

מדינת ישראל
משרד התשתיות הלאומית
างף מחקר ופיתוח

מערכות פוטו-וולטאיות בעיר ישראל:
איזה גודל מתאים?
מדריך למתקנים

פרופ' ד. פיימן, דר' ד. פוירמן, דר' פ. איבצון,
מר ב. מדווד, פרופ' ע. זמל
המחלקה לאנרגיה השימוש ולפיזיקה סביבתית
המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלואשטיין
אוניברסיטת בן גוריון בנגב

דר' ע. ינץ, דר' ו. ליבנסקי, ודרא' א. סטר
תחומי מחקר פיתוח והנדסה, השירות המטאורולוגי, בית דגן

דר' ש. שורקי
המחלקה לאנרגיה שימוש, המעבדה הלאומית לפיזיקה

המחקר מומן ע"י משרד התשתיות הלאומית על-פי חוזה מס' 98-11-101/98

מערכות פוטו-וולטאיות בעיר ישראל: איזה גודל מתאים?

ד. פיניון, ד. פויירמן, פ. איבצן, ב. מדווד וע. זמל

המחלקה לאנרגיה השימוש ולפייזיקה סביבתית,
המכון לחקר המדבָר ע"ש יעקב בלואשטיין
אוניברסיטת בן גוריון בנגב, קריית שדה בוקר 84990.

ע. ינץ, ו. ליבנסקי וא. סטר

תחום מחקר פיתוח והנדסה, השרות המטאורולוגי
בית דגן, 50250.

ש. שורק

המחלקה לאנרגיה שימוש, המעבדה הלאומית לפיזיקה
קמפוס גבעת רם, ירושלים 91904.

תקציר

בעבודה זו מובאות טבלאות המציגות את תפקות החשמלית השעתית המצופה מערכת פוטו-וולטאית המוצבת על קיר או על גג של מבנה באחת מהמש夕阳יות הראשיות בישראל. הערים הן: חיפה, תל אביב, ירושלים, באר שבע ואילת. בירושלים (העיר הממוסעת) מערך פוטו-וולטאי חסמי דרומה בזווית נטיח של 30° לאופק צפוי, לשפק 1600 קוווט"ש של אנרגיה חשמלית (DC) בשנה לכל kW 1 של קולטים. עבור תל אביב, חטבלאות מפרטות מגוון של זויות נטיח ומפנה. דוגמאות לשימוש בטבלאות עבור מספר בעיות אופטימייזציה נכללות בדו"ח זה. הנספח מפרט מספר נתונים נלוים: גליונות סיכום מטאורולוגיים עבור חמיש ערים; השוואת השימוש ב"שנה מטאורולוגית טיפוסית" (TMY) לקבצי נתונים שנמדדו עבור שנים קיצוניות מבחן קריינת השימוש; והשואת התפקוד בפועל של מערכות סימולציה מחשב.

תוכן

עמוד		פרק
א	מבוא	1
א	המרה מיאט-שיא ל��וטיש	2
ב	אפייני הקולטים	3
ב	נתונים מטאורולוגיים	4
ג	תוצאות הממחקר	5
ד	שיקולים נספפים	6
ה	מסקנות	7
שרטוטים		
9	עקומת זמן-מטרה עבור קולט אופייני	1
9	ריגישות לזווית הנטייה	2
10	ריגישות לזווית האזימוט	3 a,b,c
טבלאות		
11-18	תוצאות החישובים עבור תל אביב במגוון רחב של כווני הקולטים	1-16
19	תוצאות החישובים עבור חיפה כאשר הקולטים פונים דרומה בזווית נטייה של 30°	18
19	תוצאות החישובים עבור ירושלים כאשר הקולטים פונים דרומה בזווית נטייה של 30°	18
20	תוצאות החישובים עבור באר שבע כאשר הקולטים פונים דרומה בזווית נטייה של 30°	19
20	תוצאות החישובים עבור אילית כאשר הקולטים פונים דרומה בזווית נטייה של 30°	20
נספחים		
22-31	טבלאות A-1A-5A גליונות סיכום מטאורולוגיים	5
32	טבלה A6 השוואת ה-TMY-NTנתונים מטאורולוגיים משנים קיצוניות	A6
32	טבלה A1 השוואת התפוצה בפועל לתוצאות סימולציה מקבילות שרטוט	A1

מערכות פוטו-וולטאיות בעיר ישראל: איזה גודל מתאים?

ד. פירמן, ד. פוירמן, פ. איבען, ב. מדוז וע. זמל

המחלקה לאנרגיה המשמש ולפייזיקה סביבתית,
המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלואשטיין
אוניברסיטת בן גוריון בנגב, קרית שדה בוקר 08499.

ע. ינץ, ו. ליבנסקי וא. סטר

תחומי מחקר פיתוח ונדסה, השירותematicologique,
בית דגן, 50250.

ש. שורקי

המחלקה לאנרגיה המשמש, המעבדה הלאומית לפיזיקה
קמפוס גבעת רם, ירושלים 91904.

1. מבוא

מערכת פוטו-וולטאית אופיינית כוללת מערך של קולטים פוטו-וולטאים, המיצרים זרם ישר כאשר פוגע בהם, וצמוד משךאלקטורי. תפקידו של ציוד זה הוא לטוען מצלרים לשימוש בעשויות החשכה, להמיר את הזרם הישר בזרם חילופין שייסופק לרשת החשמל הכללית, או שלוב של שני התקפדים.

הבעיה המרכזיית עמה מתמודד כל מתקנן מערכות פוטו-וולטאיות קשורה לגודלו של מערך הקולטים. ברור שגודל זה חייב להציג מדדיות האנרגיה של הצרכן, אולם קביעה הגודל הדורש היא מינימלית בغالל שתי עניות שימושיות. ראשית, החספק המתkeletal ממתקנן פוטו-וולטאית משתנה יחסית עם השינויים בעוצמת קרינה המוגיעה מהשמש. כך למשל, החספק המתkeletal מהkolט החשוף לקרינה ישירה גדול בהרבה מזה המופק ביום מעונן. שניית, יצרני הקולט מצינים את יכולת הייצור שלו במונחי "וואט-שייא" [Wp] המאפיינים את תפוקת הקולט בתנאי מבחן מסוימים - וחרמת תפוקה שריורית זו לתפוקה הצפוייה בתנאים מעשיים אינה פשוטה.

מטרת מדريك זה היא לאפשר למתקנן לעמוד את החספק הצפוי למשעה מכל W_p של קולטים שיוטקנו בכל אחת מחמש הערים הקיימות (מנקודת מבט גיאוגרפיה): חיפה, תל-אביב, ירושלים, באר שבע ואיילת.

2. חරפה מואט-שייא לקוטץ.

Wp היא יחידת החספק המתkeletal מkolט פוטו-וולטאי תלוי בעוצמת האור (או חזק מג'יך) מכך שיחס הפוטורטורה הקולט (טפרטורות גבוחות גורמות להקטנת הזרם) ובמידה מסוימת בהרכבת הספקטורי של האור הפוגע. לכן מאפיינים את הקולטים על פי החספק המופק בתנאי מבחן תקניים (STC). תנאים אלו כוללים אור בעוצמה של 1000 W/m^2 , טפרטורות קולט של $C = 25^\circ$ ותנאים ספקטוריים מוגדרים המכונים AM1.5 [1]. עוצמה של W/m^2 AM1.5 חסם, בקרוב, התנאים הצפויים בצהרים יום בחירות בNEG. ואולם, בתנאים אלו טפרטורות הקולט צפוייה לחיוות גבוחה במידת ניכרת מהיערך התקני של $C = 25^\circ$: $C = 50^\circ$ בחרף ו- 70° בקיץ. שמעות הדבר היא שבישראל מערכת פוטו-וולטאית כמעט לעולם לא תפעל בתנאים הקריםים ל-STC.

בכל זאת ניתן לחעריך את התפוקה הצפוייה כאשר יודעים את הפרמטרים האופיניים של הקולט ואת התנאים המטאורולוגיים. ראשית אנו מעריכים כמה קרינה פוגעת בkolט בכל רגע נתון [2]. זהו חישוב גיאומטרי הדורש שני נתונים מטאורולוגיים: קרינה הישרה והקרינה המפוזרת. בשלב השני מעריכים את טפרטורות הקולט [2]. שלב זה דרש את ידיעת הקרינה, טפרטורת השביבה ומחרות הרוח. ע"פ תוכנות חישובים אלו וידיעת הפרמטרים של הקולט ניתן לחשב את החספק המופק ברגע זה.

בדרך כלל, הנתוניים המטאורולוגיים מופיעים כממצאים שעתיים. לכן, החישוב המתואר נotonin למשה את החיספם המוצע (בוואט) או את האנרגיה הכלולית (בוואט-שעה) המופקים בכל שעה. ניתן לסכם ערכיהם שעתיים אלו על בסיס שנתי. לחילופין, אם רוצים לחביא בחשבון את השינויים בתעריף החשמל על פי השעה, חיום בשבוע או עונת משנה ניתן לחמיר את האנרגיה המופקת למונחים כספיים ולסכם ערכיהם אלו על מנת להעריך את שווייה הכלכלי של המערכת. בעובדה זו חושבה האנרגיה המופקת בעזרת התכנית PVISRAEL [3].

3. אפייניגי הקולטיים.

הרבייה הקולטיים שהיו זמינים בשנות ה 90, יוצרו מתאי אחד משני הסוגים הבאים: צורן חד-גבישי (monocrystalline silicon, c-Si) או צורן רב-גבישי (polycrystalline silicon, pX-Si). נרכזו גם נסיניות לשימוש בתאים שיוצרים מעריכים שבעשוור הבא ניתן היה להשיג קולטי Si-Si יציבים יותר וכן קולטים משכבות דקות של חומרים אחרים כמו CuInSe₂ או CdTe.

شرطוט 1 מציג עקומת זרם-מתנה אופיינית לקולט פוטו-וולטאי [4]. עבור Si ו-pX-Si הזרם פרופורציוני לעוצמת האור והוא לינארי מ-0 ועד הרבע מעלה לעוצמה של mA/W^2 . הזרם תלוי חלש בטמפרטורה, ויורד בכ $^\circ\text{C}$ /mA. לעומת זאת מתנה כמעטantalillyot של קולט תלויה בעוצמת האור אבל הוא רגש מ-0 ועד $^\circ\text{C}$ /mA. טמפרטורה, עם ירידת אופיינית של $2.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ לכל תא. כך למשל, לקולט של 50 Wp שיוצר מ-36 תאים סולריים המוחברים מתח-טמפרטורה של $^\circ\text{C}$ 80-100 ומקדם זרם-טמפרטורה בסביבת רק $^\circ\text{C}$.

בעובדה זו ביצנו מספר סימולציות שחתבסו על האפייניג של קולטים שיוצרים מתאי Si-c ו-pX-Si. למרות שיעילותם של תאים הרב-גבישיים נמוכח בכ 20% מזו של תאי גביש יחיד (כלומר יחידת שטח של קולט Si-X-Si נותנת החיספם נמוך יותר מאשר שטח של קולט Si-c), החישובים נותנים תוצאות דומות מאד עבור שני סוגים הקולטיים, בתנאי שמנרמלים את התוצאות לערך זהה של kW. מסיבה זאת טבלאות התקכנו בעובדה זו מוגשות במונחים של קולטי kW. כך נמנע חזרך לחציג טבלאות נפרדות עבור כל סוג תא. צורה זו של הצגה נוחה במיוחד לשימוש גם מפני שספק החתאים נוחגים לצינן את מחירם ביחסות של \$/Wp. כך, אם נתכנן מערכת פוטו-וולטאית של kWp 10 עלינו לצפות לחיספם הגדלן פי 10 מהערך הנוכחי בטבלת kWp 1 המתייחסה.

במחדרה ראשונה זו של המדריך לא כלנו טבלאות המתיחסות לתאים Si-a או מחומרים אחרים מפני שתכונותיהם החשמליות עדין נלמדות. אם יתברר שניתן לקבל מחומרים אלו תאים יציבים ובעל אפייניגים שונים במידה ניכרת мало של התאים הכלולים כאן, נוסיף את הטבלאות המתאימות בתקופה מוקדמת מכך. ככל מקרים אלו מופיעים שתאי Si-c ו-pX-Si ימייכו להוות את נתח השוק העיקרי בתקופה הקרובה.

4. נתוניים מטאורולוגיים

כמצוי לעיל, דרישים ארבעה סוגים נתונים מטאורולוגיים לביצוע החישובים: קרינה ישירה, קרינה מפוזרת, טמפרטורה ומהירות רוח. נתונים אלו מותנים מרצע לרגע, ולכן נדרש מיצג כלשהו. למטרה זו הונח מושג של שנה נתונים מטאורולוגית אופיינית (TMY). זהו קובץ נתונים הכלול ב-12 חודשים של נתונים שנתיים בפועל. ואולם, החודשים השנה האופיינית לא נמדדו בהכרח באותה שנה. במקרה זאת, עבור כל חדש נבחנה השנה השנתונית היו קרובים ביחסו לחזיות הרב-שנתית. כך מובטח שאף אחד מחודשי השנה האופיינית אינו כולל נתונים חריגים עבור הפרמטרים בהם אנו מעוניינים. במשמעות סקר הקרינה בנגב חכנו קבוע TMY עבור מספר אתרים בנגב, כולל באර שבע ואילת [5]. ואולם, חסוך אינו כולל אתרים מחוץ לנגב ולכן למטרות העבודה זו השגנו נתונים עברו ירושלים, תל אביב וחיפה במשך השנים 1998-1994 מקורות אחרים. לכן, הוחלט לייצר גם עבור ערים הנגב קבוע TMY המתבססים על נתונים שנים נקיים כמו אלו של ערים אחרות. נתונים אלו מכונים "שנה פוטו-וולטאית אופיינית" (TPVY). טבלאות סיכום קבועים TPVY, בפורמט הדומה לזה של קבוע TMY המוכרים, כוללות כניסה למדריך

זה (טבלאות Ala, Alb, A2a, A5a, A5b).

5. תוצאות חמקר

בחינת הטבלאות msecmoות את תוצאות החישובים החלנו להעטפות הזרם הישר מפני שכל מערכת פוטו-וולטאית ניתנת לשימוש במגוון רחב של יישומים כאשר ייצור זרם יש מהוות את השלב הראשון בספק לצרכי האנרגיה של היישום. אם יש צורך בחמרא לזרם חילופין, אנו נדרשיםhabia בחשבונו גם את עילויות החמרה. באופן טפסי גורמת החמרה זו לירידת של כ 15% בתפקות המערכת לעומת ערכיו הטבלה.

התוצאות msecmoות בטהלאות, עברו כל עיר, כמטריצת msecrim חמיצית את התפקות האנרגיה החודשית המתקבלת זרים יש מערכת של kWh 1 במהלך השעה הנדונה. ניתן היה לצפות שבמשך kWh 1 שעות הצהריים בחודש יוני תשפק מערכת כזו קרוב ל 30 kWh 1 פעולת בתנאי שמיים נקיים במשך שעה אמורה לשפק קרוב ל kWh 1 ותפקות 30 ימי צפואה להשתכם ל 30 kWh 1, ואולם הטבלאות מראות שהתפקוקה בפועל קתנה יותר: בתל אביב נקלט רק 22.3 kWh 22.5 kWh 22.3 kWh 22.7 kWh 22.7 kWh, ובאזור שבע 22.3 kWh 22.7 kWh. חסיבות לחבד חן הטמפרטורה הגבוהה יחסית של התאים בצהריים וחובדה שזווית נתיחה הקולטים, שנבחרה כ 30° כדי לחביטת תפקוקה שנתית מירבית, אינה אופטימלית עבור חדש יוני.

חשוות ערכי הטבלה לתעריףים המשתנים של חברת החשמל עשוייה לחת את השווי הכספי של החשמל המופק מהמערכת.

5.1 תל אביב.

רובה אוכלוסיית המדינה מרוכזת באיזור המטרופוליטני זה, בו עשויים מכשולים מצלים שונים לכפות את האוריינטציה בה יוצבו הקולטים. לכן חשוב עבור איזור זה טבלאות המתיחסות למגוון רחב של כווני הקולטים (טבלאות 1-16).

דוגמה 1: מה התפקוקה השנתית הצפואה למערכת של kWh 1 המוצבת על קוirs דרום של בניין בתל אביב (בוחנה שwon מஸון מכשול אינו מטייל כל על הקולט משך השנה)?

תשובה: על פי טבלה 14 התפקוקה שנתית היא kWh 828.

דוגמה 2: האם קוirs דרום הוא קוirs העדיין להצבת מערכת לייצור חשמל?

תשובה: רק במשך החורף. עיון בטבלאות 16-12 מראה שדרום-מזרח ודרום-מערב הם כוונים מועדפים לתפקוקה שנתית. למעשה, התפקוקה השנתית המירבית מתΚבלת כאשר הקולט פונה דרומה בזווית נטייה של 30°. dazu הכוון האופטימי פרט למכבים מיוחדים בהם משתנות הנסיבות. ציינו כבר מכבים בהם בניין שכן גבוח או מכשול מצל אחר עלול לכפות על המ騰נן לחזיב את הקולטים בכוון מועדף פחות. ואולם קיימים מכבים נזופים בהם נטייה של 30° אינה אופטימלית. לדוגמה, רצוי לחזיב מערכת שנועדה לתאורת חוץ במשך כל השנה בנטיה תלולה יותר כדי לנטרל את השפעת השילוב של לילות ארכויים ורמת קרינה נמוכה יותר במשך החורף.

דוגמה 3: מהי זווית הנטייה העדיפה לקולט הפונה דרומה המוצב על גג בית ספר?

תשובה: בית הספר אינו בשימוש בחודשים יולי ואוגוסט. בוחנה שאין צורך בחשמל בחודשים אלו עבור בית הספר, הרי עיון בטבלה 4 מראה שבאיזור תל אביב האנרגיה השנתית השימושית מקולט הנטו ב 30° היה kWh 1250 153.4 ~ 157.2 - 1562 ~ 1100 kWh 112.5 ~ 102.6 - 1319. מאחר שערך זה נמוך מערך שתחזקן עבור קולט הנטו ב 30°, אנו מסיקים שנטיה בת 60° אינה עדיפה.

בכדי למצוא את הנטייה האופטימלית לכל מצב נתון יש ליצור לבצע אינטראולציה בין הערכיהם התקובים בטבלאות. כך למשל מראה שרטוט 2 את השינוי האנרגיה השנתית עבור קולט בעל מפנה דרום בטל אביב כאשר משתנים את זווית הנטייה. ניתן לייצר עקומות אינטראולציה דומות לחודשים בודדים על פי טבלאות 9, 1, 4, 9, 14 שיאפשרו

T

לקורא המעניין להשלים את פתרון דוגמה 3.

באופן דומה מציגים שרטוטים 3a ו 3b את השינויים באנרגיה השנתית כאשר משנים את ח幡נה של קולט אנכי בתל אביב.

2.2 חיפה, ירושלים, תל אביב וישראל.

על מנת לחביל את מספר הטרלאות בחרנו לחציג עבור ארבע הערים רק את תפקות המערכת עם מפנה דרומי וזווית נתיחה של 30°, ככלומר את התפקידות השעתית הצפויות מערכות המוצבות בגיאומטריות אחרות, ניתן לחשוף שתית מירביה (טרלאות 20-17). אם מעוניינים בגיאומטריות אחרות, ניתן להשתמש בטלאות תל-אביב בשילוב עם הטבלה עבור כל עיר.

דוגמה 4: כמה אנרגיה תיציר מערכת פוטו-וולטאית אופקית במשך שנה בחיפה?

תשובה: נתבונן ראשית בטלאות 1 ו 4 כדי למצוא ש默כת אופקית בתל אביב מייצרת 91% מתקופת מערכת בעלת מפנה דרומי ונתיחה של 30° (1422 kWh לעומת 1562 kWh בחישוב לשנתו). מאחר שהחסימולציות מראות שיחסים אלו אינם רגילים לאטר עבורו נערך החישוב, השתמש בערך של 1517 kWh טבלה 17 עבור מערכת בעלות מפנה דרומי ונתיחה של 30° בחיפה ונחשב 91% מןו כדי לקבל את תפקוקת המבוקשת של kWh 1380 בשנה.

דוגמה 5: צרכן ירושמי זוקק ל kWh 6000 של אנרגיה חשמלית בשנה. איזה חלק מצריכה זאת הוא יכול לספק בעזרת מערכת בת kWh 3 מהותקנת על גגו?

תשובה: על פי טבלה 18, מערכת בת kWh 1 הפונה דרומה ונתיחה ב 30° מספקת בירושלים kWh 1600 בשנה. מספר זה יש להפחית בכ 15% עבור האובדןים בחירה מזרים ישר לזרם חילופין כך שאנרגיה החשמלית המופקת תהיה בשיעור של kWh 1360 בשנה. מערכת גדולה פי שלושה תספק לכן kWh 4080 בשנה מהווים 68% מהצריכה.

6. שיקולים נוספים

6.1 דיקוק חישובים

כל דיוון העוסק בדיקוק חישובים חייב לחביא שני היבטים בחשבון. חיבט אחד נוגע לרמת הדיקוק בה יכולת תכנון כמו PVISRAEL לשחרר את הביצוע של מערכת פוטו-וולטאית לאחר מעשה, ככלומר תוכן שימוש בתנוגנים המטאורולוגיים שנמדד בפועל לאורך התקופה בה פעולה המערכת. לחיבט השני אופי סטטיסטי: מה רמת הדיקוק המצוופה מחישובים המבוססים על הנתונים המטאורולוגיים הכלולים בקבצי TPVY? במלים אחרות, נניח שנຕגן מערכת על סמך קבצי TPVY הכלולים בטלאות של דוח זה זה, עד כמה חמורה יכולה להיות הטעות בחישובאה לתפקוקת המערכת בפועל בשנה כלשהי?

כדי לענות על שאלה הראשונה אנו מציגים חישוב לשווה החוזרת בפועל שנמדדה עבור קבוצה של מערכות פוטו-וולטאיות שהובנו בשדה בוקר במפנה דרומי ובזווית נתיחה של 30° לאופק בתקופה של שנה בין יוני 1999 ומאי 2000 ובין PVISRAEL חישובי. התחנה הוזנה בתנוגנים מטאורולוגיים (קרינה גלובלית על מישור אופקי, קרינה ישירה, טמפרטורת שבירה ומהירות רוח) שנמדד בפועל באותה תקופה זמן וכן בפרמטרים החשמליים שנמדד עבור הקולטים. נתונים התפקוקה כוללים את הממצאים של תפקוקתיהם של עשר מיני-מערכות בלתי תלויות שנרשמו כל שעה במהלך אותה שנה. כל מערכת כלל שני קולטים בתפקוק נמדד מזעט של kWh 39.3 בטור לממיר תספק כל 100 ואט ויעילות נומינלית של 95%. ראווי לציין שכל עשר המערכות הניבו תפקוק דומה עם פיזור ממוצע של ±1.5%. תוצאות החשואה מוצגות בשרטוט A1.

התבוננות בשרטוט A1 מראה שחישובי התפקוק החודשיים של PVISRAEL נוטים להיות כ 10% נמוכים מהתפקוקות המדודות. התפקוק השנתית הכוללת שחושבה לכל מערכת הייתה kWh 137 בחשוואה לממוצע הנמדד kWh 149. זו, כמובן, בדיקה יחידה ואולם היא מייצגת למד, בכך שהיא מבוססת על תוצאות שנה שלמה, ושגיאות המדידה הן קטנות יחסית. מכאן ניתן להעריך שהערך הנקובים בטלאות של דוח זה הם

שמרנים בכ % 10 על בסיס שנתי.

בכדי להעריך את התנדבות הстатיטיות בפרמטרים האקלימיים משנה לשנה, הרצנו את התכנון עבור כמה שנים עבורן נמדדו ערכיהם קיצוניים. כך, למשל, השתמשנו בתנוני שנות 1992 שהייתה דلت קריינה בתוצאתה מבערת חומצתו במהלך המפרץ של 1991 ומחתרצות הר הגעש פינטו בויפיניים באוטה שנה. כמו כן, השתמשנו בתנוני חישיא של 1999 שהייתה ברוכת קריינה במוחך. בטבלה A6 מראה השוואת חודשית בין חישובי PVISRAEL המבוססים על קובץ TMY של שדה בוקר לבין תוצאות חישובים המבוססים על התנוניות שנמדדנו בשנים קיצוניות אלו.

מעיוון בטבלה A6 ניתן ללמוד שאילו השתמשנו בתנוני TMY לחישוב תפוקת המערכת בשנים 1992 או 1999, השיטות בתוצאות עבור חודשים בודדים היו עלולות להציג ל 27%, אבל השגיאה בתפוקה השנתית הייתה בסביבות 5% בלבד.

2. אמינותות נתוני הקולט

בדיקות קפדיות שנערכו במרכז הלאומי לאנרגיה שמש בשדה בוקר על מגוון רחב של קולטים פוטו-וולטאים שספקו על ידי יצרנים גדולים מעמידים על נתוני היצרנים להציגים בערכת התפוקה החופשית מוצרים. חלק מהערכת היתר נובע בנסיבות מחבדלים בין תוצאות הבדיקה בסימולטים (מקורות אור מלאכותיים) ובבדיקות של חשיפה לקרינה המשמשת בתנאי שדה. במקרים מסוימים התגלו חבדלים של עד 20% [6]. בחישובים שערכנו נחנכו ש kW_{h} ו- kWh מייצגים את תפוקת הקולט. רוב היצרנים מוכרים את התאים על פי יחידה זו וישלמו את החסר עבור כל פער מופח. ואולם על הלקווח להוכיח שאכן המערכת שקיבלה סותה מדויקת המצוין ולדאוג שיש מקומות מתאימים להתקנת תאים נוספים אם יוכח שיש צורך בכך כדי להציג תפוקה/drושא.

3. אמינותות המערכת

הערכות הכלולות בטבלאות מניחות שהמערכת تعمل ללא תקלות במשך כל השנה. למעשה, הקולטים עצם הם ממש מאחר שני עשוורים של נסיוון בייצור הולידו מוצרים משופרים ואמינים וניתן לצפות מוקלטים ברכיבים הנלוויים כמו הממירים היא תקינה במשך 20 שנה ויתר. ואולם החתפות ברכיבים הנלוויים לאנרגיית השמש על כמה ממירים מודרניים הסתבר שרובם פועלו לפחות במשך שנה. לחובבי אנרגיית שימוש נלהבים מחווה מזע זה את מחיצת הכוח המלא ואולם הלוקחות שירכשו מערכות כושלות עלולים להתקל בחוץ הריקת! ראוי לדגיש כאן שכדאיות המערכת תלויה ממש בפעולת סדרה ובתתי מופרעת. לקוח פוטנציאלי של מערכת פוטו-וולטאית ייטיב לעשות אם יdag להבטיח בחוזה הרכישה הספקה מיידית של החלפים עבור רכיבים שיחדלו לפעול.

7. מסקנות

אם נתבונן בסיכון השנתיים המוצגים בטבלאות 5-1 נמצא שתפוקת קולט פוטו-וולטאי של kW_{h} ו- (לפנינו המרה לזרם חילופין) עולה מערך מינימלי בחיפה (1520 kWh בשנה), ל kWh 1560 בשנה בתל אביב, kWh 1600 בשנה בירושלים, kWh 1640 בשנה בבאר שבע ועד למקסימום של kWh 1700 בשנה לאיילת. הערך היישרלמי מהוווה גם את המוצע וגם את החזיוון, והערככים השנתיים של התפוקה בערים אחרות סוטים מערך זה ב ± 6% לפחות. מסקנה זו נובעת מממדיה הקטנים יחסית של מדינות ישראל והיא מסויימת למתכננים בכך שמערכת פוטו-וולטאית תנתן פחות או יותר אותה תפוקה בכל אתר בישראל, כאשר באיזור חיפה צפואה ירידת של כ 6% ובאזור אילת עלייה של כ 6% יחסית למוצע הארץ.

טבלאות מובאות בדיקוק של ספרה אחת מעל הדיווק המשמעותי. בחרנו בהציגה זו בכך לחמנע מהסכמה של שגיאות עיגול מצבירות בתוצאות הדומים לאלו המפורטים בדוגמאות שהוצעו לעיל. את התוצאה הסופית ניתן לעגל לדיקוק של שלוש ספרות משמעותיות. הטבלאות מאפשרות למתכנן להעריך את המפנה העדייף לחצבת הקולטים לכל יישום ספציפי, לחביא בחשבון אילוצים מקומיים המונעים הצבה אופטימלית ולחשב את החפסה (במנוחה אנרגיה או חפסה כספי) הנובע מיילוצים אלו.

ה庫רא הקפדן ודאי הבחן בכך שהטבלאות שחושו עבור תל אביב אין סימטריות

בכוון מזרח-מערב (כפי שנייתן לראות מרטוטים 3a ו 3b). כנראה שאסימטריה זו נובעת מקרבתה של תל אביב (ליתר דיוק, של תחנת המדייה בבית דגן) לים הגרם לאסימטריה דומה בעוניים. הבדלים מסווג שוניה, אבל קרובים בגודלם, צפויים בירושליםים בגלל קרבתו של מדבר יהודה לגבולה המזרחי של העיר. בכלל מקרה, חתיקוניים הנובעים מסימטריה זו אינם גדולים ואינם חריגים מתחום השגיאה הטיפוסית של $10\pm$ המוחסת לחישובים החודשיים המוצגים כאן.