



השירות המטאורולוגי

אטלס קרינה לישראל

ד"ר הראל מוסקטל, אגף מחקר ופיתוח

ד"ר נועם חלפון, אגף אקלים

אימייל למידע נוסף: muskatelh@ims.gov.il

תמוז תש"ף, יולי 2020

תוכן עניינים

3-4	הקדמה.....
4-6	1. תוצר הקרינה הגלובלית של SARAH-2 מלווייני EUMETSAT.....
6	2. קלימטולוגיה של קרינה גלובלית מצטברת יומית.....
6-10	2.1. מפות קרינה מנתוני לוויין – קרינה מצטברת יומית.....
10-13	2.2. אימות נתוני קרינה לוויין מול תחנות מדידה.....
13-16	3. קלימטולוגיה של קרינה גלובלית מקסימלית יומית.....
16-19	4. מפות אטלס קרינה לציבור הרחב באתר השמ"ט.....
19-20	5. סיכום ומסקנות.....
20	מקורות.....

הקדמה

אור השמש הוא מקור האנרגיה העיקרי על פני כדור הארץ. אנרגיית השמש משפיעה על כל מערכות החיים, בעלי החיים והצמחיה ומהווה גם את המנוע ליצירת מזג האוויר המשתנה בכל רגע; רוחות, עננות, גשם ועוד. קרינת השמש בקצה העליון של האטמוספירה היא בעלת עוצמה כמעט קבועה שנקראת *קבוע השמש* וערכה 1366 וואט למ"ר. על גבי הקרקע העוצמה הזו משתנה בהתאם לשעה, ליום בשנה, ולקו הרוחב. כל הגורמים הללו מסתכמים בזווית אחת חשובה: Solar Zenith Angle הזווית שבין האנך לקרקע לבין הקו הישיר בין השמש לקרקע. את הזווית הזו ניתן לחשב בדיוק רב ובקלות על ידי שימוש בנוסחאות התלויות בנתוני המקום (latitude, longitude) והזמן (דקה, שעה ותאריך). הקושי בחיזוי עוצמת הקרינה נובע מהשינויים בהרכב האטמוספירה בכל רגע. הקרינה שמגיעה לקרקע תמיד נמוכה מזו שבקצה האטמוספירה ותלויה בצפיפות וסוג החלקיקים בהם הקרינה פוגעת בדרכה לקרקע. החלקיקים האלו הינם: גזים (בעיקר אדי מים, פחמן דו חמצני ואוזון אך גם מולקולות נוספות), אירוסולים (אבק, מלח ים ועוד) ועננים (טיפונות מים, טיפות גשם, חלקיקי קרח, שלג וברד). מכל שלושת סוגי החלקיקים הנזכרים לעיל, לעננים, המכסים כמחצית משטח כדור הארץ, יש את התרומה המשמעותית ביותר על עוצמת הקרינה המגיעה לקרקע. את הקרינה המגיעה לקרקע נהוג לחלק לשני סוגים: קרינה ישירה כלומר קרינה שמגיעה ישירות מהשמש ופוגעת בקו ישר בקרקע ללא פיזור וקרינה מפוזרת שהיא קרינה המגיעה לקרקע אחרי שעברה פיזור אחד או יותר ומגיעה מכל הכיוונים בכיפת השמיים. סכום העוצמה של הקרינה הישירה והמפוזרת בנקודה כלשהי קרוי קרינה גלובאלית.

האטלס האקלימי של ישראל כפי שפותח על ידי חוקרי השירות המטאורולוגי, לא כלל עד כה תוצרים הקשורים בקרינה. לרוב, מיפוי של ערכים מטאורולוגיים (כגון טמפרטורה, לחות ומשקעים) מתבסס בראש ובראשונה על מדידות מהקרקע. הערכים הנקודתיים אומנם עוברים תהליך מושכל של מיפוי על סמך טופוגרפיה ומשתנים נוספים ובכלל זה גם אמצעי חישה מרחוק על מנת ליצור מיפוי מרחבי רציף. אף על פי שהשירות המטאורולוגי מתחזק ומפעיל תחנות מדידת קרינה הפזרות ברחבי הארץ, תהליך מיפוי של קרינה מתוך נקודות בדידות נתקל בקשיים רבים. הסיבה העיקרית היא השפעת עננות ואירוסולים שהמשטר האקלימי שלהם כתלות במקום אינה ידועה במדויק. לפיכך עלה הצורך להשתמש בנתוני לוויין הנותנים תמונה מרחבית כוללת ולהשתמש בתחנות הקרקע לאימות תוצרי הלוויין כפי שיתואר במסמך זה.

אטלס קרינה חשוב לצרכים רבים כגון חקלאות (פוטנציאל פוטוסינתזה, חישוב התאדות מהקרקע, חשיפת יבולים ובעלי חיים לקרינה), בריאות הציבור (חשיפה לקרינת שמש אולטרא-סגולה המסוכנת לעור), ענף הבניה והתעשייה (בליית בניינים וחומרים שונים), מחקר בתחומי מדעי כדור-הארץ, ענף האנרגיות המתחדשות, ועוד.

אנרגיות מתחדשות הינו תחום המתפתח בקצב מהיר במיוחד בשנים האחרונות בעולם כולו. הצורך במציאת תחליפים לדלקים הפוסיליים נובע משיקולי איכות סביבה כגון צמצום פליטת גזי חממה, וכן משיקולים כלכליים ואסטרטגיים. גם העובדה שמאגרי הדלקים הפוסיליים הולכים ומתכלים דוחפת משקיעים, חברות ואזרחים רבים להשקיע בפיתוח והקמת מתקני ייצור אנרגיה אלטרנטיביים. בישראל פוטנציאל האנרגיה משדות טורבינות מבוססות רוח הינו מוגבל, בשל עתודות שטח מועטות ותעבורת ציפורים רבה ולפיכך רוב פוטנציאל האנרגיה המתחדשת בישראל מקורו באנרגיית השמש. אטלס קרינה הוא מרכיב קריטי בתהליך קבלת החלטות על הקמת מתקן לייצור אנרגיה מהשמש. ישנן שתי שיטות עיקריות לייצור חשמל תוך ניצול אנרגיית השמש: תאים פוטו-וולטאים (PV) שהיא השיטה הנפוצה בארץ ובעולם לניצול אנרגיית השמש ותחנות כח תרמו-סולריות (CSP). לרוב מערכות ה-PV עוצמת הקרינה הגלובאלית היא הפרמטר החשוב ביותר וממנה נגזר ההספק החשמלי, לעומת זאת למערכות תרמו-סולאריות עוצמת הקרינה הישירה היא החשובה יותר. במקרה של חברות אנרגיה יש צורך בידיעה על המיקום הגיאוגרפי המיטבי וגם על פוטנציאל ייצור החשמל במהלך השנה. גם אזרח פרטי צריך לחשב את הכדאיות הכלכלית להתקנת מתקן PV ואת התפוקה היומית הצפויה בחודשי השנה השונים מהמתקן.

1. תוצר הקרינה הגלובלית של SARAH-2 מלווייני EUMETSAT

CM-SAF (Climate Monitoring Satellite Application Facility) הוא קונסורציום של מספר מדינות אירופאיות בתוך ארגון EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) העוסק במעקב אחרי האקלים. המטרה העיקרית היא ליצור סדרות נתונים לטווח ארוך של תוצרי הלוויינים של EUMETSAT בהתמקדות בניטור שינויי אקלים (ראו אזור 1). עיקר הפעילות היא בנייתו ועיבוד המידע המצולם על ידי הלוויינים במשך עשרות שנים ויצירת קטלוג של סדרות נתונים מטאורולוגיים רבים ומגוונים מכיסוי עננות, תכולת עננים, אירוסולים, קרינה, לחות, טמפרטורה משקעים ועוד. אחד מתוצרי CM-SAF הוא SARAH-2 (Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat) הכולל סדרות אקלימיות של קרינה: קרינה גלובלית, קרינה ישירה, זמני זהירות שמש ועוד¹. הנתונים מבוססים על תצפיות אורכי הגל הנראה ($0.2 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$) של רכיבי MVIRI ו-SEVIRI המורכבים על הלוויינים הגיאוסטציונאריים של EUMETSAT בין השנים 2017-1983. הנתונים הם בגבולות $\pm 60^\circ$ (latitude, longitude) ברזולוציה של 0.05° . ניתן לקבל את הנתונים הממוצעים החודשיים והיומיים או את הנתונים הרגעיים (ברזולוציה זמנית של 30 דקות). ביצירת אטלס קרינה זה השתמשנו בנתוני הקרינה הגלובלית (Global Radiation), או בשמה הנוסף Surface Incoming Solar radiation (SIS). זהו למעשה ההספק הרגעי של האנרגיה המגיעה לפני השטח ונמדדת ביחידות של וואט למ"ר [W/m^2]. סך האנרגיה לפרקי זמן קצובים (לדוגמה סך

האנרגיה היומית) נמדד בדרך כלל ביחידות של מגה-ג'אול למ"ר [MJ/m^2] או בקילו-וואט-שעה למ"ר [kWh/m^2].

החישוב של תוצר הקרינה SIS ב-SARAH-2 מבוסס על שיטת Heliosat הנשענת על עקרון שימור האנרגיה על פי הנוסחה¹:

$$(1) \text{ SIS} = \text{SIS}_{\text{CAL}}(1 - \text{CAL})$$

כאשר SIS_{CAL} היא הקרינה הגלובלית לשמיים נקיים ו- CAL הוא אלבדו העננים האפקטיבי (או אינדקס העננים) שנמדד על ידי הלווין. אלבדו העננים הוא מספר הנע בין 0 ל-1 שמתאר את כמות הקרינה שמוחזרת מן העננים לכיוון החלל מכלל הקרינה שהגיעה אליהם מכיוון השמש. אלבדו העננים תלוי בכמות המים והקרח בעננים, בגודל וצורת החלקיקים (טיפונות וקרח) ובזווית פגיעת קרני השמש. הרזולוציה המוגבלת של הלווין עלולה לגרום לכך שעננות חלקית, כלומר עננים הקטנים מפיקסל לווין, תתפרש כאלבדו עננים נמוך כשבפועל על הקרקע ישנו שילוב של שטחים נקיים מעננות ושטחים עם אלבדו עננים גבוה. גם נוכחות של חלקיקי אבק כתוצאה מסופת אבק או שלג על הקרקע יכולים להתפרש בטעות על ידי הלווין כאלבדו עננים גבוה.

כדי לחשב את הקרינה בשמיים נקיים SIS_{CAL} משתמשים במודל הכולל:

א. תכולת מים מצטברת אנכית על בסיס אנליזה של המודל האופרטיבי הקונסורציום האירופאי לחיזוי לטווח בינוני של ECMWF .

ב. קלימטולוגיה חודשית של אוזון על בסיס ERA-Interim.

ג. קלימטולוגיה של עומק אופטי של אירוסולים שונים מבוסס על מודל CAMS- ECMWF ^{3,2}.

ד. אלבדו-קרקע על סמך SARB/CERES.

ה. טבלאות קרינת שמיים נקיים (LUT) שחושבו על ידי מודל קרינה מדויק (Radiation Transfer Model – RTM libRadtran) למצבי אטמוספירה שונים.

לפרטים נוספים בעניין תוצר הקרינה הגלובלית של הלווין יש לעיין במדריך למשתמש של SARAH-¹².



איור 1: דוגמא לתמונת לוויין של EUMETSAT מה-20 באוקטובר 2019.

2. קלימטולוגיה של קרינה גלובלית מצטברת יומית

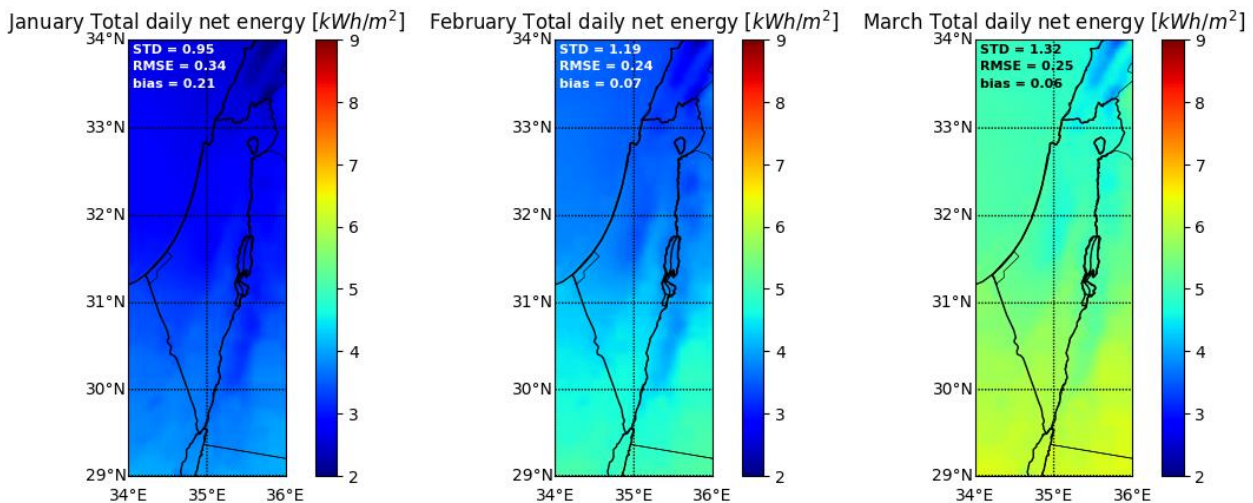
2.1 מפות קרינה מנתוני לוויין - קרינה מצטברת יומית

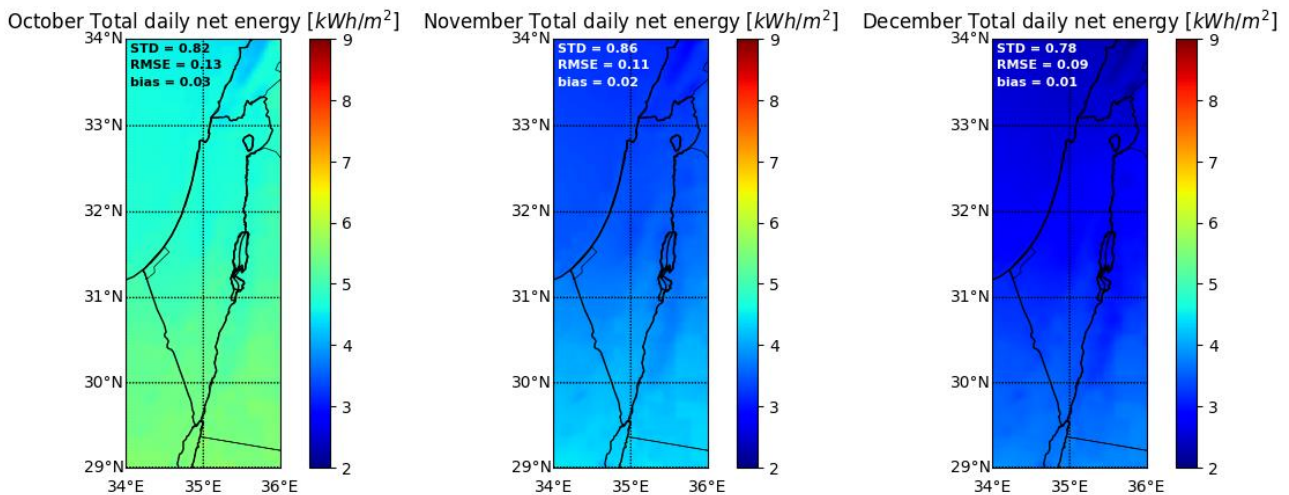
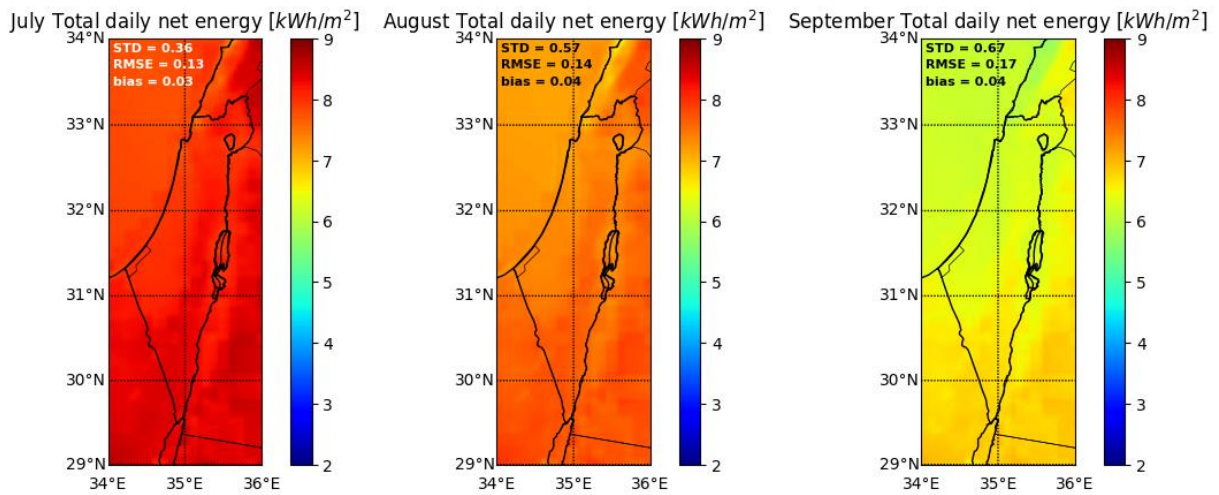
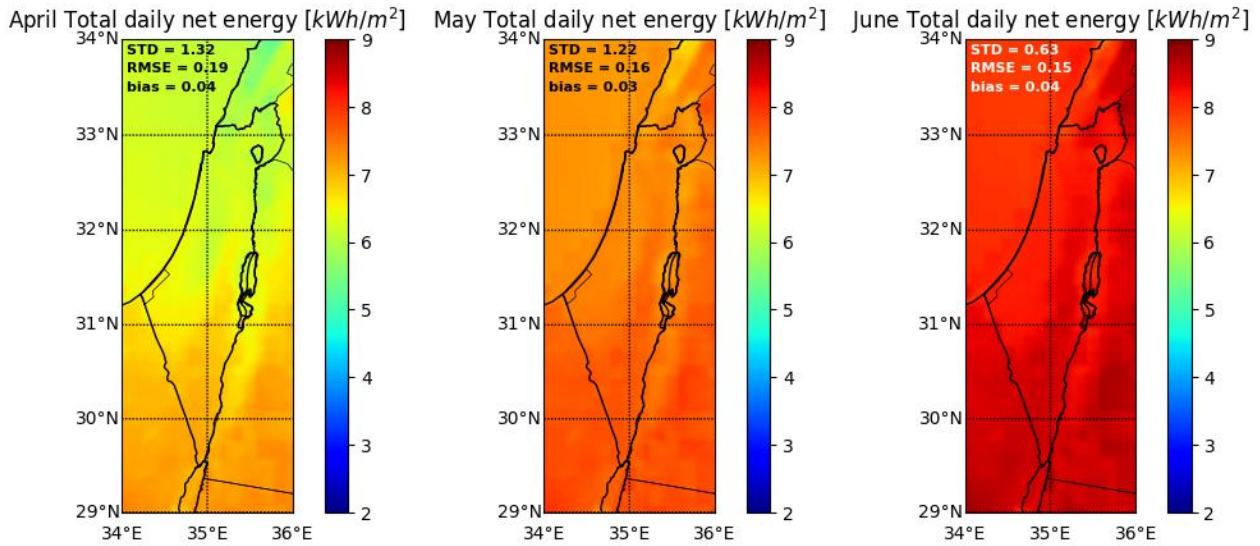
מפות הקרינה המצטברת היומית המוצגות באיור 2 מבוססות על תוצרי הלוויין כפי שתואר בפרק הקודם. בסיס הנתונים שנבחר ליצירת מפות אלו הוא נתוני הקרינה הממוצעת היומית בין השנים 1983-2017. בעבודה זו הזנחנו את שינויי האקלים ועוצמות הקרינה עם השנים משום שהם מסדר גודל קטן בהשוואה לערכים האבסולוטיים והשגיאות של המודל⁴. את הממוצע היומי של הקרינה בוואט למ"ר מכפילים במספר השניות ביממה ומקבלים את סך האנרגיה היומית. המרנו את היחידות לקילו-וואט-שעה למ"ר. כדי לחשב את הממוצעים החודשיים נלקחו הימים בכל חודש עבור כל השנים בטווח. לדוגמא: כדי לחשב את מפת ממוצע ינואר נלקחו עבור כל פיקסל הערכים של הממוצעים היומיים מ-1 בינואר עד 31 בינואר 1983, וכן הלאה עד שנת 2017 (31 ימים X 35 שנים). שלושת המספרים שמופיעים על המפות מייצגים את ממוצע סטיית התקן (Standard deviation – STD), ממוצע שורש השגיאה הריבועית הממוצעת (Root Mean Square Error - RMSE) וממוצע ההטיה (bias), ראו נוסחאות 2 ו-3.

ה-STD מחושבת עבור כל פיקסל בנפרד ונתונה בנוסחה:

$$(2) \text{ STD} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}}$$

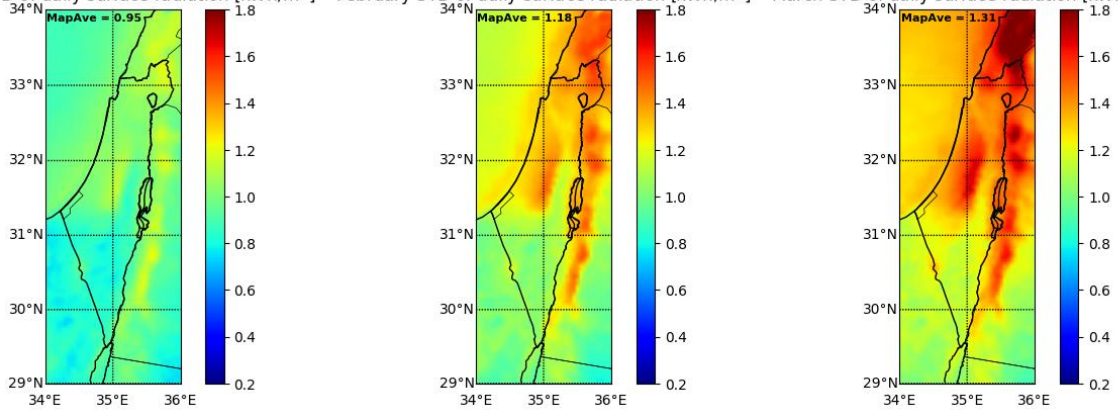
כאשר x_i היא הממוצע היומי לתאריך כלשהו עבור נקודת פיקסל מסוימת, μ הוא הממוצע היומי הרב-שנתי ו- N הוא מספר הימים שננסו בחישוב הרב שנתי (1983-2017) עבור חודש נתון. מתוך חישוב זה ניתן לקבל מפה של STD עבור כל חודש בנפרד (ראה מפות באיור מספר 2) כאשר יש שונות מרחבית בסטיית התקן לדוגמא: באזורים מדבריים סטיית התקן קטנה מאזורים הרריים בשל מיעוט העננים. המספר עבור STD שמופיע הן במפות שבאיור 2 והן במפות שבאיור 3 מציין את הממוצע על כל הפיקסלים שבמפה. לסטיית התקן יש חשיבות רבה. מבחינה מטאורולוגית המשמעות של סטיית תקן גבוהה היא שונות גבוהה של משתנה זה בין יום ליום כתוצאה מעננות או מאירוסולים (באזורינו בעיקר אבק). השונות הזו גבוהה בעונות המעבר והחורף וקטנה בעונות הקיץ ועשויה להשפיע על מקבלי החלטות בעיקר בתחום האנרגיה (יציבות הספקת האנרגיה מהשמש). בניגוד לסטיית התקן שחושבה לשנים 1983-2017, הערכים של ה-bias ושל ה-RMSE המופיעים במפות באיור 2 הם ביחס לערכי סך האנרגיה היומית כפי שנמדדו בתקופה 2014-2017. המספרים מציינים ממוצעים על עשר תחנות מדידה בקרקע כפי שיבואר בתת-הפרק הבא.



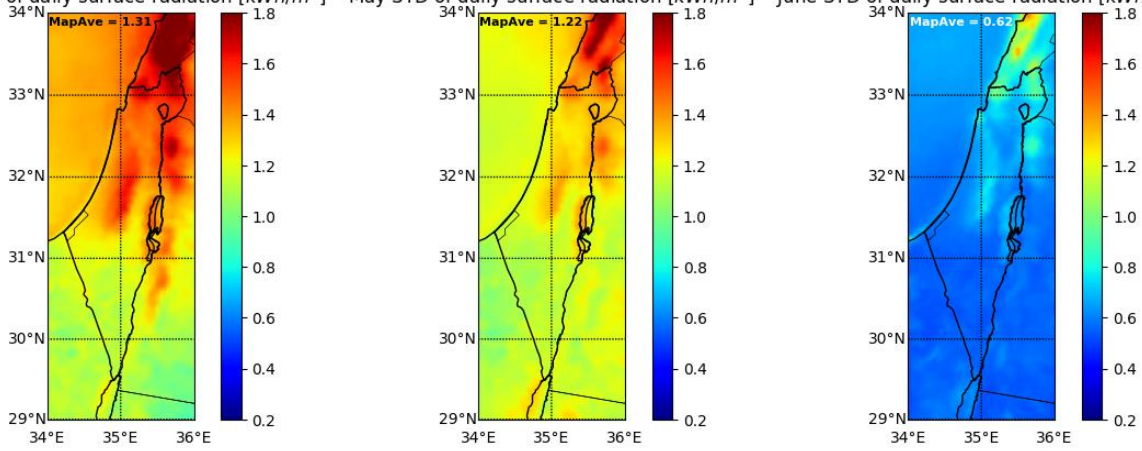


איור 2: ממוצעים חודשיים של הקרינה המצטברת היומית בקרקע על סמך נתוני לוויין בין השנים 2017-1983. ערכי STD מחושבים ביחס לממוצע הרב שנתי (ממוצע על כל המפה). ערכי RMSE, bias מחושבים ביחס ל-10 תחנות מדידה עבור השנים 2014-2017.

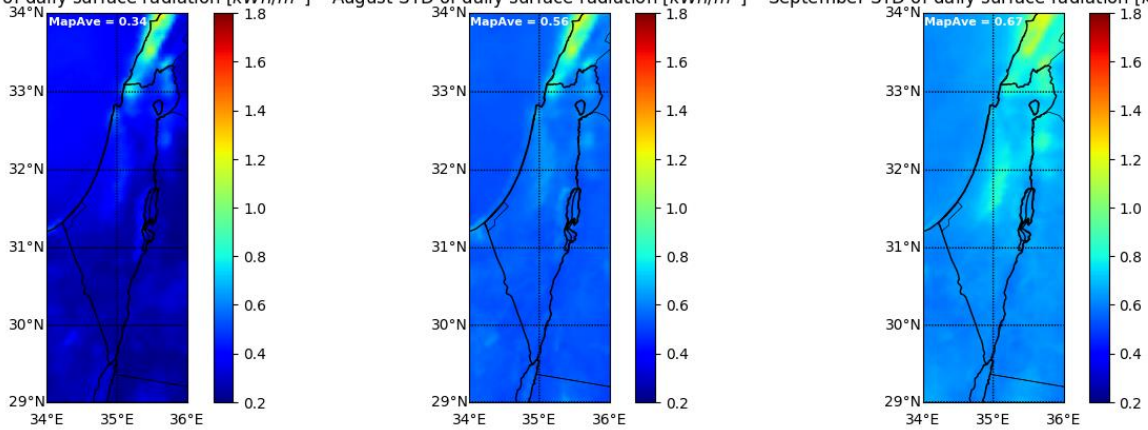
January STD of daily surface radiation [kWh/m^2] February STD of daily surface radiation [kWh/m^2] March STD of daily surface radiation [kWh/m^2]

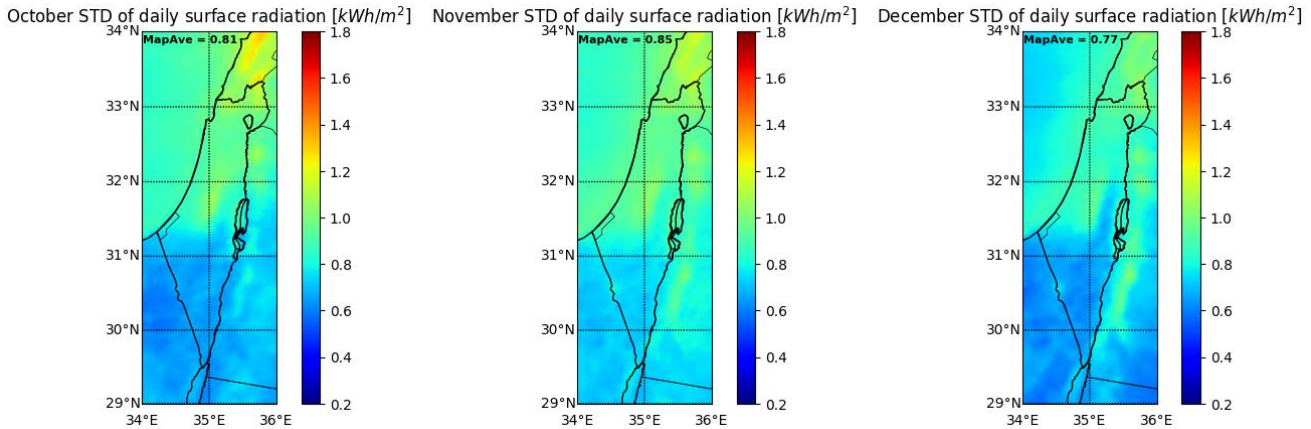


April STD of daily surface radiation [kWh/m^2] May STD of daily surface radiation [kWh/m^2] June STD of daily surface radiation [kWh/m^2]



July STD of daily surface radiation [kWh/m^2] August STD of daily surface radiation [kWh/m^2] September STD of daily surface radiation [kWh/m^2]





איור 3: סטיית התקן מהממוצעים החודשיים של הקרינה הגלובלית המצטברת היומית על סמך נתוני לוויין בין השנים 1983-2017. ניתן לראות שהשונות מיום ליום ביחס לממוצע החודשי גבוהה בחודשים פברואר-מאי ונמוכה בחודשים יוני-ספטמבר.

2.2 אימות נתוני קרינה לוויין מול תחנות מדידה

נתוני הלוויין אומתו מול תצפיות ב-10 תחנות מדידה קרקעיות של קרינה (ראה איור 4) בתקופה של 4 שנים 2014-2017. אף על פי שגם בנתוני המדידה על הקרקע ישנן טעויות הנובעות בעיקר מדיוק המכשירים ומתחזוקה (ביקוין המכשיר מאבק לדוגמא) אנו מתייחסים לנתונים אלו כאל מהימנים ביחס למדידות מלוויין שנשענות על מודל והנחות רבות כפי שהוסבר בפרקים הקודמים. נתוני הקרינה מתחנות המדידה קיימים ברזולוציה 10-דקתית ונעשו באמצעותם חישובים של שורש השגיאה הריבועית הממוצעת (Root Mean Square Error - RMSE) וההטיה (bias). ההגדרה של RMSE נתונה בנוסחה:

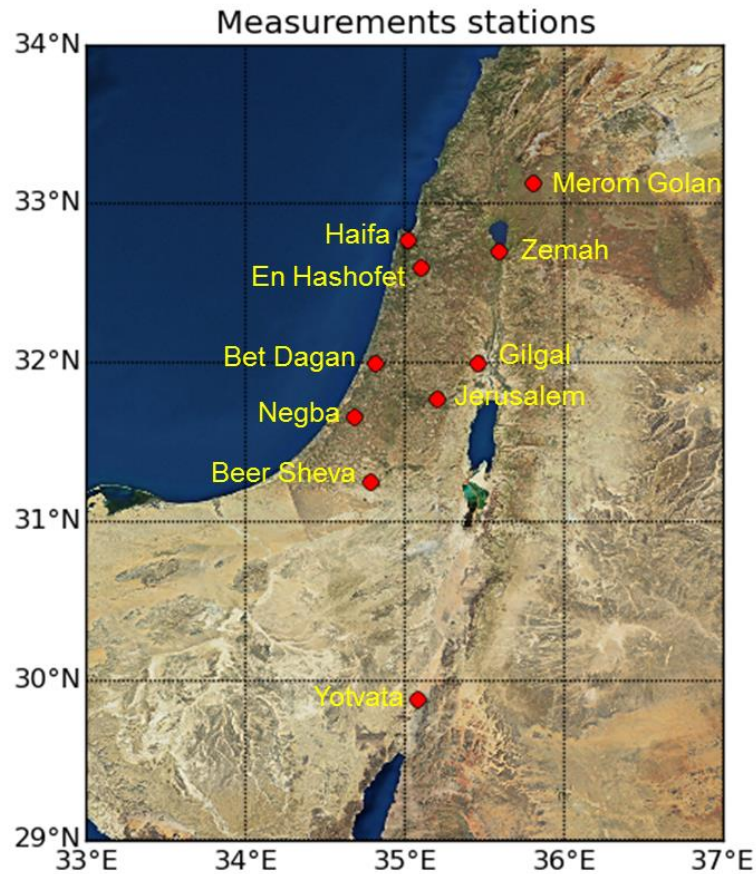
$$(3) \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (x_{i,sat} - x_{i,sur})^2}{N}}$$

$$(4) \text{bias} = \frac{\sum (x_{i,sat} - x_{i,sur})}{N}$$

כאשר $x_{i,sat}$ הוא הערך שנמדד על ידי הלוויין בנקודת הסריג הקרובה ביותר לתחנה, ו- $x_{i,sur}$ הוא הערך שנמדד בתחנה בקרקע. במפות שמופיעות באיור 2 האינדקס i הוא התאריך. עבור כל תאריך i חושבה האנרגיה המצטברת היומית מהלוויין ומהתחנה עבור השנים 2014-2017.

ערך נוסף שחושב הוא השגיאה האבסולוטית הממוצעת באחוזים *Mean Absolute percentage error* - *MAPE* הנתונה בנוסחה:

$$(5) \text{MAPE} = 100 \cdot \frac{1}{N} \sum \frac{x_{i,sat} - x_{i,sur}}{x_{i,sur}}$$



איור 4: מפת תחנות המדידה עבורן בוצעה השוואת מדידות הלווין מול מדידות בקרקע בשנים 2017-2014.

בטבלה 1 מוצגות תוצאות ממוצעי סכמת האנרגיה היומית ליחידת שטח בעשר תחנות בארץ. החודשים ינואר ויולי מוצגים כאן כדוגמא. נתוני שאר החודשים גם הם קיימים. ניתן לראות שבחודשי הקיץ הקרינה המצטברת מגיעה לערכים של כ-8 קווט"ש למ"ר אך ה-RMSE וה-bias היחסיים קטנים בהרבה מאשר בינואר שם ערכי הקרינה המצטברת הם כ-3 קווט"ש למ"ר. הסיבה היא כמובן עננות מרובה בחודשי החורף שמקשה על חישוב העומק האופטי של העננים בכל פיקסל של הלווין. לא ניתן למצוא בנקודות הללו חוקיות כלשהי בעניין ערכי הקרינה או השגיאה. דבר שעוד יותר מחזק את הצורך בתמונות לוויין כדי לקבל תצורה מרחבית כוללת. שגיאות נוספות של נתוני הלוויין יכולות לנבוע מ: שגיאה באלבדו הקרקע שנלקח ממודל קלימטולוגי ברזולוציה גסה, שגיאות בהערכת העומק האופטי של אירוסולים (לדוגמא בעת אירועי אבק) וכן בשאר מרכיבי מודל השמיים הנקיים כפי שהוסבר בפרק 1. למודל הלוויין ישנה מגבלה באירועי שלג בהן השלג שמצטבר על הקרקע מתפרש על ידי המודל כעננות דבר שמפחית את הקרינה מתוצר הלוויין באופן מלאכותי ושגוי.

אנרגיה מצטברת יומית [kWh/m ²]					
MAPE [%]	bias	RMSE	ממוצע תחנה	ממוצע לווין	ינואר
17.5	0.11	0.34	2.67	2.78	מרומ גולן
13.0	0.26	0.34	2.55	2.80	חיפה טכניון
12.1	0.18	0.29	2.79	2.97	צמח
16.2	0.34	0.44	2.88	3.21	גלגל
9.9	0.11	0.25	2.83	2.94	עין השופט
10.8	0.21	0.29	2.86	3.07	בית-דגן
18.2	0.30	0.44	2.87	3.17	ירושלים
13.3	0.26	0.41	3.00	3.27	באר-שבע
5.6	0.03	0.19	3.16	3.18	נגבה
13.6	0.35	0.47	3.27	3.62	יטבתה
					יולי
3.2	0.13	0.35	8.32	8.45	מרומ גולן
3.8	0.12	0.35	7.90	8.02	חיפה טכניון
3.5	0.20	0.32	7.87	8.08	צמח
6.6	0.49	0.54	7.77	8.26	גלגל
2.8	0.15	0.28	8.04	8.18	עין השופט
3.6	0.26	0.34	7.81	8.07	בית-דגן
4.2	0.23	0.42	8.24	8.47	ירושלים
5.0	0.36	0.45	7.78	8.13	באר-שבע
2.1	0.08	0.22	8.03	8.11	נגבה
4.2	0.32	0.37	8.02	8.34	יטבתה

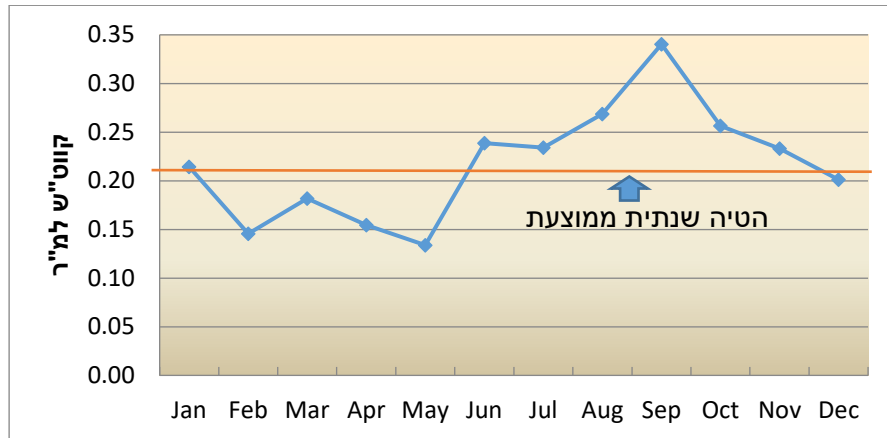
טבלה 1: נתוני לווין ותחנות מדידה של קרינה מצטברת יומית. קיימות תוצאות עבור כל החודשים אך כאן מוצגים בפירוט מלא רק נתוני ינואר ויולי (2014-2017). העמודה הימנית מייצגת את הממוצע היומי לחודש ינואר/יולי של הפיקסל בלווין שהכי קרוב לכל תחנה. העמודה השנייה מימין מייצגת את הממוצע היומי כפי שנמדד בתחנה. bias, RMSE ו-MAPE חושבו על פי נוסחאות 2, 3, 4 יום כנגד יום.

בשני החודשים ניכר כי ההטיה חיובית באופן גורף, כלומר הלווין מעריך ביתר את הקרינה בהשוואה לערכים הנמדדים בקרקע. להטיה עצמו אין חוקיות מרחבית ברורה המתמידה בין חודש לחודש אולם ניתן להעריך שהלווין מאופיין בהערכת יתר של הקרינה כמעט בכל השטח ובכל חודשי השנה, ראו איור 5 המציג את ה-BIAS החודשי הממוצע ב-10 תחנות האימות.

עוד ניכר באיור 5 כי ההטיה בקיץ גבוה יותר ביחס לחורף, אך מאחר שנלקחו רק 4 שנים לאימות ו-10 תחנות בלבד וגם בסט נתונים מצומצם זה היו חסרי נתונים, הוחלט לנקוט קו שמרני ולהפחית את ההטיה השנתית הממוצעת (כ-0.21 קוט"ש למ"ר) מכל הסריגים החודשיים.

כלומר, איננו מתיימרים לקבוע שאנו יודעים את תפרוסת ההטיה ואת ערכה החודשי המדויק מתוך סט נתוני האימות המצומצם, אבל ניתן להעריך שקיימת הערכת יתר עקבית של הקרינה על-ידי

המודל. לכן הסרת ההטיה השנתית הממוצע מסייעת לקבל מפות ריאליות יותר של הקרינה הניתנת לניצול. הדבר מתבטא גם בערכי RMSE משופרים אחרי הסרתו ראו טבלה 2.



איור 5 – מהלך ההטיה החודשי והשנתי הממוצע ל-10 תחנות האימות.

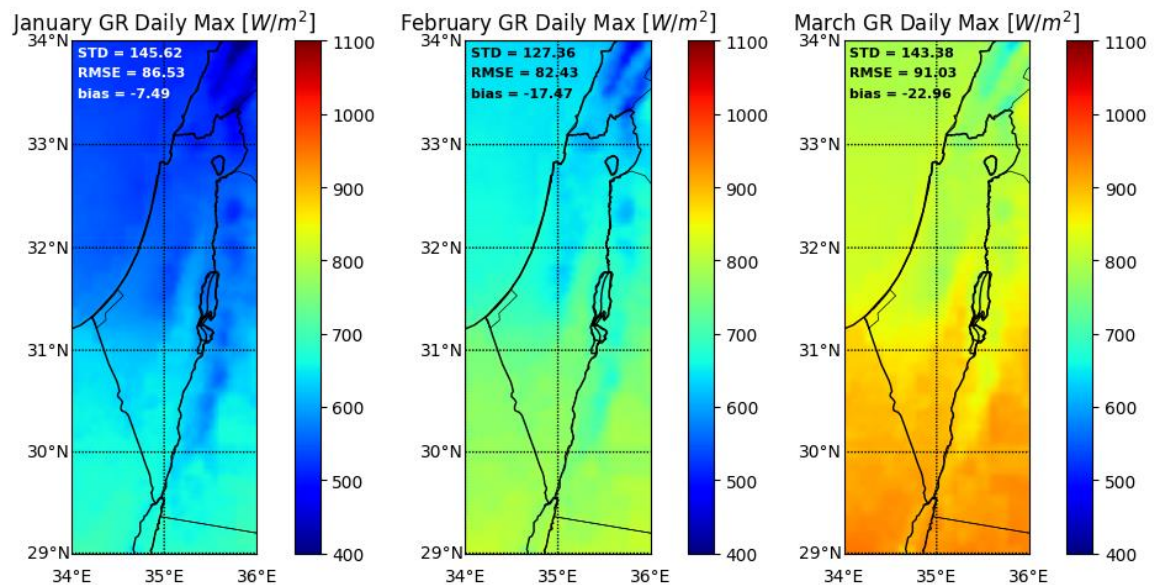
MAX RMSE		MIN RMSE		MEAN RMSE		תחנה
Bias Correction	No Correction	Bias Correction	No Correction	Bias Correction	No Correction	
0.51	0.44	0.30	0.28	0.37	0.35	מרום גולן חיפה טכניון צמח גלגל עין השופט בית דגן ירושלים באר שבע נגבה יטבתה
0.50	0.62	0.22	0.33	0.34	0.42	
0.46	0.50	0.20	0.27	0.32	0.35	
0.52	0.67	0.31	0.40	0.38	0.51	
0.36	0.41	0.25	0.23	0.31	0.32	
0.38	0.49	0.20	0.26	0.26	0.33	
0.50	0.61	0.31	0.34	0.39	0.46	
0.53	0.68	0.24	0.36	0.32	0.44	
0.38	0.36	0.25	0.19	0.31	0.25	
0.37	0.50	0.22	0.34	0.31	0.44	
0.45	0.53	0.25	0.30	0.33	0.39	ממוצע

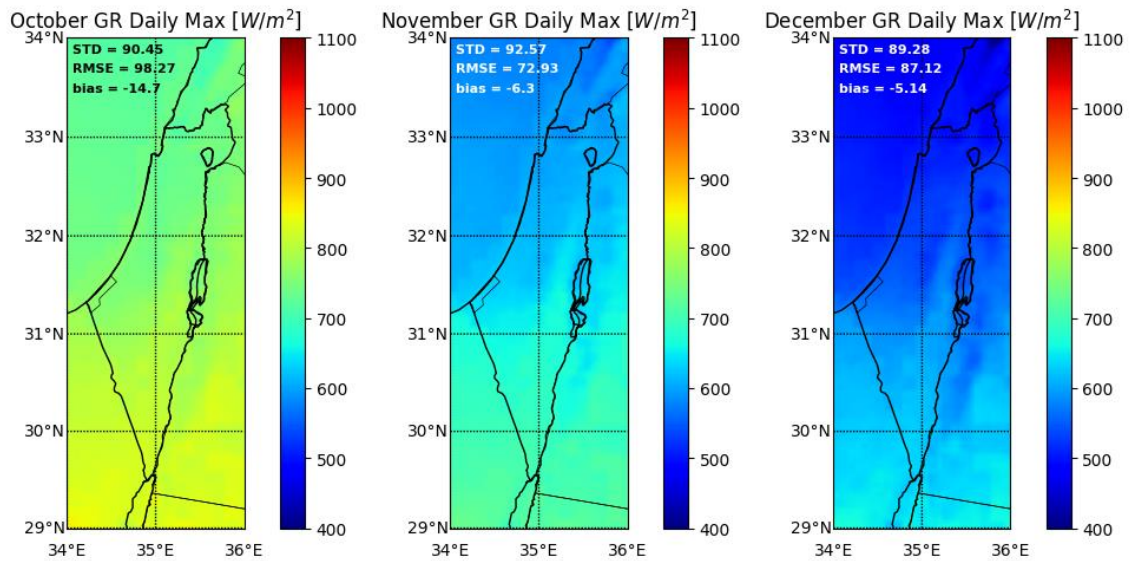
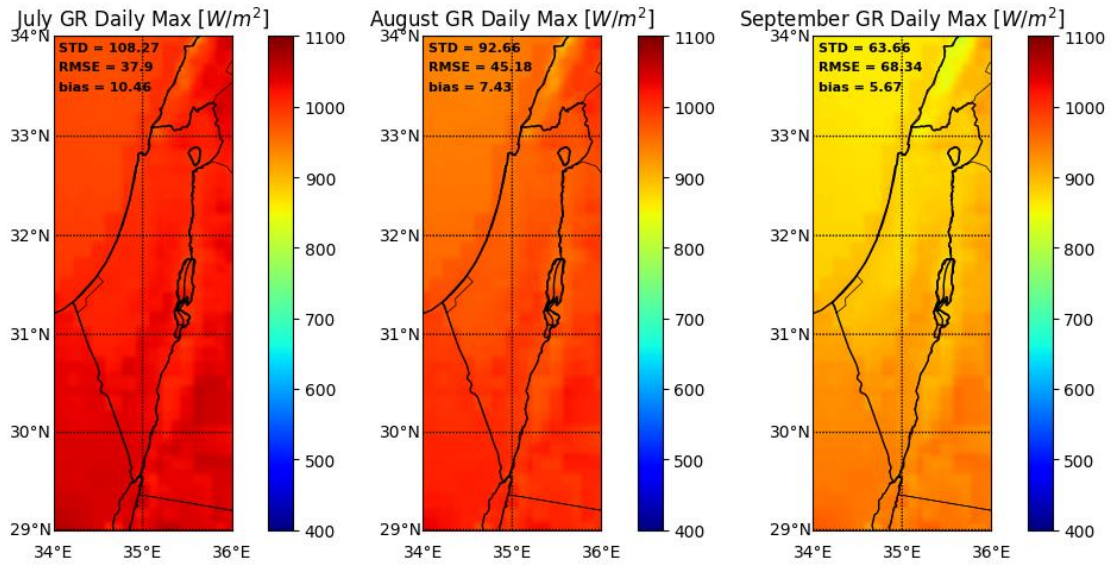
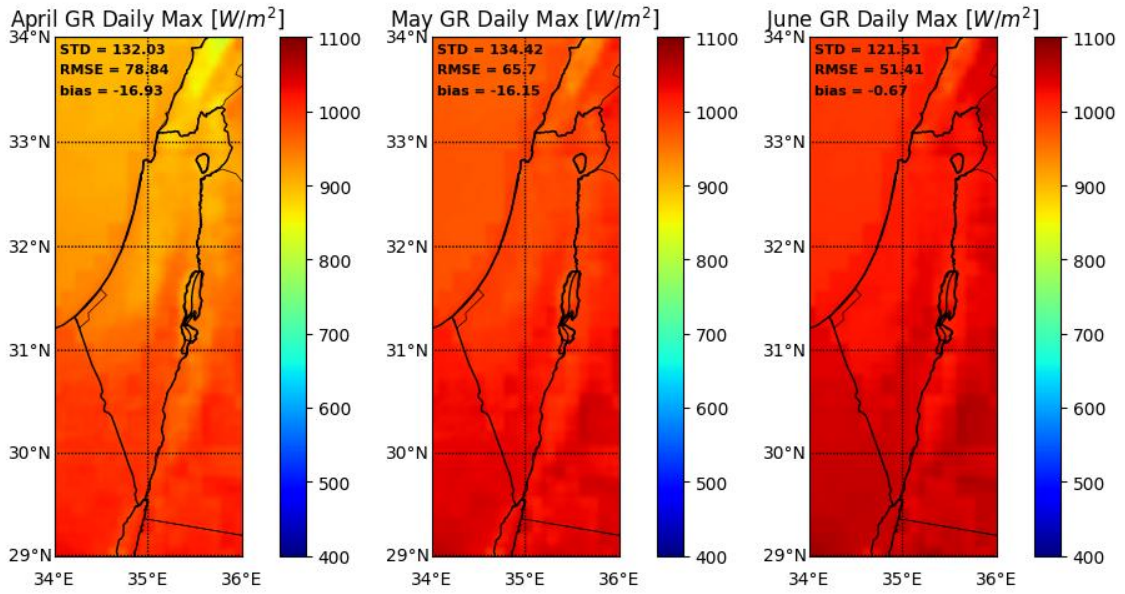
טבלה 2: ערכי ה-RMSE (בקוּוט"ש למ"ר) הממוצעים ל-12 החודשים, וכן הערכים בחודש עם הערך המינימלי והמקסימלי, לפני ואחרי החלת תיקון ההטיה של 0.21 קוּוט"ש למ"ר

3. קלימטולוגיה של קרינה גלובלית מקסימלית יומית

לצרכים רבים הקרינה הרגעית ולא המצטברת היא הנדרשת. חלק מתופעות הטבע והתנהגויות של חומרים תלויים בסף מסוים של עוצמת שטף האנרגיה. במסגרת מחקר זה בדקנו גם את הקרינה הגלובלית היומית המקסימלית (בוואט למ"ר). מפות אלו מוצגות באיור 6, אך אינן חלק מאטלס הקרינה המפורסם באתר בשלב זה (ניתן לקבל את המפות והמידע על פי דרישה ולפי

הצורך). על סמך נתוני לוויין רגועים ברזולוציה זמנית של 30 דקות בשנים 1999-2017 נעשה חיפוש בכל יום אחר עוצמת האנרגיה המקסימלית שנמדדה עבור כל פיקסל של תמונת הלוויין. התמונות המוצגות באיור 6 מייצגות את ממוצע המקסימום היומי עבור כל חודש מחודשי השנה. בדומה לאיור 2, השונות (STD) מחושבת ביחס לממוצע החודשי (ממוצע על כל הפיקסלים במפה). ה-RMSE וה-bias חושבו ביחס ל-10 תחנות המדידה כפי שהוסבר בהרחבה בסעיף 2.2. כאן נעשה חיפוש אחר העוצמה המקסימלית בנתוני התחנה הרגועים ברזולוציה של 30 דקות. כמו כן הייתה אפשרות לרזולוציה טובה יותר (10 דקות) אך לצורך השוואה עם נתוני לוויין ברזולוציה של 30 דקות יש להשוות את תנאי הבדיקה. בטבלה 3 מוצגות התוצאות המספריות עבור הקרינה המקסימלית היומית, לוויין כנגד תחנה עבור החודשים ינואר ויולי בלבד. מהטבלה ניתן ללמוד שאף על פי שהקרינה המקסימלית ביולי גבוהה פי שתיים לערך מהקרינה בינואר, ה-RMSE בינואר יותר גדולה מאשר ביולי. ההסבר העיקרי גם כאן הוא עננות, וליתר דיוק הערכת העומק האופטי של העננים על ידי מודל הלוויין. בחורף ברוב התחנות, ההטיה (bias), הינה חיובית משמע, שהלוויין העריך ביתר את הקרינה (הערכת חסר של העננות). בקיץ, הקרינה המקסימלית כמעט תמיד מתקבלת עבור שמיים נקיים מעננות. ניתן לראות שגם כאן יש הטיה חיובית (אך קטנה) של נתוני הקרינה מהלוויין, דבר שיכול לנבוע מהערכת חסר של האירוסלים או הלחות במודל הלוויין.





איור 6: קרינה גלובלית מקסימלית יומית על סמך נתוני לוויין רגועים בין השנים 1999-2017. השונות STD, מחושבת ביחס לממוצע החודשי של נתוני הלוויין (ממוצע על כל הפיקסלים במפה). ה- RMSE ו- bias חושב ביחס ל-10 תחנות מדידה כפי שהוסבר בפרק הקודם. נתוני הלוויין הרגועים ברזולוציה של 30 דקות אינם זמינים עבור השנים הקודמות ל-1999.

קרינה גלובלית מקסימלית יומית [W/m ²]					ינואר
MAPE [%]	bias	RMSE	ממוצע תחנה	ממוצע לוויין	
17.5	-18.53	76.90	495.81	477.28	מרום גולן
11.6	7.54	69.72	537.01	544.55	חיפה טכניון
11.0	-4.08	69.02	550.94	546.86	צמח
11.9	10.51	80.44	569.01	579.53	גלגל
10.7	-20.90	76.29	570.24	549.34	עין השופט
13.4	1.50	74.16	569.05	570.55	בית-דגן
14.9	-5.67	96.61	587.58	581.91	ירושלים
10.1	12.40	72.63	582.50	594.91	באר-שבע
8.6	-37.10	80.55	616.80	579.70	נגבה
13.3	19.23	105.18	617.36	636.59	יטבתה
					יולי
2.0	8.55	26.47	1016.20	1024.75	מרום גולן
3.3	-26.03	46.52	1024.89	998.86	חיפה טכניון
3.5	19.98	41.45	980.79	1000.77	צמח
5.5	48.78	58.22	957.83	1006.61	גלגל
2.2	1.40	30.32	1007.00	1008.40	עין השופט
2.9	-0.85	45.21	1006.72	1005.88	בית-דגן
2.2	4.31	30.49	1018.55	1022.85	ירושלים
2.9	15.44	36.38	996.61	1012.05	באר-שבע
2.5	5.56	36.48	1002.11	1007.68	נגבה
2.0	15.56	24.37	1011.00	1026.56	יטבתה

טבלה 3: נתוני לוויין ותחנות מדידה של קרינה גלובלית מקסימלית יומית. קיימות תוצאות עבור כל החודשים אך כאן מוצגים רק נתוני ינואר ויולי (2014-2017). העמודה הימנית מייצגת את הממוצע היומי לחודש ינואר/יולי של הפיקסל בלוויין הקרוב ביותר לכל תחנה. העמודה השנייה מימין מייצגת את הממוצע היומי כפי שנמדד בתחנה. העמודה השנייה מימין מייצגת את הממוצע היומי כפי שנמדד בתחנה. MAPE ו- bias, RMSE חושבו על פי נוסחאות 2, 3, 4 יום כנגד יום.

4. מפות אטלס קרינה לציבור הרחב

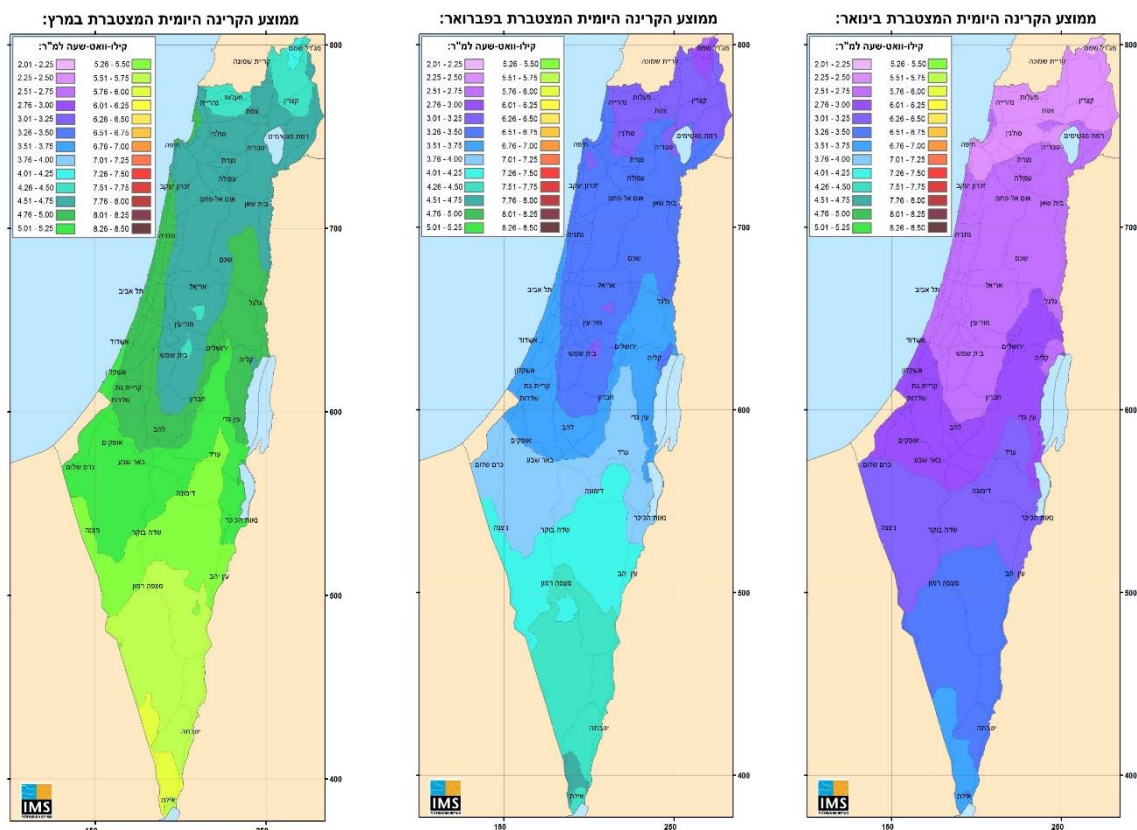
בשלב זה שולבו באטלס מפות חודשיות ממוצעות של הקרינה היומית הגלובלית המצטברת. המיפוי בוצע על בסיס נתונים שהתקבלו מהלוויין בסריג ברזולוציה של 0.05 מעלות ולאחר חיסור גורף של 0.21 kWh/m² לאחר שנמצא שהלוויין מעריך בממוצע רב שנתי את הקרינה ביתר כמעט בכל אחת

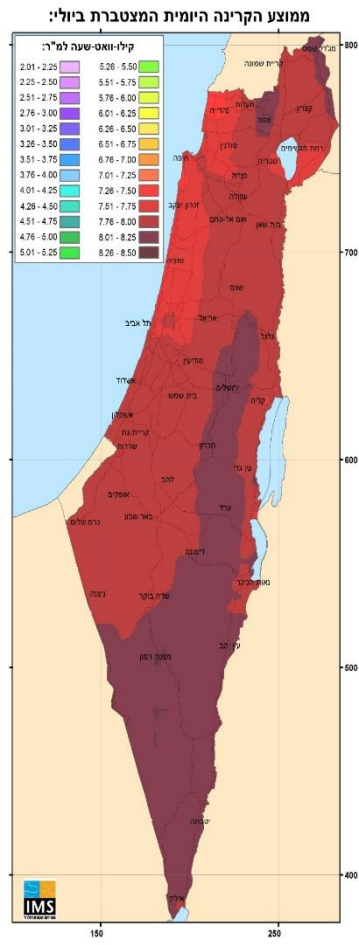
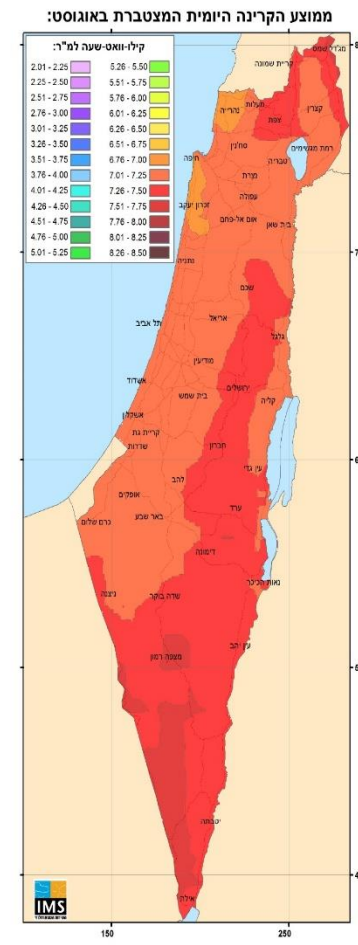
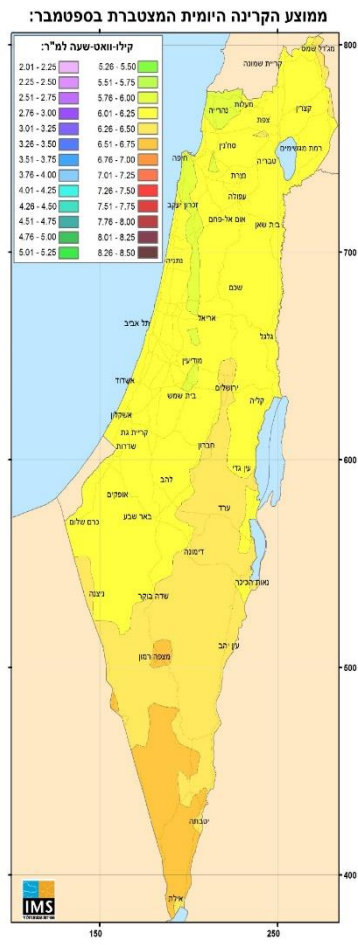
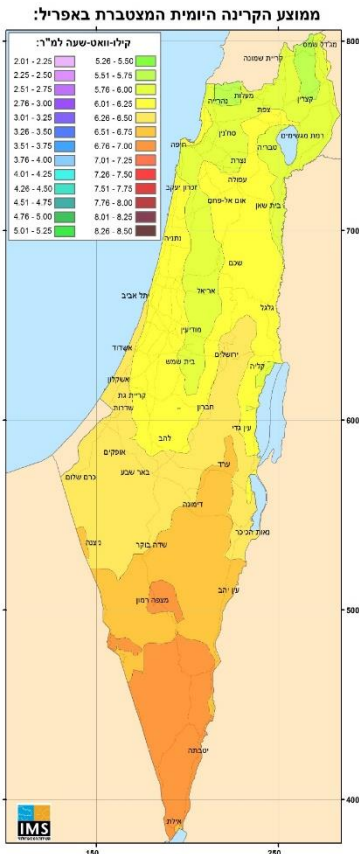
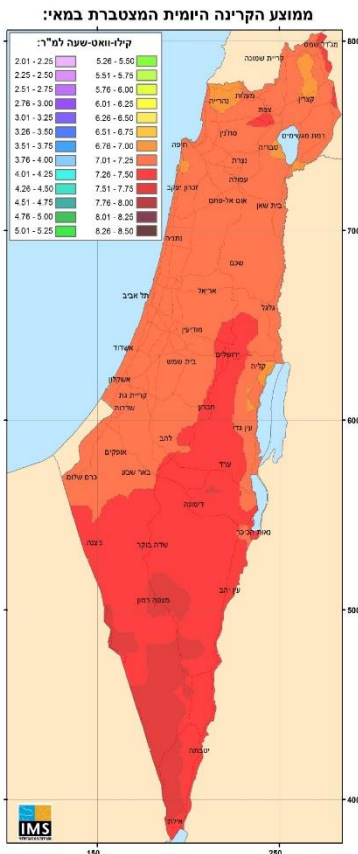
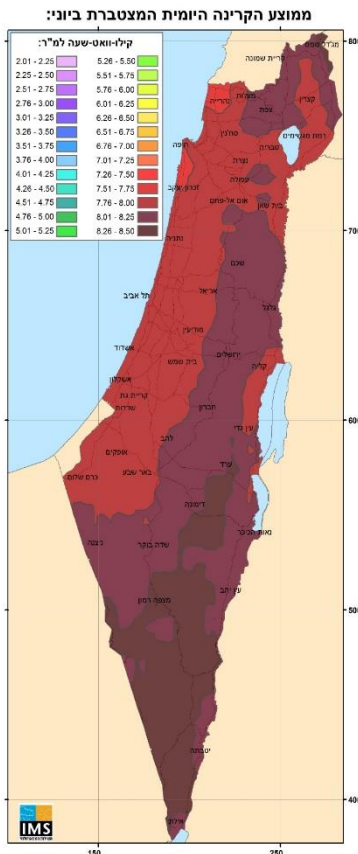
מתחנות האימות וכמעט בכל חודש ולכן הפחתה גורפת של ה-BIAS השנתי הממוצע מצמצמת את ה-bias החודשי וכן את טעות ה-RMSE (ראו פירוט בסעיף 2).

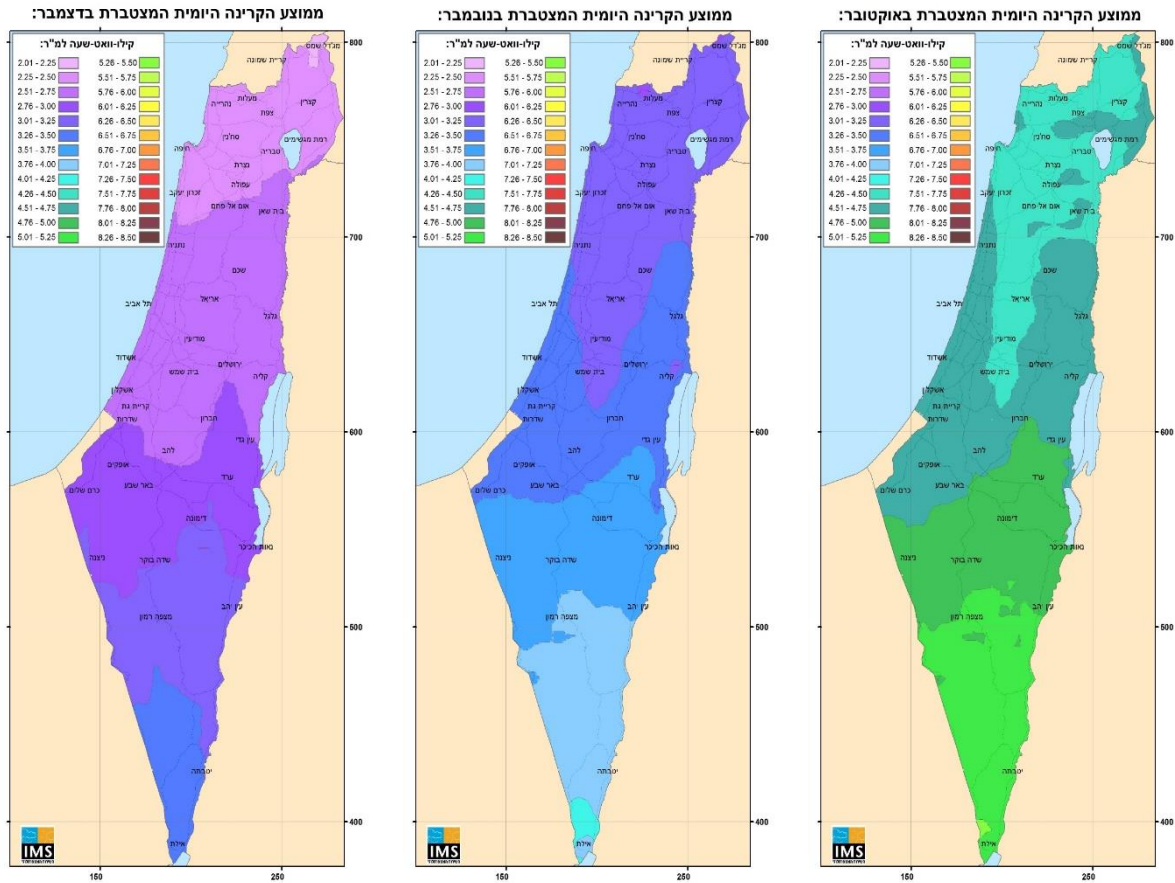
מאחר שהמשתנה הממופה הינו משתנה רציף במרחב ללא מעברים חדים בין פיקסל לפיקסל, הוחלט לבצע החלקה והגדלת רזולוציה לנתוני המקור כאשר כל תא של 0.05 מעלות חולק ל-25 תאים של 0.01 מעלות והערך בכל תא הוא הערך הממוצע שלו ושל 24 התאים הסובבים אותו. כך התקבל מיפוי ברזולוציה של 0.01 עם מעברים חלקים בין התאים ותוך שהערך בנקודות הסריג המקוריות נשמר.

עבור מיפוי ברשת ישראל הוכן סריג ראשוני ברזולוציה של 0.05 מעלות לפי נקודות הסריג המקוריות. מיפוי זה הוטל על רשת ישראל החדשה ולאחר מכן בוצעה חלוקה של המפה לפיקסלים ברזולוציה של קילומטר (הערך המטרי הקרוב ביותר לחלוקה המקבילה ל-0.01 מעלות). גם במקרה זה בוצעה החלקה מרחבית בעזרת פונקציה הקובעת שהערך בכל תא מייצג את הערך הממוצע בו וב-24 התאים שמסביבו.

כדי שניתן יהיה להבחין הן בהבדלים המרחביים והן בהבדלים העונתיים של כמות הקרינה היומית המצטברת הוחלט להשתמש במקרא אחד שחולק למחלקות של 0.25 kwh/m^2 ראו איור 7.







איור 7: מפות חודשיות של ממוצע הקרינה היומית המצטברת לתקופה 1983-2017

5. סיכום ומסקנות

בדו"ח זה מוצג, לראשונה בישראל, אטלס לקרינת שמש. האטלס יכול לשמש לצרכים רבים כגון חישוב פוטנציאל וכדאיות הקמת מתקני ייצור חשמל מאנרגיית השמש או למטרות מחקר מדעי או הנדסי בשטחי חיים רבים (רפואה, חקלאות, תעשייה ועוד). עבור משתנים כגון טמפרטורה, רוח ומשקעים ישנן שיטות מיפוי הנסמכות על מדידות בקרקע ואינטרפולציה (או באמצעות משוואות רגרסיה) לשאר נקודות הסריג במפה על סמך שיקולים פיזיקליים ומטאורולוגיים. תהליך דומה ליצירת מפה עבור עוצמות וסך אנרגיה יומית על בסיס מספר מועט יחסית של נקודות מדידת קרינה הפזורות בארץ, איננו פרקטי לאור חוסר הידע לגבי השינויים המרחביים בעומק האופטי של האטמוספירה. משום כך נבחר הליון ככלי מועדף למיפוי הקרינה לאור היותו בעל תפוסת ורזולוציה מרחבית גבוהה.

מאחר שבתוצר הליון קיימת זמינות מלאה של נתונים ברזולוציה עתית גבוהה, ניתן היה לחשב לצד הערך הממוצע שמופה, גם את השונות היומית ביחס אליו – ערך חשוב למקבלי החלטות בכל התחומים ובפרט עבור אנרגיות חלופיות. הערכים שנמדדו מהליון הושאו לתחנות קרינה בקרקע.

השגיאות של הלווין חושבו ביחס לתחנות מדידה בקרקע מתוך הנחה שהמדידות בקרקע יותר מדויקות מכיוון שאינן נסמכות על מודל ועל הנחות ממוצעות של מצב האטמוספירה כפי שנעשה בתוצר הלווין. כמעט בכל החודשים ובכל התחנות השגיאות בין תוצאות הלווין לערכים המדודים של הקרינה היומית המצטברת היו חיוביות והגיעו לסדר גודל ממוצע של 0.21 kwh/m^2 , מבלי שנמצאה חוקיות גאוגרפית ברורה להתפלגות ה-bias. משום כך הוחלט להפחית מערכי הלווין 0.21 kwh/m^2 באופן גורף. חיסור ה-bias מערכי הלווין הסיר את הערכת היתר הקבועה של הלווין והביא לצמצום טעות ה-RMSE בכל החודשים (הנאמדת במספר אחוזים בודדים ובמספרים אבסולוטיים של כ- 0.5 kwh/m^2 , ועוד פחות מכך בכל חודשי השנה, בכל תחנות האימות). התוצר הסופי של הקרינה המצטברת הסופית עבר מיפוי תוך הגדלת רזולוציה ל- $0.01 / 1 \text{ ק"מ}$ וביצוע החלקה מרחבית. המיפוי בוצע בסקאלה אחידה לכל חודשי השנה במרווחים של 0.25 kwh/m^2 . מפות אלו פתוחות לציבור הרחב באתר השירות המטאורולוגי. שאר התוצרים המופיעים בדו"ח זה ימסרו על פי דרישה.

מקורות:

1. https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewICDRDetails?acronym=SARAH_V002_ICDR
2. Müller, Richard & Pfeifroth, Uwe & Träger-Chatterjee, Christine. (2015). Towards Optimal Aerosol Information for the Retrieval of Solar Surface Radiation Using Heliosat. Atmosphere. 6. 863. [10.3390/atmos6070863](https://doi.org/10.3390/atmos6070863).
3. Müller, Richard. (2014). Brief Accuracy Assessment of Aerosol Climatologies for the Retrieval of Solar Surface Irradiance. Atmosphere. 5. 959-972. [10.3390/atmos5040959](https://doi.org/10.3390/atmos5040959).
4. Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2018). Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface- and satellite-based data records. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 1735–1754. <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>