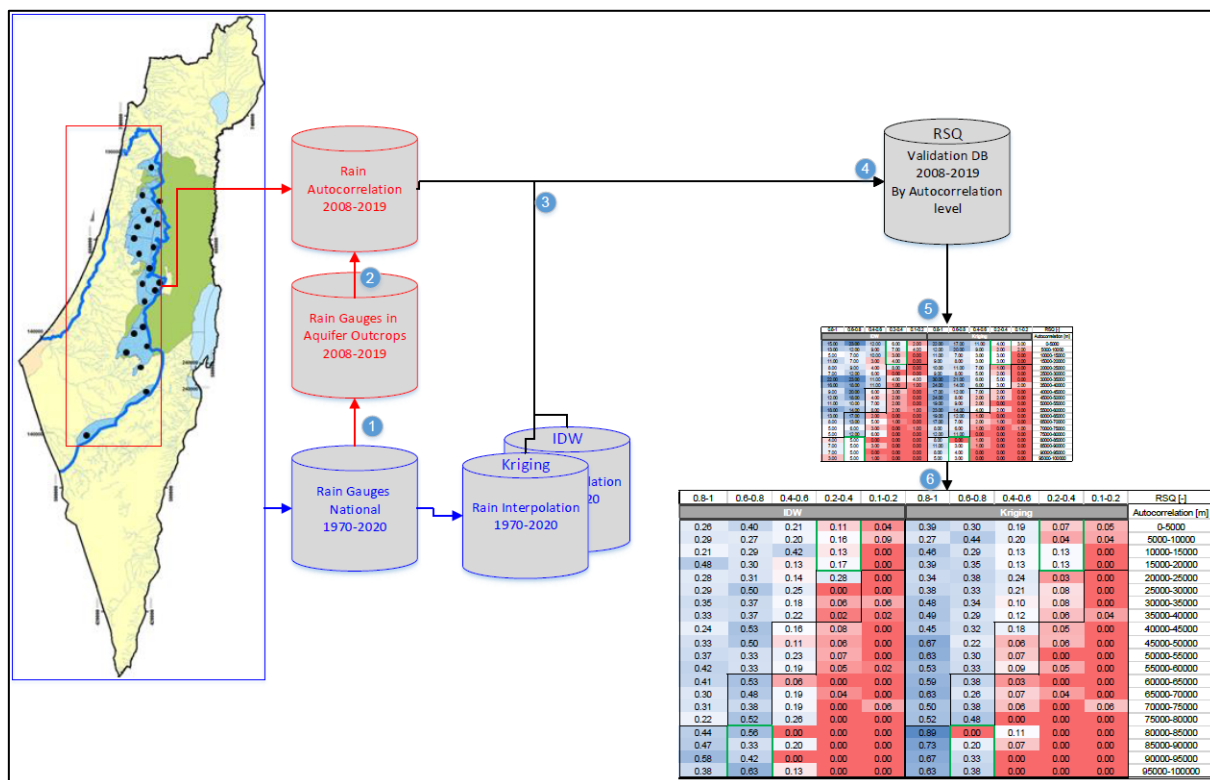
איור 5.3: השוואת השגת יעדי המטרה על ידי מודלי האינטרפולציה השונים כפונקציה של המצב הסינופטי.

5.2.3 פיזור המשקעים (Autocorrelation)

אוטוקורלציה מרחבית (spatial autocorrelation distance) של המשקעים הינה מדד לרמת אחידות הפיזור של המשקעים במרחב ולמעשה הינה ייצוג האנאזוטרופיות של המשקעים כפונקציה של המרחק (Marra, F., Morin, E., 2018). במסגרת עבודת הפיילוט המקדימה לעבודה זו (Zoccatelli et al., 2020), חושבה האוטוקורלציה למשקעים באזור המחשופים של אגן ירקון תננים בין השנים 2019-2008. במסגרת שלב האימות בוצע ניתוח של ערך מקדם המתאם אל מול רמת האוטוקורלציה של המשקעים. אלגוריתם האימות (איור מספר 5.4) התבסס על השלבים הבאים:

1. חילוץ המשקעים המדודים בתחנות הגשם באזור מחשופי אקוויפר ירקון תננים בין השנים 2019-2008.
2. שיוך ערכי האוטוקורלציה היומיים לימים בהם ישנם ערכים מדודים (ערך יחיד לכל יום גשם).
3. שיוך ערכי המשקעים המדודים לנתונים המחושבים על בסיס מיקום בשריג האינטרפולציה.
4. חישוב מקדמי המתאם בכל יום בו יש נתוני אוטוקורלציה בין הנתונים המדודים לנתונים המחושבים.

5. חלוקה למקטעים שווים (ranking) של ערכי האוטוקורלציה ומקדמי המתאם ובניית מטריצת צפיפות לפי מספר האירועים בכל קטגוריה והסרת ערכי קיצון: $RSQ < 0.1$ ו- $10^5 < autocorrelation$.
6. נרמול המטריצה לפי מספר יחסי של אירועים בכל רמת אוטוקורלציה.



איור 5.4: האלגוריתם לבחינת השפעת רציפות המשקעים (אוטוקורלציה) על רמת האינטרפולציה המרחבית. כל שלב באיור מקביל לשלב בגוף הדוח למעלה (פרק 5.2.3).

תוצאות בחינת הרגישות מעלה (איור 5.5) כי ככל שהמשקעים אחידים יותר ערך מקדם המתאם גבוה יותר. עם זאת ניתן לראות כי דפוס זה ברור יותר באינטרפולציית Kriging בהשוואה ל-IDW. השוואה בין שתי האינטרפולציה מעלה כי Kriging משיגה ערכי מקדם מתאם גבוהים משמעותית בכל רמות רציפות המשקעים. למעשה באירועים בעלי רציפות נמוכה ($Auto' < 20,000$ m) אינטרפולציית Kriging מצליחה להגיע למתאם 0.8 ומעלה בכ-40% מהאירועים בעוד אינטרפולציית IDW מצליחה להגיע ל-0.8 ומעלה בכ-30% מהאירועים, שיפור של 25%. בטווח הרציפות השכיח ביותר ($30,000$ m $< Auto' < 45,000$ m) אינטרפולציית Kriging מצליחה להגיע למתאם 0.8 ומעלה בכ-50% מהאירועים בעוד אינטרפולציית IDW מצליחה להגיע ל-0.8 ומעלה בכ-30% מהאירועים, שיפור של 40%. ערכים דומים ניתן לראות גם באירועים בעלי רציפות גבוהה. תוצאות ניתוח הרציפות עולות בקנה אחד עם תוצאות הניתוח לפי אזורים (פרק 5.2.1 לעיל) המצביעות על כך שבאזורים בעלי רציפות משקעים נמוכה אינטרפולציית

Kriging משיגה ערכים גבוהים משמעותית.

0.8-1	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	0.1-0.2	0.8-1	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	0.1-0.2	RSQ [-]
IDW					Kriging					Autocorrelation [m]
0.26	0.40	0.21	0.10	0.03	0.39	0.30	0.19	0.07	0.05	0-5000
0.29	0.27	0.20	0.16	0.09	0.27	0.44	0.20	0.04	0.04	5000-10000
0.20	0.28	0.40	0.12	0.00	0.46	0.29	0.13	0.13	0.00	10000-15000
0.44	0.28	0.12	0.16	0.00	0.39	0.35	0.13	0.13	0.00	15000-20000
0.28	0.31	0.14	0.28	0.00	0.34	0.38	0.24	0.03	0.00	20000-25000
0.28	0.48	0.24	0.00	0.00	0.38	0.33	0.21	0.08	0.00	25000-30000
0.34	0.36	0.17	0.06	0.06	0.48	0.34	0.10	0.08	0.00	30000-35000
0.34	0.38	0.23	0.02	0.02	0.49	0.29	0.12	0.06	0.04	35000-40000
0.24	0.53	0.16	0.08	0.00	0.45	0.32	0.18	0.05	0.00	40000-45000
0.33	0.50	0.11	0.06	0.00	0.67	0.22	0.06	0.06	0.00	45000-50000
0.37	0.33	0.23	0.07	0.00	0.63	0.30	0.07	0.00	0.00	50000-55000
0.42	0.33	0.19	0.05	0.02	0.53	0.33	0.09	0.05	0.00	55000-60000
0.41	0.53	0.06	0.00	0.00	0.59	0.38	0.03	0.00	0.00	60000-65000
0.30	0.48	0.19	0.04	0.00	0.63	0.26	0.07	0.04	0.00	65000-70000
0.33	0.40	0.20	0.00	0.07	0.50	0.38	0.06	0.00	0.06	70000-75000
0.22	0.52	0.26	0.00	0.00	0.52	0.48	0.00	0.00	0.00	75000-80000
0.44	0.56	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.11	0.00	0.00	80000-85000
0.47	0.33	0.20	0.00	0.00	0.73	0.20	0.07	0.00	0.00	85000-90000
0.58	0.42	0.00	0.00	0.00	0.67	0.33	0.00	0.00	0.00	90000-95000
0.33	0.56	0.11	0.00	0.00	0.63	0.38	0.00	0.00	0.00	95000-100000

איור 5.5: רמת האינטרפולציה כפונקציה של רציפות המשקעים (אוטוקורלציה). הערכים במטריצת הצפיפות הינם מספר אירועים יחסי מתוך כלל האירועים באותה רמת הרציפות.

6. השפעת נתוני הקלט השונים על המודל ההידרולוגי

מודל המילוי החוזר DREAM צומד למודל ההידרולוגי מסוג אלמנטים סופיים (על תשתית FeFlow). שני המודלים נבנו לאקוויפר ירקון תנינים על ידי האוניברסיטה העברית (Dafny et al., 2009, Sheffer et al., 2009) ועודכנו במסגרת הפרויקט הנוכחי עד לשנת 2020. תקופת האימות נקבעה בין השנים 2003-2018. הפרמטר לאימות הוגדר כמפלס מי התהום, זאת תחת ההנחה כי במסגרת ההשוואה בין מקורות הגשם השונים ניתן להתייחס לאקוויפר כמערכת סגורה בה השינוי באקוויפר הינו פונקציה של השאיבה מן האקוויפר והמילוי החוזר ממשקעים.

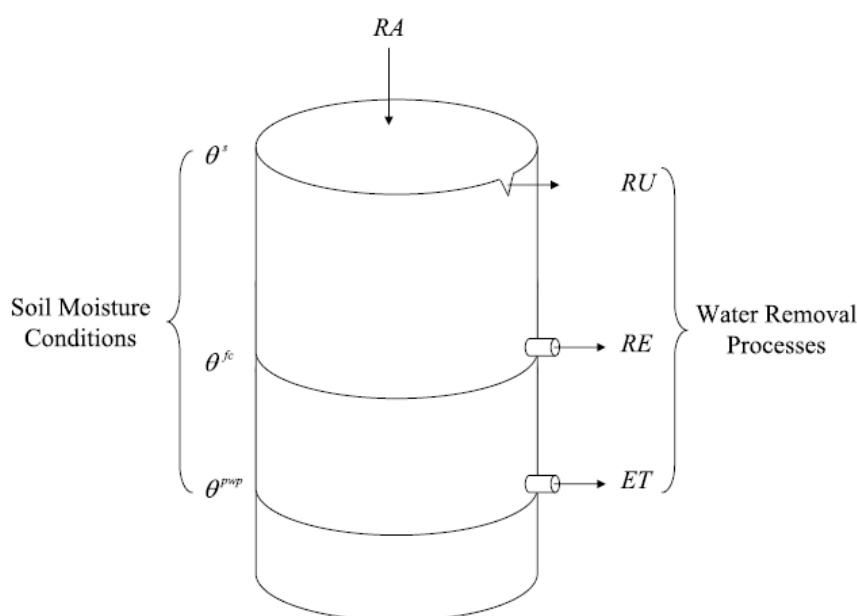
6.1 מודל המילוי החוזר DREAM

מודל ה-DREAM פותח (Sheffer, 2009) כמודל רשתי ייעודי לאקוויפר ירקון תנינים. ייחודו העיקרי של המודל הוא במתן פתרון ברמה יומית למשוואות מאזן המים. בכך המודל מתגבר על חסרונות משמעותיים של מודלים קודמים המנסים לקשור באופן סטטיסטי בין הגשם לבין המילוי החוזר ללא התייחסות למחזורי הייבוש וההרטבה של הקרקע (Lerner et al., 1990; Bredenkamp et al., 1995). המודל מתייחס לעמודת הקרקע כחבית פתוחה (Sheffer et al., 2010; Sheffer, 2009) בה תכולת המים משתנה כפונקציה של יכולת הקרקע להכיל מים וכמות המים המצויה בקרקע מראש (איור 6.1), בהתאם למשוואת המאזן הבאה:

$$(4) Z_n \theta(t+1, i) = Z_n \theta(t, i) + RA(t, i) - ET(t, i) - RE(t, i) - RU(t, i)$$

כאשר:

RA - עובי משקעים [mm/d], ET - אידי-ודיות אקטואלי [mm/d], RE - מילוי חוזר [mm/d], RU - נגר יומי [mm/d], Z_n - עובי קרקע אפקטיבי [mm] לפי סוג הקרקע n , θ - תכולת רטיבות יחסית [-], t - יום, i - תא מודל מתוך רשת המודל. (המשוואה מוצגת בצורה אינטגרלית).
*יש לשים לב כי משוואת המאזן אינה מוצגת בצורה דיפרנציאלית ולכן היחידות לכאורה אינן מתכנסות, בפועל כל רכיבי המשוואה משתנים של dt (ברכיב $Z_n \theta dt$ שווה ל-1).



איור מספר 6.1: מבנה סכמתי של תא במודל המילוי חוזר DREAM (Sheffer et al., 2010).

פירוט שלם של מודל ה-DREAM, תהליך העדכון שלו וההתאמה למודל הארצי יוצג בשלב הבא של עבודה זו.

6.2 המודל ההידרוגיאולוגי

המודל ההידרוגיאולוגי לאקוויפר ירקון תנינים הועמד וכויל (Dafny., 2009) כמודל מסוג אלמנטים סופיים המממש פתרון של משוואות הזרימה בתווך הרווי לאורך האלמנטים של רשת המודל. המודל נבנה על גבי מודל גיאולוגי קונספטואלי מקיף אשר הוקם לאקוויפר על בסיס מיפוי גג חב' יהודה (Fleischer and Gafsou, 1993) וניתוח המבנה הסטרוקטורלי על בסיס בארות נפט ומקורות נוספים (Fleischer and Varshavsky, 2002) וכויל אל מול מספר רב של בארות מייצגות במעלה האקוויפר, באזור התפעולי ובמוצא האקוויפר.

6.3 ניתוח התוצאות

גם בשלב זה תהליך האימות הכמותי בוצע בשני שלבים ובאמצעות פונקציות מטרה שונות, כאשר בשלב הראשון נבחנה התפלגות השגיאה לפי פונק' Relative Error ובשלב השני נעשה שימוש בפונקציות Bias-I RSQ כפי שיוסבר להלן.

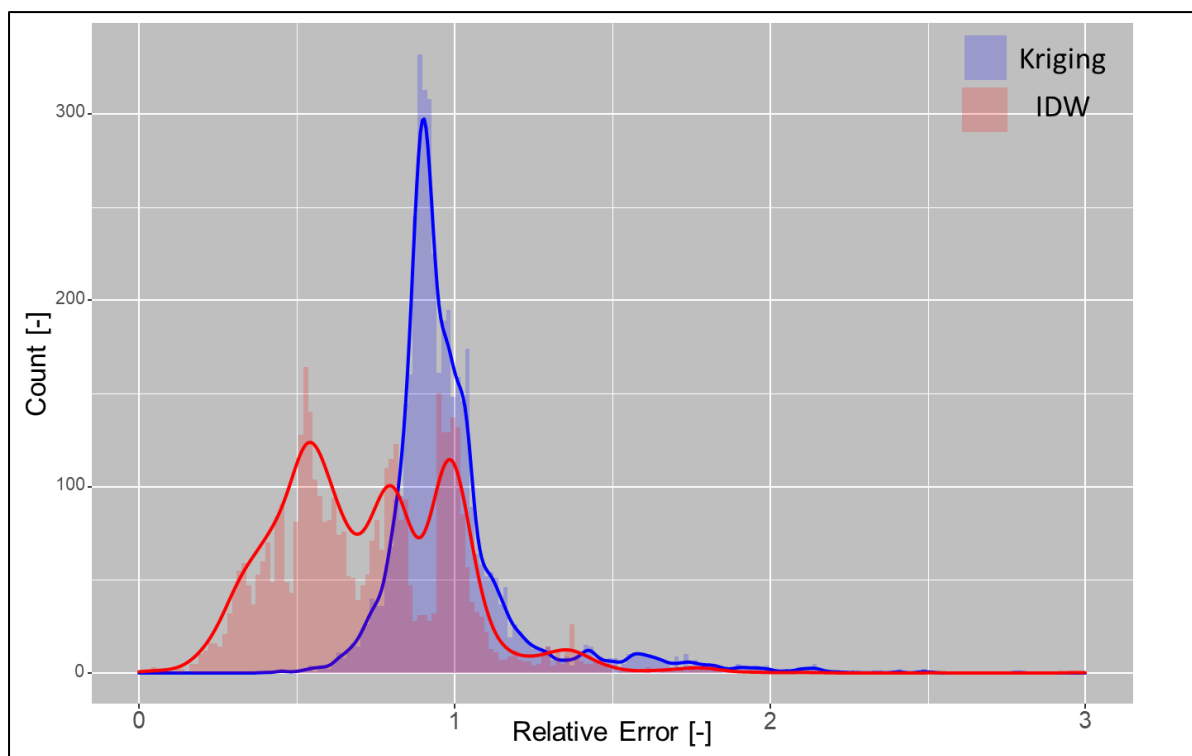
6.3.1 בחינה כללית של התפלגות השגיאה

איור מספר 6.2 מציג את התפלגות השגיאה היחסית במפלסי מי התהום לאורך כל תקופת האימות, לפי:

$$(6) \text{Relative Error}_{well}^t = WL_{well-model}^t / WL_{well-measure}^t$$

כאשר: $WL_{well-measure}^t$ - מפלס מדוד בקידוח תצפית בנקודת זמן t ; $WL_{well-model}^t$ - מפלס חזוי בקידוח תצפית בנקודת זמן t .

כאשר ערך השגיאה שואף ל-1 המודל מגיע לדיוק המרבי. ניתן לראות כי באופן כללי המודל מציג הערכת חסר לעומת הנתונים המדודים בכל אחת מן השיטות. עם זאת השימוש ב-Kriging מקטין משמעותית הן את רמת הערכת החסר והן מידת הפיזור שלה. למעשה, ייתכן כי הפיזור הצפוף יחסית של הערכת החסר מצביע על רכיב כניסה לאקוויפר ממקורות שאינם עיליים כגון גופי מים מלוחים המצויים במאזן עם האקוויפר או על השפעה של זרימה רב-שנתית אשר המודל אינו מייצג. עוד ניתן לראות כי לעומת נתוני המשקעים בהם ההבדל בין שיטות האינטרפולציה הינו מועט (איור 5.1 להלן) בנתוני מי התהום ההבדל הינו דרמטי, כאשר היחס הממוצע בין המודל למדידה לפי Kriging הינו 1.07 וסטיית התקן הינה 1.56 ואילו לפי WDO היחס הממוצע הינו 0.77 וסטיית התקן הינה 1.1. הסיבה להבדל בין התפלגות שגיאת המשקעים לבין שגיאת המפלסים מצוי בקשר הלא ליניארי בין המשקעים לבין המילוי החוזר. כפי שהוצג במסגרת עבודת הפיילוט המקדימה לעבודה זו (Zocatelli et al., 2020, Rep-5) שגיאה קלה בהערכת המשקעים מובילה להנעת תהליך המילוי החוזר או לעצירה שלו ובהתאם לכך הרגישות לשגיאה עולה.



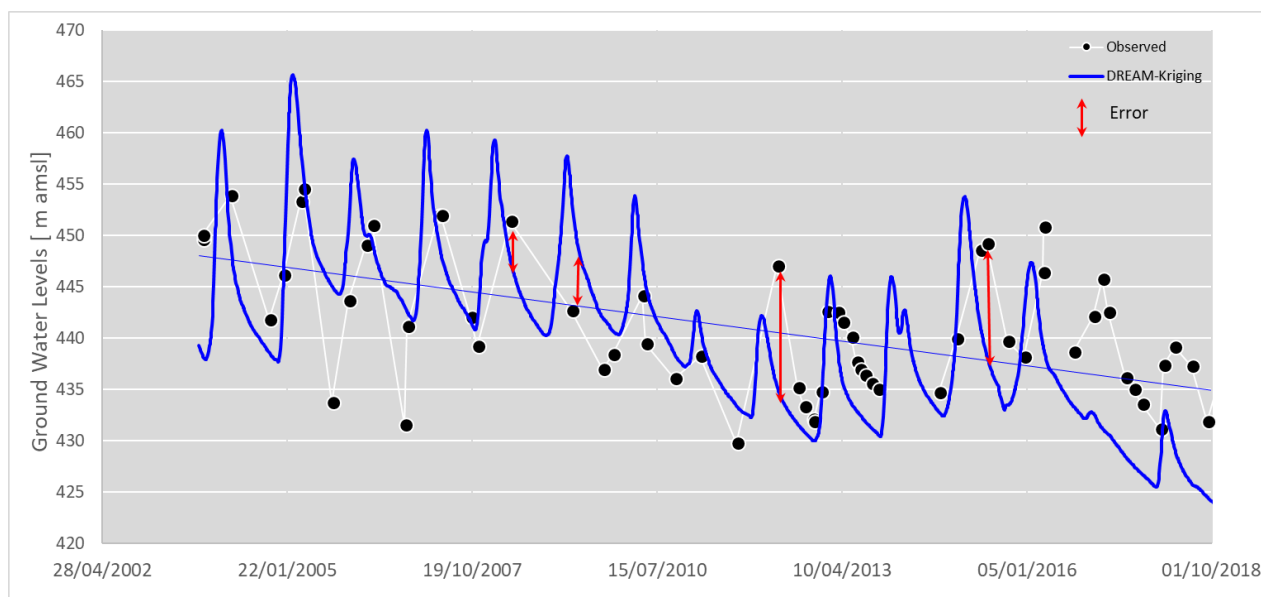
איור 6.2: התפלגות השגיאה היחסית במפלסי מי התהום לפי מקורות המשקעים השונים.

6.3.2 בחירת פונקציות המטרה ורזולוציית הזמן

פונקציות המטרה הוגדרו בדומה לשלבים הקודמים כ-RSQ לביחנת תאימות המגמות ו-Bias לשם בחינת הסטייה. בחינת התוצאות הגולמיות העלתה כי שימוש ישיר בפונקציות המטרה הינה בעייתית משתי סיבות עיקריות:

1. **דפוסי המשקעים** – בשונה מנתוני המשקעים, נתוני המפלסים מושפעים מתהליכים ארוכי טווח. בתנאי הכליאה המצויים במורד האקוויפר השפעה זו ממתנת את תנודות המפלס ומאפשרת התאמה טובה בין נתוני המודל לבין נתוני המדידה. לעומת זאת, באזורי המילוי החוזר בו האקוויפר מצוי במצב חופשי המפלסים מושפעים באופן חזק יותר מאירועי המשקעים. השפעה זו יוצרת Lag-time המשפיע על מיקום המפלס. במידה וה-Lag-time אינו מדויק אפילו במעט תיווצר סטייה משמעותית מאוד בין הערכים המדודים לערכים המחושבים, זאת למרות שברזולוציה עונתית או חודשית ההתאמה הינה דווקא טובה (איור 6.3).
2. **מגמות המשקעים** – כאמור, מגמות המשקעים משתנות כפונקציה של תהליכים ארוכי טווח. בהתאם לכך, באזורים רבים מגמות המפלס הינן יציבות לאורך תקופות ארוכות. במקרה כזה פונקציית מקדם המתאם (RSQ) הינה רגישה מאוד לשינויים הקלים ביותר בין הנתונים המדודים לנתונים המחושבים ותציג ערכים נמוכים גם במקרים בהם ההתאמה גבוהה.

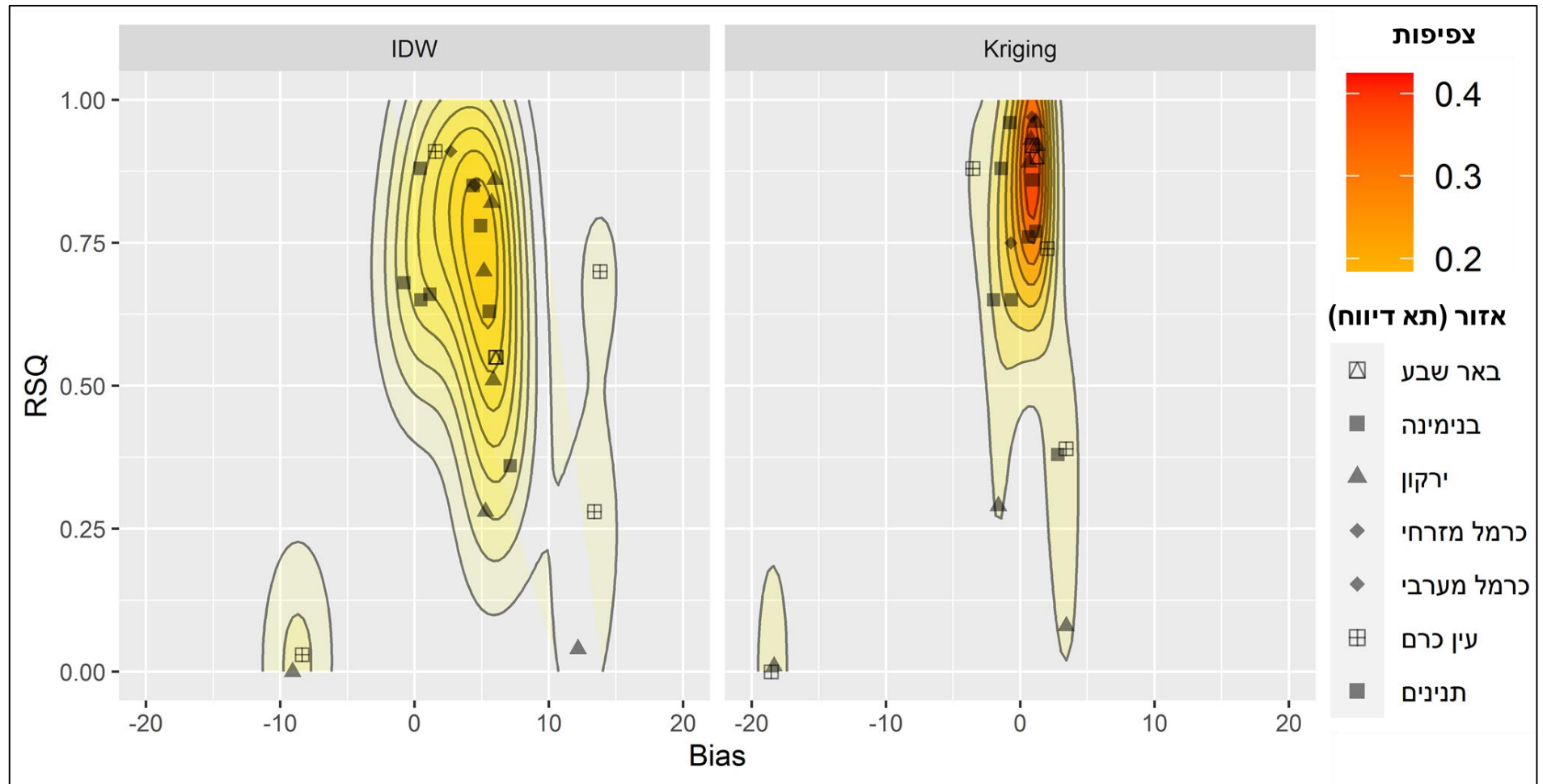
בכדי להתגבר על הבעיות האמורות, מידת ההתאמה נבחנה ברזולוציה חודשית (לפי ממוצע חודשי) ונעשה שימוש בפונקציית RMSD במקרים בהם היה צורך בבחינה נוספת של התוצאות.



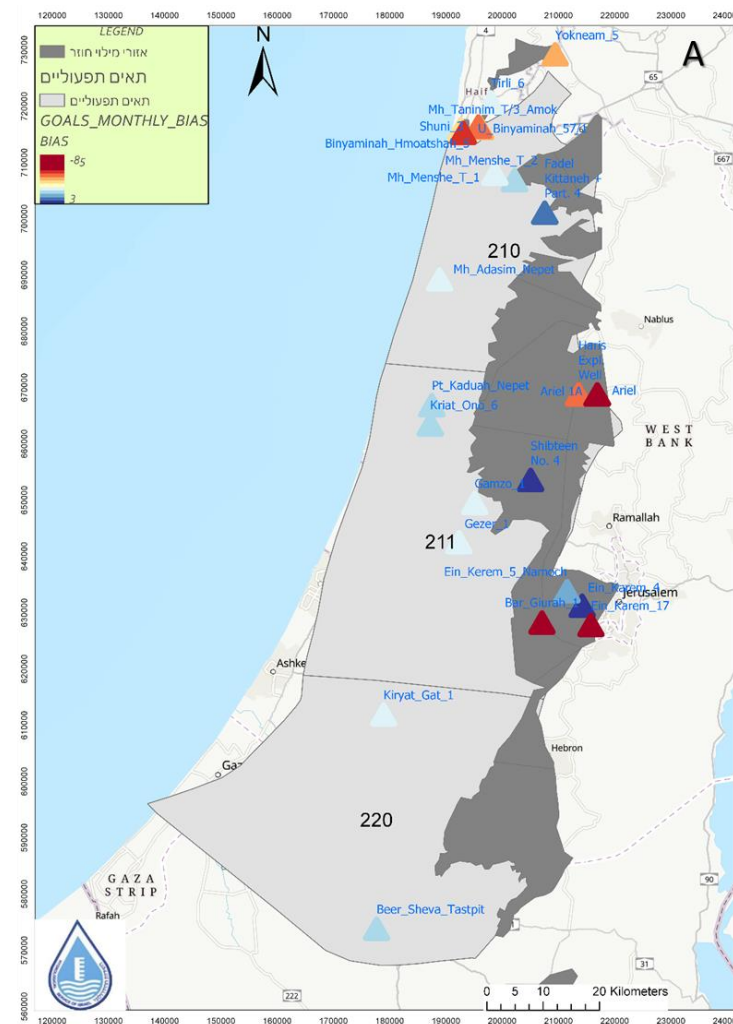
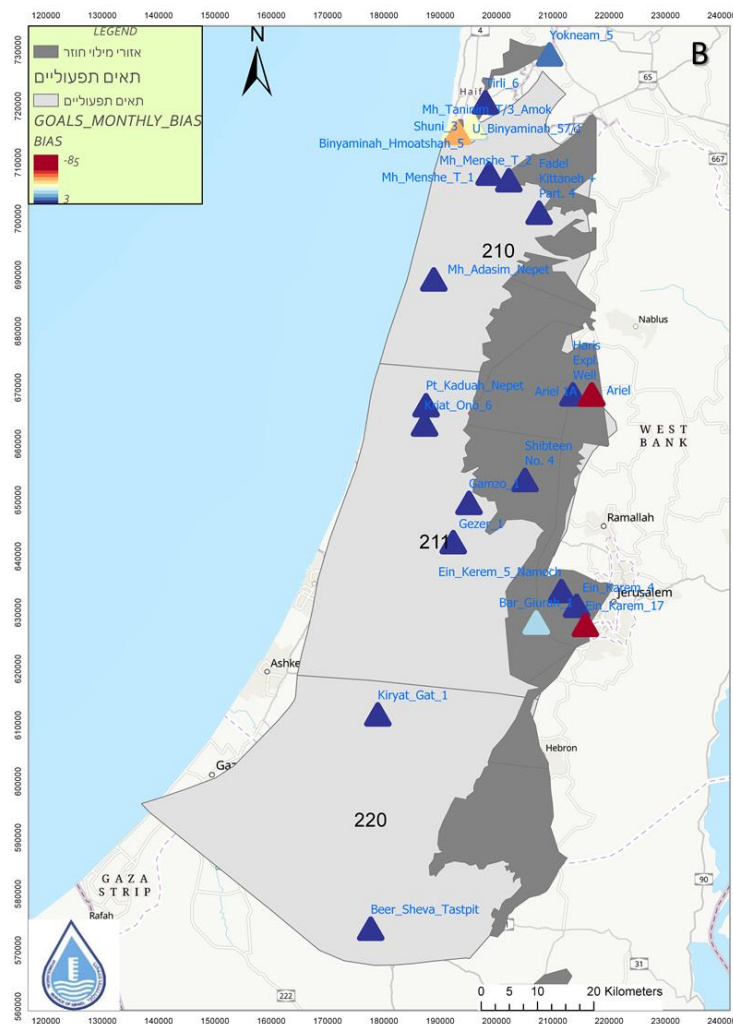
איור מספר 6.3: דוגמא לסטיות התאימות בין המודל לבין הנתונים המדודים בקידוח "עין כרם 4" המצוי במעלה האקוויפר. בחצים האדומים מוצגת השגיאה הנגרמת כתוצאה מה-lag time.

6.3.3 ניתוח התוצאות

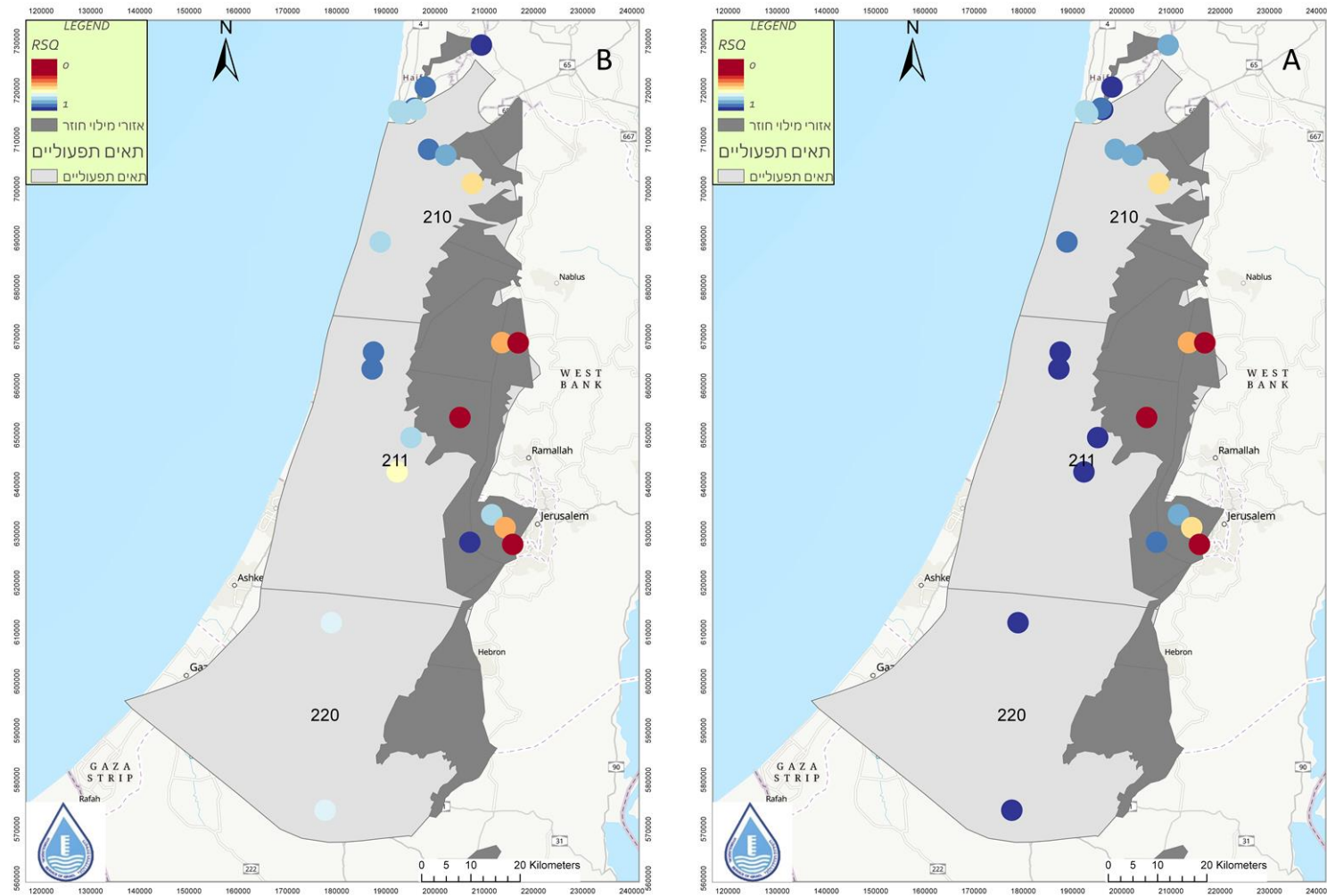
איור 6.4 מציג את ערכי פונקציות המטרה על רקע מרחב הפונקציות בהתחשב באזורים השונים. איורים 6.5 ו-6.6 מציגים את ערכי פונקציות המטרה לאורך האקוויפר. כפי שניתן לראות, השימוש ב-Kriging משיג תיאור טוב יותר משמעותית הן מבחינת צמצום הסטייה והן מבחינת שחזור המגמות. ככלל, נתוני Kriging משיגים אזור אופטימום גבוה ומרוכז ($RSQ=0.9$; $Bias=2$) בהשוואה לנתוני IDW ($RSQ=0.75$; $Bias=7$) תחת תנאים ואזורים שונים. מאפיין זה הינו בעיקר בייחס לתיאור הסטייה (Bias) ופחות בייחס לתיאור המגמה (RSQ) בו אמנם אזור האופטימום גבוה יותר אך הפיזור רחב יחסית. הסיבה לכך היא הרגישות של מדד זה לתנאי יציבות. במקביל ניתן לראות כי במורד האקוויפר ה-Bias החיובי המתקבל ב-IDW (גווני כחול במפה 6.4) מתאזן ב-Kriging (גווני תכלת-לבן). המתאם ב-Kriging שואף לערך המרבי במורד האקוויפר ובמעלה האקוויפר בו המגמות רגישות לתנודות התוך עונתיות המתאם נמוך יותר אך עדיין גבוה יותר בהשוואה ל-IDW. ייתכן כי כיוול מחדש של המודל באזורים אלו יצליח להשיג שיפור משמעותי בתוצאות המתאם במעלה האקוויפר, זאת באמצעות תיאור מדויק יותר של זמן התגובה של האקוויפר. דוגמא להבדלים בין קידוחים במעלה ובמורד האקוויפר ניתן לראות באיורים 6.7-6.8.



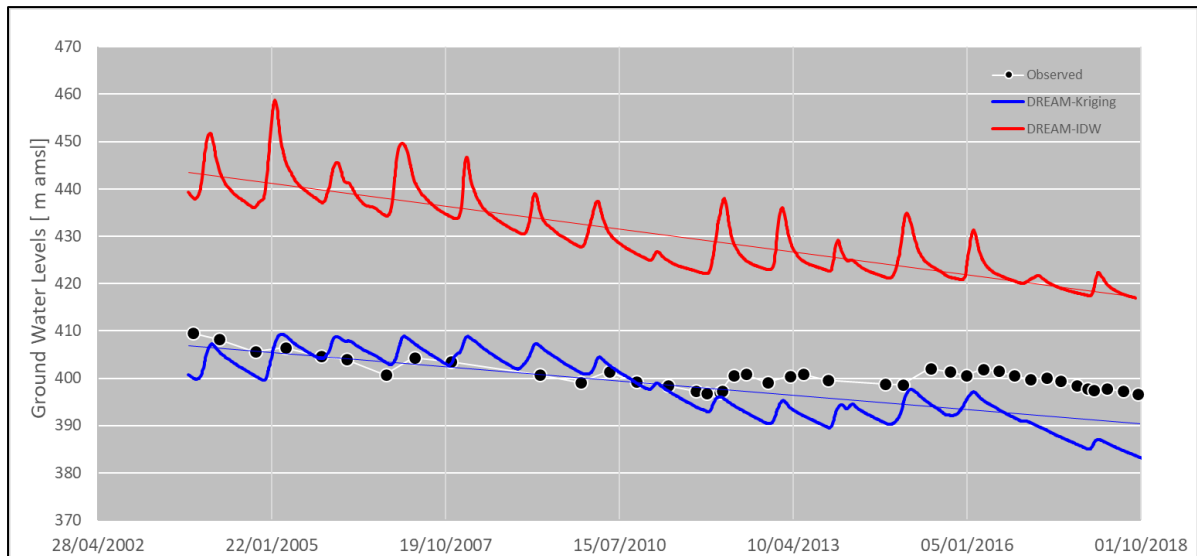
איור 6.4: ערכי פונקציות המטרה על רקע מרחב הפונקציות בהתחשב באזורים השונים.



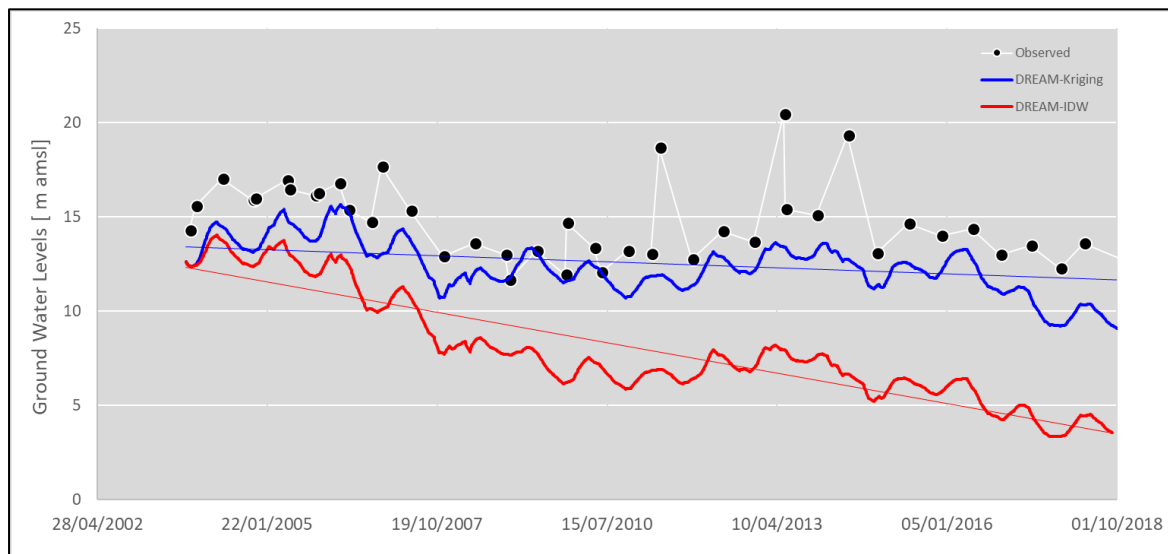
איור 6.5: ערכי ה-Bias לאורך האקוויפר עם נתוני Kriging (A) ו-IDW (B) בערכי mm/d. השגיאה אינה מתפלגת באופן נורמלי, באזור מעלה האקוויפר (אפור כהה), ישנן הערכות חסר נקודתיות משמעותיות ביחוד באינטרפולציית Kriging (A) אבל במורד האקוויפר הסטייה היא לכיוון הערכת יתר בייחוד באינטרפולציית IDW (B).



איור 6.5 ערכי ה-RSQ לאורך האקוויפר עם נתוני Kriging (A) ו-IDW (B)



איור 6.7: המפלסים המדודים והמחושבים בין השנים 2003-2018 בקידוח עין כרם 7 במעלה האקוויפר.



איור 6.8: המפלסים המדודים והמחושבים בין השנים 2003-2018 בקידוח שפלת לוד 29 במורד האקוויפר.

7. סיכום ומסקנות

עבודה זו הינה שלב בפרויקט מודל המילוי החוזר הארצי למי התהום. במסגרת שלב זה התמקדנו בבחינת שריגי המשקעים הארציים המשמשים כקלט למודל. שריגי משקעים אלו פותחו על בסיס המלצות עבודת הפיילוט אשר בוצעה לאקוויפר ירקון תנינים ובכללן הקביעה כי ניתן להשתמש בנתוני תחנות לצורך הערכת המילוי החוזר לאקוויפר אך יש לבדוק שיטות אינטרפולציה מתקדמות יותר לשם הקטנת השגיאה. ניתוח תוצאות בוצע בשתי רמות:

1. **בחינה ישירה** – אל מול נתוני המשקעים בתחנות גשם אשר שמשו כקבוצת אימות דינמית.
2. **בחינה עקיפה** – אל מול נתוני מפלסי מי התהום, באמצעות צימוד של מודל הידרוגיאולוגי למודל המילוי החוזר.

ניתוח התוצאות מעלה את המסקנות הבאות:

1. שינוי שיטת האנט' מ-IDW ל-Kriging מצליח להביא לשיפור בתיאור המשקעים.
2. שיפור זה הינו מינורי בתנאים בהם אחידות המשקעים גבוהה, במצבים בהם אחידות המשקעים נמוכה השיפור הינו משמעותי באופן ניכר.
3. באזורי הדרום והמזרח תחזית המשקעים באמצעות Kriging משיגה שיפור משמעותי לעומת IDW. הדבר מתכתב עם השיפור באחידות המשקעים.
4. בתנאים בהם צפיפות רשת התחנות נמוכה אך ישנה אחידות בפרוס המשקעים ניתן להשיג שיפור מסוים בתיאור המשקעים גם באמצעות שימוש ב-IDW עם רדיוס בחירה וחיפוש לא מוגבלים.
5. שימוש באינטרפולצית Kriging מובילה לשיפור משמעותי ביותר בתחזית המפלסים.
6. שיפור זה הינו הן בתיאור המגמות והן בשיפור הסטייה ומופיע הן בבארות המצויות בתנאים חופשיים (מעלה האקוויפר) ובבארות המצויות בתנאי כליאה (מורד האקוויפר).
7. עם זאת, בבארות המצויות בתנאים חופשיים ומושפעות מהזרימה העילית עיקר השיפור מתקבל בבחינת התוצאות ברזולוציה חודשית. זאת כיוון שתיאור מדויק של זמן התגובה לאקוויפר הינו מורכב ודורש כיוול מלא של המודל ההידרוגיאולוגי.

8. ביבליוגרפיה

- Alpert P., Osetinsky I., Ziv B. and Shafir H., 2004 "A new seasons definition based on the classified daily synoptic systems : An example for the Eastern Mediterranean", International Journal of Climatology, 24, 1013-1021, 2004. <http://www.tau.ac.il/~pinhas/publications.htm>
- Alpert P., Osetinsky I., Ziv B. and Shafir H., 2004 "Semi-objective classification for daily synoptic systems : Application to the Eastern Mediterranean climate change", International Journal of Climatology, 24, 1001-1011, 2004. <http://www.tau.ac.il/~pinhas/publications.htm>
- Bredenkamp D. B. Botha. L.G. van Tonder G.J. van Rensburg H.J., 1995. "Manual on Quantitative Estimation of Groundwater Recharge and Aquifer Storativity". Report - Water Research Commission, South Africa.
- Carmel Y. and Kadmon R., 1999. "Effects of grazing and topography on long-term vegetation changes in a Mediterranean ecosystem in Israel". Plant Ecology 10.1023/A:1009872306093 https://www.researchgate.net/publication/226502994_Effects_of_grazing_and_topography_on_long-term_vegetation_changes_in_a_Mediterranean_ecosystem_in_Israel
- Dafny D., 2009. "Groundwater Flow and Solute Transport within the Yarkon-Taninim Aquifer, Israel". Thesis submitted for the degree of "Doctor of Philosophy" - the Hebrew University of Jerusalem.
- Fleischer L. and Varshavsky A., 2002. "A lithostratigraphic data base of oil and gas wells drilled in Israel". Rep. 74/202/02, Institute for Petroleum Research and Geophysics, Holon, 280p.
- Fleischer L., Gelberman E. and Wolff O., 1993. "A geological-geophysical reassessment of the Judea Group (Yarkon-Taninim aquifer)". Rep. 244/147/92, Institute for Petroleum Research and Geophysics, Holon, 92p.
- Lerner, D.N., Issar, A. and Simmers, I. 1990. "A guide to the understanding and estimating natural recharge". IAH publication V01.9.
- Marra, F., Morin, E., 2018. "Autocorrelation structure of convective rainfall in semiarid-arid climate derived from high-resolution X-Band radar estimates. Atmos. Res." <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.020>.
- Sarann L., Catherine C., Aurore D., 2013. "Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review" Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2013 17(2), 392-406 <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=10003>
- Sheffer N.A., 2009. "Variable scale recharge measurement and modeling using the hydrometeorological DREAM". Ph.D. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem.
- Sheffer, N. A., E. Dafny, H. Gvirtzman, S. Navon, A. Frumkin, and E. Morin 2010, "Hydrometeorological daily recharge assessment model (DREAM) for the Western Mountain Aquifer, Israel: Model application and effects of temporal patterns". Water Resour. Res., 46, W05510, doi:10.1029/2008WR007607.

Tao C., Liliang R.,*, Fei R., Xiaoli Y., Shanhu J., Tiantian T., Yi L., Chongxu Z., and Liming Z. 2017. "Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling". Water. <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/5/342/pdf>

Yunfei S., Lin L., and Lingling Z., 2007. "Application and comparing of IDW and Kriging interpolation in spatial rainfall information", Proc. SPIE 6753, Geoinformatics 2007: Geospatial Information Science, 67531I (25 July 2007); <https://doi.org/10.1117/12.761859>

Zocatelli D., Francesco M., and Morin E., 2020. "Update of Yarkon-Taninim aquifer recharge model - Milestone 2 report: Recharge estimation based on SHACHAM radar rainfall data combined with station data". HSI Rep

Zocatelli D., Francesco M., and Morin E., 2020. "Update of Yarkon-Taninim aquifer recharge model - Milestone 3 report: Correction and calibration of IMS-radar rainfall data and building input for the recharge model". HSI Rep

Zocatelli D., Francesco M., and Morin E., 2020. "Update of Yarkon-Taninim aquifer recharge model - Milestone 4 report: Recharge estimation based on IMS-radar data compared with estimation from rain gauge only". HSI Rep

Zocatelli D., Francesco M., and Morin E., 2020. "Update of Yarkon-Taninim aquifer recharge model - Milestone 5 report: Sensitivity analysis". HSI Rep

Zocatelli D., Francesco M., and Morin E., 2020. "Update of Yarkon-Taninim aquifer recharge model - Milestone 6 report: Conclusions and operational recommendations". HSI Rep