

יולי 2017 | מחקר מספר 111

התועלת הנוספת ממתקנים סולאריים על גגות

אלכסנדר קליינר

עמית מחקר, משרד האנרגיה,
מרכז מילקן לחדשנות, מכון ירושלים למחקרי מדיניות

צוות העבודה:

ד"ר ברכה חלף, מדענית ראשית, משרד האנרגיה
ד"ר גדעון פרידמן, מנהל אגף מחקר ופיתוח, משרד האנרגיה
פרופ' ניר בקר, דיקן הפקולטה למדעי הרוח והחברה, מכללת תל חי
פרופ' דורון לביא, מנכ"ל קבוצת פארטו



משרד האנרגיה
www.energy.gov.il



מכון ירושלים
מרכז מילקן לחדשנות

מכון ירושלים למחקרי מדיניות Jerusalem Institute for Policy Research
מרכז מילקן לחדשנות Milken Innovation Center

תודות

תודה לשאול מרידור ולנעה ליטמנוביץ על ההזדמנות לעשות עבודה מעניינת זו. תודה לברכה חלף ולגדעון פרידמן על הסיוע הרב והמשוב המתמיד. תודה לניר בקר ולדורון לביא על ההעזרה וההכוונה. תודה לאורלי מובשוביץ-לנדסקרונר, לגלן יאגו, לסטיבן זכר, ולליאורה שוהם-פיטרס על ההזדמנות לחלק בתוכנית העמיתים, על התמיכה ועל ההעשרה. תודה לאנשי משרד האנרגיה: דורית הוכנר, רועי ישראלי, נופיה בכר, ואמיר שפרלינג. תודה לאנשי רשות החשמל: נורית גל, תניב רופא, משה בן יאיר, חוני קבלו, נעם פלרסון, יובל זוהר, איגור סטפנסקי, אשר גטא, ויוסי סוקולר. תודה גם לאנשים הבאים שתרמו מזמנם והיו מוכנים לסייע: גל שופרוני, עליזה פליישר, דניאל מלצר, ברכה שנידלר, אמיר רובין, יואש לברון, גדי רוזנטל, תהילה וינטרוב, נתנאל עודד, גיל פרואקטור, רענן אמויאל, סיניה נתניהו, מנחם זלוצקי, אנה טרכטנברוט, יואב שגיא, גיל פונדיק, איתן פרנס, ודן וינשטוק. תודה לענבר קמחי-אנגרט על ההגיייה והעריכה הלשונית.

על אודות תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות

תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות מקדמת את הצמיחה הכלכלית בישראל באמצעות התמקדות בפתרונות חדשניים, מבוססי שוק, לבעיות מתמשכות בתחומים חברתיים, כלכליים וסביבתיים. התוכנית מתמקדת באיתור פתרונות גלובליים והתאמתם למציאות הישראלית ובבניית ממשקים חיוניים המחברים בין משאבים ממשלתיים, פילנתרופיים ועסקיים, לטובת צמיחה ופיתוח לאומי בר-קיימא.

התוכנית מעניקה מלגות שנתיות לישראלים מצטיינים, בוגרי מוסדות להשכלה גבוהה בארץ ובעולם, המתמחים במוקדי קבלת ההחלטות הלאומיים ומסייעים בפיתוח פתרונות באמצעות מחקר והתמחות. היקף הפעילות של עמיתי התוכנית הוא מקסימלי – התמחות, הכשרה ומחקר במשך חמישה ימים בשבוע.

במשך שנת התמחותם עוסקים עמיתי מכון מילקן במחקר המדיניות במשרדי הממשלה וברשויות שלטוניות אחרות, ומסייעים למקבלי ההחלטות ולמעצבי המדיניות בחקר ההיבטים השונים של סוגיות כלכליות, סביבתיות וחברתיות.

בנוסף עורכים העמיתים מחקר מדיניות עצמאי, שמטרתו לזהות חסמים לתעסוקה ולצמיחה בישראל ולאתר פתרונות אפשריים. מחקרי העמיתים מתבצעים בהדרכת צוות אקדמאי ומקצועי מנוסה ותומכים במחוקקים וברגולטורים, המעצבים את המציאות הכלכלית, חברתית והסביבתית בישראל.

במהלך השנה מוענקת לעמיתים הכשרה אינטנסיבית במדיניות כלכלית, ממשל ושיטות מחקר. במסגרת מפגשי ההכשרה השבועיים, העמיתים רוכשים כלים מקצועיים לכתובת תזכירים, מצגות וניירות מדיניות, וכן כלי ניהול, שיווק ותקשורת. בנוסף, נפגשים העמיתים עם בכירים בממשל ועם אנשי אקדמיה מהשורה הראשונה בישראל ובעולם. בסמסטר הראשון, העמיתים משתתפים בקורס המתמקד בחידושים פיננסיים, במסגרת בית הספר למנהל עסקים באוניברסיטה העברית בירושלים. הקורס מקנה 3 נקודות זכות אקדמיות, ומלמד אותנו פרופ' גלן יאגו, מנהל בכיר, ומייסד, המעבדות לחידושים פיננסיים™ במכון מילקן.

את בוגרי התוכנית ניתן למצוא במגוון תפקידים בכירים במגזר הפרטי, כמרצים באקדמיה, במגזר הציבורי וכיועצים לשרים ולמשרדי הממשלה. ישנם בוגרים שנקלטו במשרדי הממשלה, ואחרים המשיכו ללימודים גבוהים באוניברסיטאות מובילות בישראל, ארצות הברית ובריטניה.

תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות היא לא פוליטית ובלתי מפלגתית, ואינה מקדמת קו פוליטי או אידאולוגי.

תוכן עניינים

4	תקציר מנהלים.....
7	1. מבוא.....
14	2. סקירת ספרות.....
17	3. חישוב התועלת.....
17	3.1 תשתיות ההולכה והחלוקה
19	3.2 איבוד חשמל ברשת
21	3.3 קרקע
28	3.4 ביטחון אנרגטי ואמינות אספקה.....
30	3.5 תעסוקה.....
32	3.6 התייעלות אנרגטית (הצללה).....
35	4. סיכום.....
37	ביבליוגרפיה.....

תקציר מנהלים

החלטות ממשלה מספר 4450 מיום 29 בינואר 2009, ומספר 542 מיום 20 בספטמבר 2015, קובעות כי על ישראל לעבור לייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת בהיקף של 10% לפחות (מסך הצריכה) עד 2020 ובהיקף של 17% עד 2030. כדי לעמוד ביעדי הממשלה לשנת 2020 יידרשו למשק הישראלי בין 1,500 ל-2,000 מגה-ואט נוספים של הספק סולארי מותקן, מעבר ל-1,000 הקיימים כיום ול-400 הנמצאים בשלבי ההקמה. פירושו של דבר הוא שנצטרך בשנתיים וחצי יותר מלהכפיל את ההספק הקיים כיום, הספק שנצבר על פני למעלה מ-5 שנים. עד כה מרבית ההספק הסולארי הגיע ממתקנים שנמצאים על הקרקע, אך כדי לעמוד ביעדים הקרובים לא נוכל להמשיך להסתמך בעיקר על מתקני קרקע. הזמן שלוקח להקים מתקנים כאלה ארוך מאוד, דבר שנובע מהצורך בתשתיות לחיבור לרשת החשמל ובאישורים לשימוש בקרקע. כמו כן, כמות הקרקע בישראל מוגבלת מאוד ממילא בגלל הקצאות השטחים לשימושים שונים (שימושים צבאיים, חקלאות, שמורות, תשתיות, ועוד), וברור כי אין באפשרותנו לייצר עוד קרקע. בהשוואה למדינות אחרות, מדד צפיפות האוכלוסייה בישראל (נפשות לקמ"ר) עומד על 373.2, פי 10 מהממוצע בקרב חברות הארגון לשיתוף פעולה ולפיתוח כלכלי (OECD).

הפתרון האפשרי לבעיה המתוארת הוא מעל ראשו – גגות. מתקנים סולאריים על גגות הם פשוטים להקמה וכמובן שאינם תופסים קרקע. פוטנציאל הקמת מתקנים אלה על שטח בנוי בישראל נאמד בתרחיש השמרני באלפי מגה-ואט מותקן, ובתרחישים אופטימיים בלמעלה מעשרת אלפים מגה-ואט. נכון להיום ישנם כ-400 מגה-ואט על הגגות, ועל כן איננו קרובים למיצוי הפוטנציאל. האתגר בהקמת מתקני הגגות הוא העלות שלהם – הקמת מתקני הגגות (בעיקר הקטנים) יקרה ביחס למתקני קרקע גדולים, וללא תמריצים מתאימים יהיה קשה להקים מתקנים כאלה. היות שכך, במחקר זה רצינו לבחון אם מתקני הגגות טובים בחובם ערך נוסף למשק בהשוואה למתקני קרקע, ואם כן, כיצד יש לתת להם עדיפות. סקרנו את כלל סוגי התועלת המשמעותיים ביותר במתקני הגגות, וכימתנו אותם למונחים כספיים לפי קילו-ואט שעה (קוט"ש). יש להדגיש כי המהות במחקר זה איננה סקירת כלל סוגי התועלת למשק משימוש באנרגיה מתחדשת, אלא התועלת הנוספת ממתקני גגות ביחס למתקני קרקע.

סוגי התועלת העיקריים בהקמת מתקני גגות בהשוואה למתקני קרקע (שדות) שכומתו במחקר זה הם כדלקמן:

תועלת ישירה:

- **חיסכון בתשתיות** – בהקמת מתקני גגות אנו חוסכים את עלות סלילת הקווים הייעודיים הנדרשים לחיבור השדות הסולאריים לרשת החשמל.¹
- **חיסכון באיבוד חשמל** – בהקמת מתקני גגות (בעיקר באזורים עירוניים) אנו מייצרים וצורכים את החשמל בקרבת מקום, ולכן אנו נמנעים מאיבוד החשמל בעת העברתו משדות מרוחקים למוקדי הצריכה.²

¹ נוסף על החיסכון המתואר, בייצור חשמל במוקדי הצריכה, אפשר לדחות (בשוליים) שדרוגים בקווי ההולכה (ראו בהרחבה בפרק 3.1). מצד שני, ברמות חדירה גבוהות של אנרגיית שמש ייתכן שיהיה צורך בעיבוי רשת החלוקה, שכן בשעות שיש ייצור בגגות אין צריכה, צריך להעביר את החשמל הנוצר הלאה. מסיבות אלה, החיסכון בדחיית השקעות רשת ההולכה יכול להתקזז עם ההשקעה שתידרש ברשת החלוקה. עם זאת, במצב הנוכחי בישראל, הרשת בדרום, שם קמים מרבית מתקני השדות, אינה ערוכה לקלוט מתקני שדות רבים ללא השקעה משמעותית בתשתית (ראו תרשים 4 ו-5 במבוא), ולכן המעבר למתקני גגות במוקדי הצריכה, באזורים שהרשת עוד פנויה לקלוט, הוא פתרון אפשרי.

² במקרים שלא כל החשמל נצרך בקרבת מקום, החיסכון על איבודי החשמל יהיה קטן יותר.

תועלת עקיפה:

- **חיסכון בקרקע** – בהקמת מתקני גגות אנו חוסכים בקרקעות, ולמעשה אנו אף מקטינים את הסבירות לשימוש בשטחים בעלי רגישות סביבתית גבוהה, לנוכח התפתחותה של המדינה והצורך לעשות שימושים נוספים בקרקע.³ ככלל, החיסכון רלוונטי גם בייצור חשמל סולארי על מאגרי מים, מגרשי חנייה ועל מבנים חקלאיים, ועבור פתרונות אחרים המיייתרים את הצורך בקרקע.
 - **תרומה לאמינות האספקה ולביטחון האנרגטי** – ישראל היא אי אנרגטי, ובניגוד למדינות אירופה, אין לה אפשרות לייבא חשמל. בהקמת מתקנים על גגות אנו מייצרים חשמל במוקדי הצריכה, ולכן צרכני החשמל חשופים פחות לאיומים שונים (כגון טילים או אסונות טבע) על רשת החשמל ועל מקורות הייצור המרכזיים. תועלת זו עדיין לא מתקיימת במלואה בגלל תקנות מנהל החשמל, שלא מאפשרות לצרוך חשמל מהמתקן הסולארי בעת תקלה ברשת החשמל.
 - **תרומה לתעסוקה** – הקמה של מתקני גגות רבים (בעיקר קטנים) דורשת יותר כוח אדם מהקמה של שדה בהספק זהה, ולכן מתקני גגות יכולים לספק פרנסה ליותר אנשים במשק. יתר על כן, ביזור מתקני הגגות והפיכת משקי הבית לשותפים באמצעי ייצור החשמל הוא שוויוני יותר לכלל המשק.
 - **תרומה להתייעלות אנרגטית (הצללה)** – עצם הקמת הפאנלים הסולאריים על הגג תורמת לקירוי הגג, שכן הפאנלים קולטים את חום השמש לפני שהוא נספג במלואו בגג. ככל שהגג מתחמם פחות, כך גם פנים המבנה נשאר קר יותר, ולכן ניתן להשתמש בפחות חשמל למטרות קירור בקיץ.⁴
- התרשים שלהלן מציג את הערך הכולל ואת הערך הנפרד עבור כל אחד מסוגי התועלת שפורטו לעיל.⁵ במקום שהתאפשר העדפנו להיות שמרנים בחישובנו, ומשום כך ייתכן כי בפועל ערך התועלת גבוה יותר.⁶

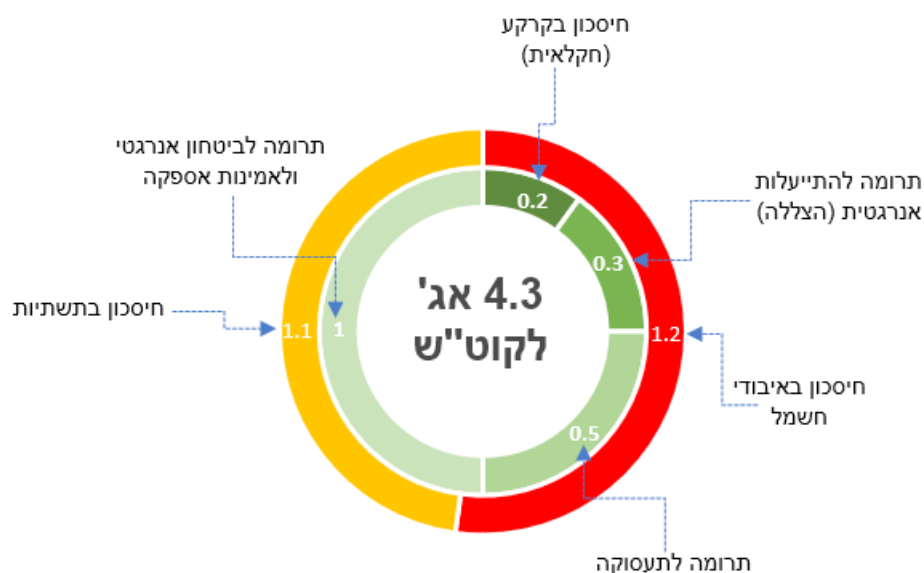
³ החיסכון בקרקע הוא ההפרש בין דמי החכירה שיזמי השדות הסולאריים נדרשים לשלם, לבין הערך המלא של הקרקע, הכולל את תרומת השירותים האקולוגיים. חישוב החיסכון המופיע בתקציר נעשה על בסיס השוואה לקרקע חקלאית, תוך הכללת ערך התוצרת והערך האקולוגי של הקרקע (ראו פרק 3.2.2 להרחבה). כאשר הקמת השדות הסולאריים נעשית על קרקע בייעוד חקלאי בשטח משבצת שאינה מעובדת, הרי שערך הקרקע בפועל יכול להיות נמוך יותר. לעומת זאת, ככול שבקרקע שהמתקן הסולארי מוקם עליה יש רמת שירותים אקולוגיים גבוהה יותר (למשל, שטח פתוח), הרי שהחיסכון שבאי-שימוש בקרקע יהיה משמעותי יותר (ראו פרק 3.2.1 להרחבה).

⁴ התועלת מהצללה יכולה להיות רלוונטית גם לקירוי חניונים, אם אנשים מוכנים לשלם יותר על חנייה מקורה. עם זאת, הערך שנאמד במחקר זה חושב על בסיס חיסכון החשמל מהצללה במבנים, ועל כן אין ודאות שהוא מספק אומדן לתרומה לקירוי חניונים. בחישוב החיסכון הכולל מהצללה ישנה התייחסות לאפקט ההפוך ושקלול שלו – בחורף הגג מתחמם פחות ולכן פנים המבנה יכול להיות קר יותר. עם זאת, בשקלול ההשפעות, האפקט של הקיץ חזק יותר משמעותית (ראו פרק 3.6 להרחבה).

⁵ מכיוון שהערך של התועלת מחושב לפי קוט"ש, הוא רלוונטי למגוון גדלים של מערכות סולאריות על גגות.

⁶ לא כללנו תועלת סביבתית כגון הקטנת פליטות, שכן השוואה היא בתוך המסגרת של ייצור סולארי (גגות מול קרקע), ולא מול ייצור קונבנציונלי.

איור א. התועלת הנוספת ממתקנים סולאריים על גגות



נתון: משרד האנרגיה, 2017.
מקור: מרכז מילקן לחדשנות, 2017.

התועלת הכוללת שכומתה היא למעשה החיסכון שבהקמת מתקני גגות סולאריים (ביחס לקרקע), ותרומתם הנוספת למשק ולציבור בישראל.

המלצות

- יש לשקול לתת את התועלת הישירה למשק החשמל (מניעת איבוד חשמל וחיסכון בתשתיות), או חלקה, כפרמיה על תעריף השדות ליוזמים שבחרים להקים מתקנים על גגות (2.3 אג' לקוט"ש).⁷ לפרמיה זו רצוי להוסיף את התועלת מהתרומה לביטחון האנרגטי ולאמינות האספקה, בהנחה שהשימוש במתקנים סולאריים יתאפשר בעת תקלת רשת. עבור יתר סוגי התועלת יש לפעול בתיאום עם הגופים האמונים על הנושאים הרלוונטיים, לשם מתן תמריצים מתאימים.
- רצוי לאפשר לציבור למכור עודפים מעבר לצריכה לרשת (במסגרת הסדרת מונה-נטו), בהתאם ליכולת של הרשת לקלוט, כדי להגדיל את כמות ההספק שהציבור בוחר להתקין.⁸

⁷ הנחת העבודה היא כי עלות החיבור של מתקני הגגות לרשת קטנה באופן ניכר בהשוואה לחיבור מתקני שדות הדורשים, בין היתר, הקמת קווים ייעודיים. אם עלות חיבור מתקני הגגות תיעשה משמעותית, ובהנחה שמדובר במתקנים שאינם נמצאים בקרבת תשתית קיימת, הרי שיהיה צורך לקזז עלות זו מהפרמיה שחושבה.

⁸ מונה-נטו הוא הסדר צרכני המאפשר לכל צרכן לייצר חשמל באמצעות מערכת סולארית בביתו או במקום עסקיו, ולקזז את עודפי הייצור עם סך צריכת החשמל מהרשת.

- הסדרת מונה-נטו משתלמת לציבור גם במתכונתה הנוכחית, אך אנשים רבים אינם מודעים לאפשרות הזו. עד כה לא נעשה ולו קמפיין אחד משמעותי במדיה המרכזית בדבר היתרונות הרבים בהקמת פאנלים סולאריים על הגגות. על הממשלה לעודד את הציבור להתקין פאנלים סולאריים, ונוסף על כך, עליה לתת דוגמה לשימוש בפאנלים סולאריים על מבנים ומתקנים המשמשים אותה.
- חלק משמעותי ממחיר המערכות הסולאריות עבור משקי הבית נובע "מעלויות רכות", עלויות שאינן קשורות לעלות החומרה (חומרים, ציוד, וכו'). כדי שיהיה זול יותר להקים מתקני גגות, על הממשלה להמשיך להסדיר את התחום ולעודד תחרות וכניסה של חברות נוספות.
- בשנים האחרונות פעלה הממשלה להסרת חסמים משמעותיים מאוד בהקמת מתקני גגות (היטלים, מע"מ, מס הכנסה ועוד), אך רצוי להמשיך להסיר חסמים, בדגש על הסרת חסמי מימון, שיאפשרו מימון זול למתקנים סולאריים על גגות, בעיקר עבור משקי הבית.⁹ כמו כן, יש להסיר חסמים המונעים הקמה וקיזוז של מתקנים על גגות משותפים.

1. מבוא

כדי לעמוד ביעדי החלטות ממשלה מספר 4450 מ-29 בינואר 2009, ומספר 542 מ-20 בספטמבר 2015, על ישראל לעבור לייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת בהיקף של 10% לפחות (מסך הצריכה) עד 2020 ו-17% עד 2030.¹⁰ כיום ישראל נעה סביב 3% אנרגיה מתחדשת. ישנן מספר סיבות להתקדמות האיטית אל היעד, אך המרכזית שבהן נוגעת לעלות ייצור החשמל באמצעות אנרגיית שמש (פוטו-וולטאית).¹¹ עד לפני מספר שנים מחירי הפאנלים בטכנולוגיה פוטו-וולטאית היו יקרים מאוד. בהתאם לכך, תעריף החשמל לייצור באמצעות טכנולוגיה זו עמד בשנת 2009 על 201 אג' לקוט"ש (רשות החשמל, 2017). בשל הרצון למנוע מתעריף החשמל לזנק שולבו האנרגיות המתחדשות באיטיות. כיום מחירי הפאנלים נמוכים במעלה מ-80% בהשוואה לשנת 2009 (IRENA, 2016). בעקבות זאת, במכרז האחרון של רשות החשמל ליצרנים בטכנולוגיה פוטו-וולטאית במתח נמוך וגבוה נקבע שיא חדש של מחיר נמוך בישראל – 19.9 אג' לקוט"ש, ויש מדינות בעולם שהתעריפים שנקבעו בהם נמוכים משמעותית, עד כדי 2.42 סנט אמריקאי לקוט"ש בדובאי (IRENA, 2017a; REN21, 2017). במחיר הנוכחי מתחרה ייצור חשמל באמצעות פאנלים פוטו-וולטאיים בייצור הקונבנציונלי, ובחלק מהמקרים אף יכול להיות זול יותר.

⁹ נושא החסמים נסקר בעבודת ועדת החסמים לאנרגיה מתחדשת בראשות מנכ"ל משרד האנרגיה, שקמה בהתאם להחלטת ממשלה 1403 מיום ה-10.4.16, ומסקנותיה צריכים להתפרסם בקרוב.

¹⁰ אנרגיה מתחדשת – אנרגיה שמקורה הבלעדי הוא אחד מאלה: שמש, רוח, מים, פסולת אורגנית, שפכים או תופעות טבע אחרות. אלה מקורות טבע שניצולם להפקת אנרגיה גורם לזיהום סביבתי נמוך באופן משמעותי יחסית להפקת אנרגיה משריפת דלקים (אתר רשות החשמל, 2017).

¹¹ מתקן פוטו-וולטאי הוא מערכת סולארית לייצור חשמל המבוסס על תאים פוטו-וולטאיים (PV) המכונים גם תאים סולאריים, שמפיקים אנרגיה חשמלית מקרינת השמש. המערכת כוללת קולטים וממיר שהופך זרם ישר לזרם חשמלי המותאם לרשת החשמל (אתר משרד האנרגיה, 2017).

כדי לעמוד ביעדי הממשלה עד 2020 יהיה צורך ב-3,458 מגה-ואט של הספק מותקן מאנרגיה מתחדשת (רשות החשמל, 2017).¹² עד כה ההספק המותקן עומד על כ-1,000 מגה-ואט, רובו סולארי, ויש עוד כ-400 מגה-ואט בתהליכי הקמה. ההספק הנוסף להתקנה עד 2020 הוא בסדר גודל של כ-2,000 מגה-ואט. בתכנון המקורי הספק זה היה צריך לכלול מתקני רוח, אך נוכח הקשיים שמונעים את הקמתם במועד, סביר כי עד 2020 מתקנים אלה לא יספיקו לקום, ועל כן ההספק המותקן יהיה ברובו סולארי. עד עתה מרבית המתקנים הסולאריים שקמו או שנמצאים בהקמה הם מתקני קרקע. מתוך הספק של כ-1,400 מגה-ואט, כ-1,000 מגה-ואט מתייחסים למתקני קרקע, וכ-400 הם מתקני גגות (מכסה + מונה-נטו). הבעיה העיקרית בהקמת מתקני קרקע היא השטח שהם תופסים. ככלל אצבע, מתקן סולארי בטכנולוגיה פוטו-וולטאית תופס כיום בממוצע 13 דונם עבור מגה-ואט מותקן, בהנחה שכוללים את התשתיות הנדרשות למתקן (דרך גישה, קווים לחיבור לרשת החשמל, ותחנת ממסר במתקנים גדולים).¹³ אם ניקח לדוגמה מתקן התופס 13 דונם למגה-ואט מותקן, ונחשב את השטח הדרוש להקמה של 4,000 מגה-ואט, שהם פחות מסך ההספק הנוסף שיידרש לעמידה ביעדי 2030, נגיע לסך שטח של 52 קמ"ר. לשם ההשוואה, שטח השיפוט של תל-אביב-יפו עומד על כ-52 קמ"ר.

כיוון שמתקנים סולאריים תופסים מקום נרחב, מציאת שטחים פנויים עבור מתקנים אלה היא הליך סבוך מאוד. בשנת 2002 קמה ועדה, "ועדת זוהר הראשונה", שתפקידה היה לאתר שטחים פוטנציאליים להקמת מתקנים סולאריים בנגב.¹⁴ הוועדה דירגה שטחים שונים בהתאם לקריטריונים הרלוונטיים (גודל שטח, שימוש קרקע וייעודו, היבטים סביבתיים וכו') ובחרה באזור אשלים כאזור המיטבי מבין כל האזורים שנבחנו. בפברואר 2004 אימצה המועצה הארצית לתכנון את המלצת הוועדה, אך רק בשנת 2013, אושרה תמ"א 10/ב/1 (תוכנית מתאר ארצית) להקמת מתקנים סולאריים על קרקע באשלים בגודל של כ-10,000 דונם. דוגמה זו ממחישה את הקושי שבקידום העברת קרקעות למתקנים סולאריים. כיום ישנו תכנון להקמה של שדות נוספים, למשל ליד אזור התעשייה בדימונה בשטח העולה על 5,000 דונם, אך גם שם היו קשיים תכנוניים רבים לנוכח השימושים השונים על הקרקע: חווה חקלאית, שטחי אש ותוואי מסילת הרכבת הדרומית דימונה-ירוחם (גיאופרוספקט, 2016).¹⁵

תרשים 1 מציג את מפת הקרינה בנגב, ותרשים 2 ממחיש באופן גרפי את הקושי שבמציאת שטחים פנויים בנגב. מהתרשימים ניתן לראות כי על אף הקרינה הגבוהה בנגב, אין הרבה שטחים ללא ייעוד או שימוש כלשהו, בין אם מדובר בשמורות טבע, בשטחי אש, בתעשייה או בשימוש אחר. יש להדגיש כי על אף הדמיון בצבע על המפה, השטחים הירוקים הם שמורות ולא מגרשי תעשייה פנויים (אזורי התעשייה נמצאים בעיקר בנאות חובב, בדימונה ובמישור רותם). תרשים 3 מתאר את רגישות השטחים הפתוחים בנגב על פי אומדנים של המשרד להגנת הסביבה. מהתרשים ניתן לראות כי חלק גדול מהשטחים הפתוחים הם בעלי רגישות נופית בדרגה בינונית ומעלה. לנוכח מצוקת הקרקעות והעובדה כי מתקנים סולאריים מיועדים להישאר על הקרקע 23–25 שנים (לפי חוזי החכירה), יש קושי להקצות את הקרקע המוגבלת ממילא

¹² תחזית הייצור המשקי בשנת 2020 לפי נתוני רשות החשמל (2017) היא בין 70.9 ל-72 טרה-ואט שעות, כתלות בצמיחת התמ"ג הממוצעת.

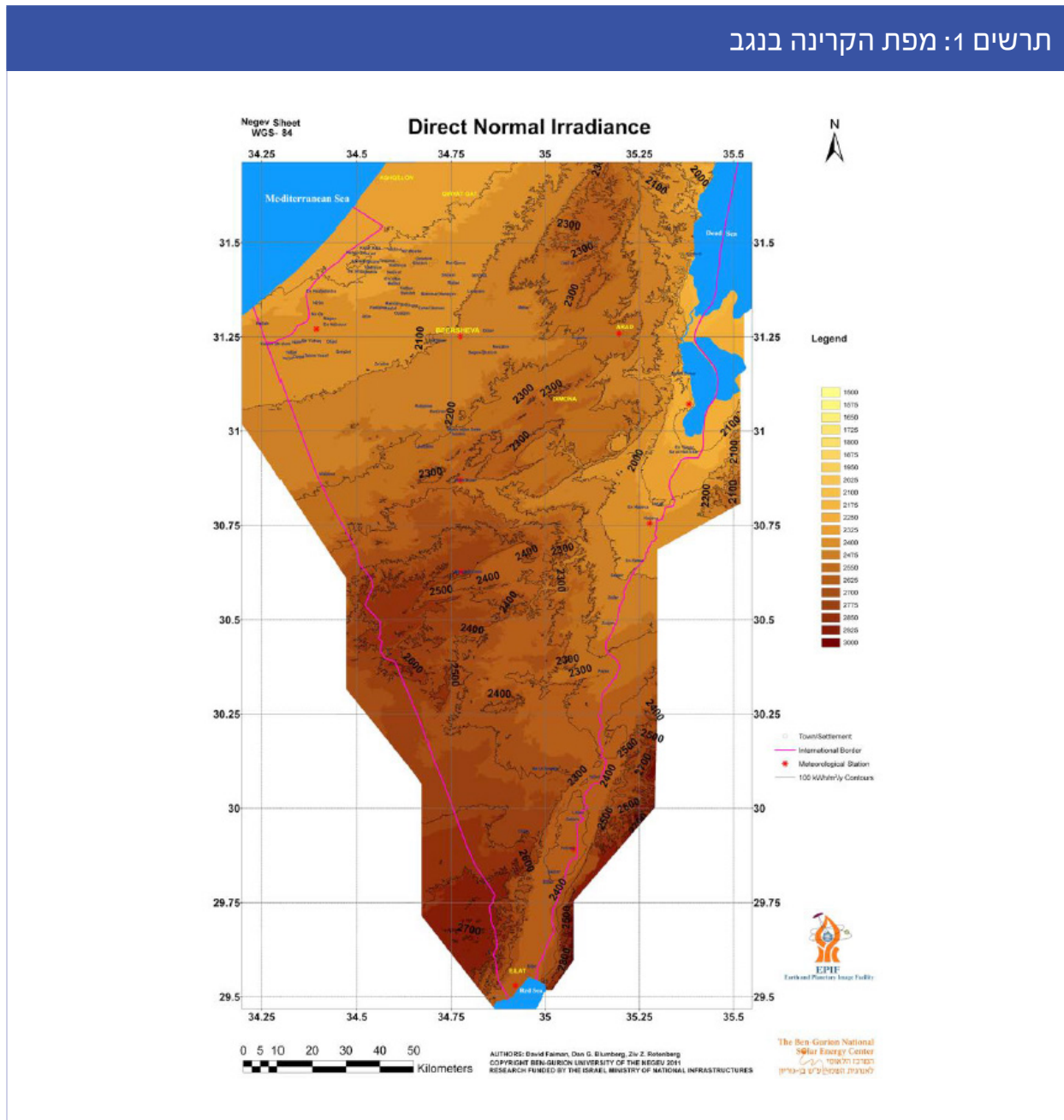
¹³ הנחות רשות החשמל, 2017.

¹⁴ הנגב נתפס כמקום אידיאלי להקמת מתקנים סולאריים בגלל כמות השטחים, הטופוגרפיה של הקרקע וקרינת השמש הגבוהה בחישוב שנתי.

¹⁵ הקמת השדה הסולארי על יד דימונה אושרה בוועדה לתשתיות לאומיות ב-17.7.17.

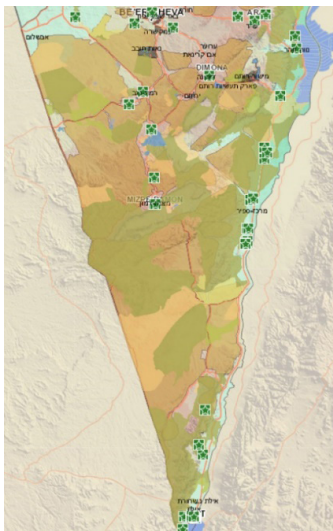
לתקופה כה ארוכה. כמו כן, היות שמתקנים סולאריים יכולים לעבוד כ-30 שנים ואף יותר, ומייצרים למעשה חשמל חינם (למעט עלויות אחזקה ותפעול) לאחר השקעת ההון הראשוני, הסבירות לפינויים בתום תקופת החכירה אינה גבוהה.

תרשים 1: מפת הקרינה בנגב



מקור: Faiman, Blumberg, and Rotenberg, 2011.

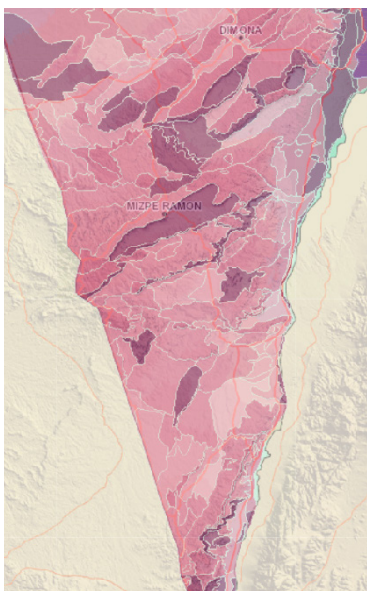
תרשים 2: שימושי הקרקעות בנגב



- עמדות לשמורות וגנים בתכניות מפורטות**
- שמורות טבע מוצעות
 - גנים לאומיים מוצעים
- שמורות וגנים בתכניות מפורטות**
- שמורות טבע מוכרזות
 - שמורות טבע מאושרות
 - שמורות טבע מופקדות
 - גנים לאומיים מוכרזים
 - גנים לאומיים מאושרים
 - גנים לאומיים מופקדים
- מגרשי תעשייה באזורי פיתוח**
- לא לשינוק
 - פנוי
 - תפוס
 - שטחי אימונים
 - אתרי תיירות בתכנון

מקור: אתר המפות הממשלתי, 2017.

תרשים 3: רגישות השטחים הפתוחים בנגב

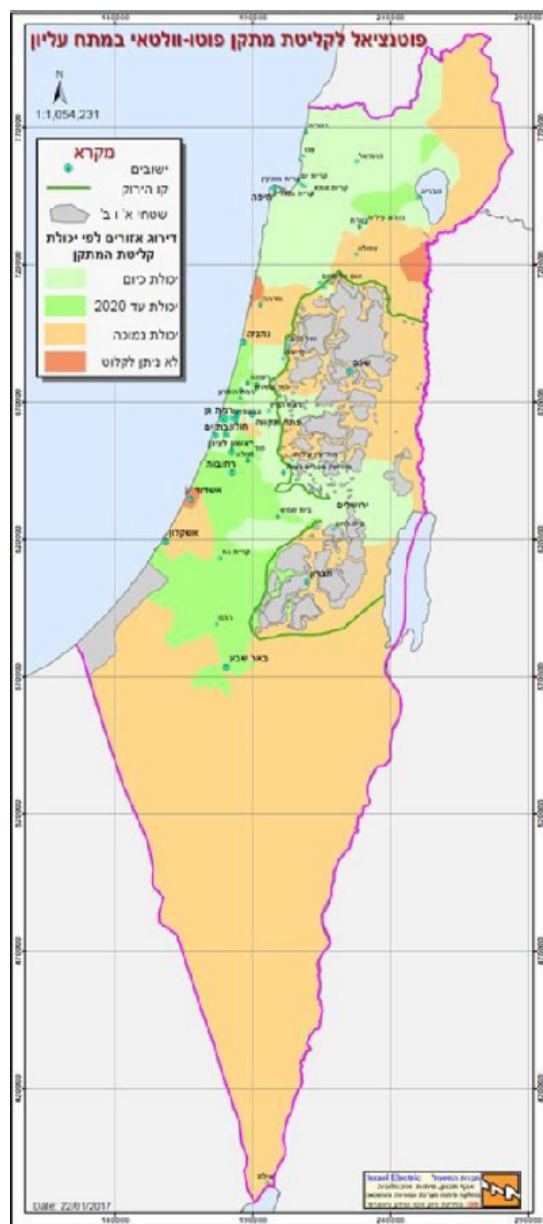


- רגישות שטחים פתוחים**
- נמוכה
 - נמוכה בינונית
 - בינונית
 - גבוהה
 - גבוהה ביותר
 - גבוהה קיצונית

מקור: אתר המפות הממשלתי, 2017.

פרט לסוגיית הקרקעות בנגב, ישנה בעיה נוספת הנוגעת לרשת החשמל. מכיוון שבנגב אין שימוש לכמות כה גדולה של חשמל, יהיה צורך בהשקעה משמעותית בקווי ההולכה כדי שתתאפשר העברת החשמל מהשדות הסולאריים בנגב לאזורי הצריכה במרכז הארץ ומסביבה. תרשים 4 מתאר את יכולת הקליטה של מתקן בגודל 60 מגה-ואט ברשת ההולכה על פני מפת הארץ.

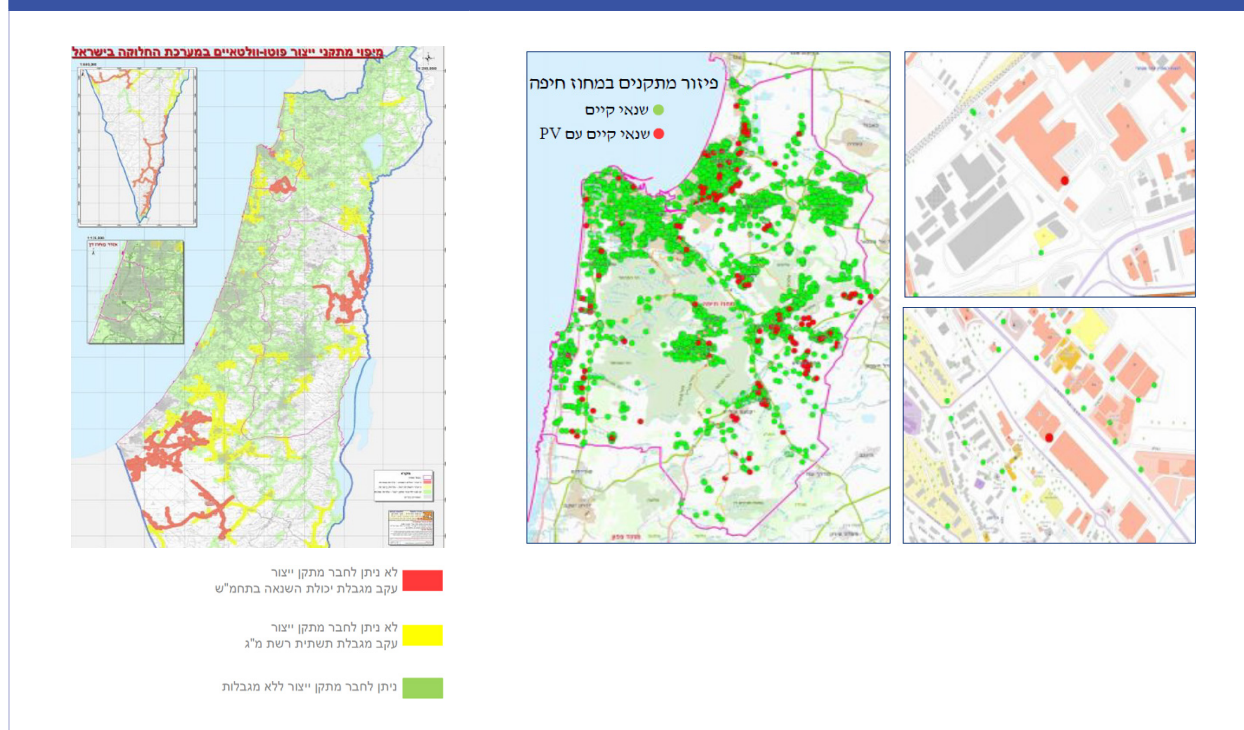
תרשים 4: פוטנציאל קליטת מתקן סולארי בגודל 60 מגה-ואט ברשת ההולכה



מקור: חברת החשמל לישראל, 2017.

מהתרשים עולה כי קיימת מגבלה משמעותית בנגב לקליטה של שדות חדשים. תרשים 5 מתאר את יכולת הקליטה של מתקנים סולאריים במתח גבוה על פני כלל ישראל, ובמתח נמוך באזור בחיפה. מהתרשים נראה כי קיימת יכולת משמעותית לקליטה של מתקנים במרבית הערים ומסביב להן. מכיוון שבאזורי הערים השטחים מוגבלים מחד גיסא, ויקרים מאוד מאידך גיסא, האפשרות להקמת מתקנים סולאריים באזורים אלה בעיקר על גגות.¹⁶ מחקרים רבים העריכו את פוטנציאל הגגות בישראל על שטח בנוי, וההערכות נעות בין כמה אלפי מגה-ואט לבין יותר מעשרת אלפים (ורדימון, 2010; לברון ואחרים, 2016; 2016; Shofrony, 2016). לנוכח הבנייה הנרחבת הצפויה להתרחש בשנים הקרובות, סביר שפוטנציאל הגגות יגדל עוד יותר. על אף הפוטנציאל המתואר, הסדרת מונה-נטו והסרת החסמים שהתרחשה בתקופה האחרונה, לא מספיק משקי בית ויזמים בוחרים להקים מתקנים סולאריים על גגות.

תרשים 5: פוטנציאל קליטת מתקן סולארי ברשת החלוקה (מתח נמוך מימין, גבוה משמאל)



מקור: חברת החשמל לישראל, 2017.

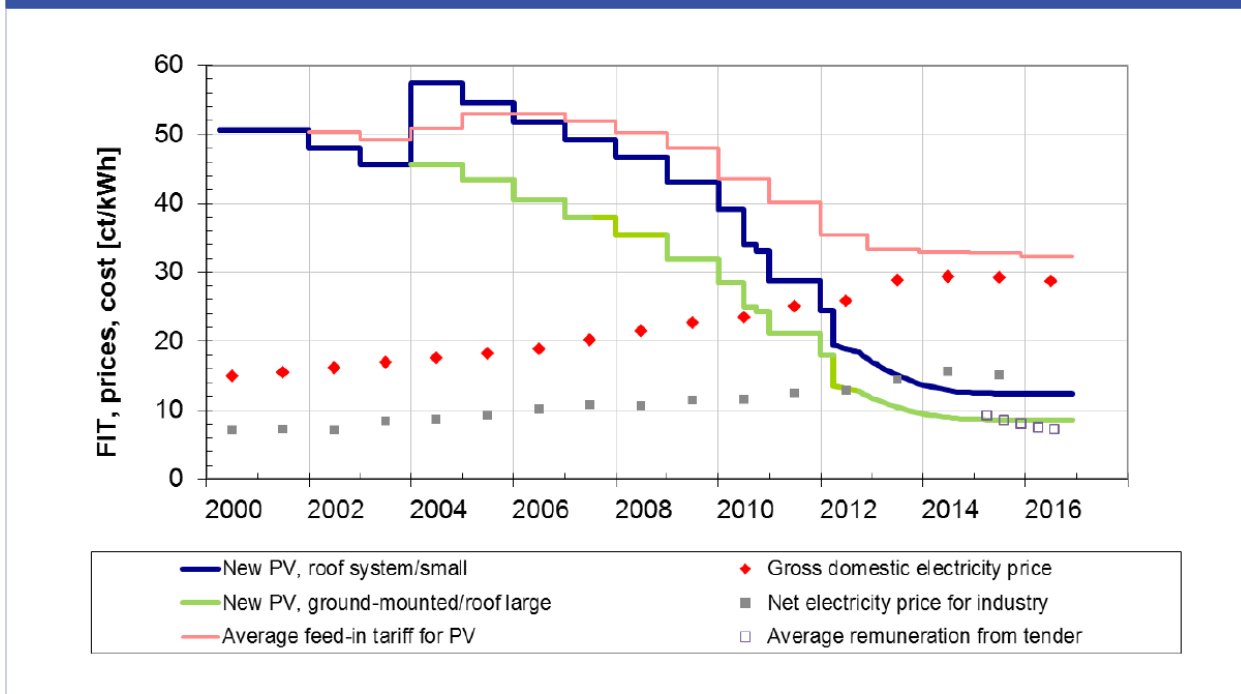
לנוכח כל מה שתואר עד כה, עלה הצורך לבחון ולכמת את התועלת הנוספת שיש במתקני גגות (סמוך למוקדי הצריכה) ביחס לחלופה – מתקני קרקע גדולים הנמצאים הרחק ממוקדי הצריכה (בעיקר שדות סולאריים בנגב).¹⁷ סוגי התועלת

¹⁶ ייתכן שברמת חדירה גבוהה של מתקני גגות תידרש השקעה לעיבוי רשת החלוקה, אך ברור כי נוכח בעיית השטחים אין ברירה אלא להקים מתקנים על גגות. כמו כן, ההשקעה בתשתית החלוקה בערים תחליף את ההשקעה בקווי ההולכה בדרום, שכן אין צורך לשנע חשמל מדרום הארץ כשבפועל ניתן לייצרו על גגות בערים ולצרוך אותן בקרבת מקום.

¹⁷ ההתייחסות במחקר זה היא בעיקרה למתקני גגות הנמצאים בסביבה עירונית, אך חלק מן התועלת, בייחוד התועלת מאי-שימוש בקרקע, מתקיימת גם בהקמת מתקני גגות מחוץ למוקדי הצריכה, למשל במבנים חקלאיים מרוחקים. כמו כן, החיסכון בקרקע מתקיים גם בהקמה של מתקנים על מאגרי מים, שטחי חנייה ועוד.

המחושבים במחקר זה אינם התרומה הכוללת מאנרגיות מתחדשות למשק, אלא מדובר רק בתרומה הנוספת למשק בעת מעבר ממתקני שדות למתקני גגות. מכיוון שהתועלת מחושבת במונחי קוט"ש, היא רלוונטית למנעד רחב של גגות. את החשיבות בכימות התועלת ובמתן פרמיה מתאימה למתקני גגות (בהינתן תועלת חיובית) ניתן לייחס לשתי סיבות נוספות, פרט לאלה שתוארו קודם לכן: 1. הקמת מתקני הגגות (בעיקר הקטנים) יקרה ביחס למתקנים גדולים, וללא תמריצים מתאימים יהיה קשה להקים מתקנים כאלה. 2. שוק הגגות הקטנים עדיין לא מפותח מספיק, ולכן צריך לסייע לשוק כדי שבעתיד הוא יהיה תחרותי יותר. תרשים 6 ממחיש באופן גרפי את האמור לעיל. מהתרשים ניתן לראות כי בשנת 2004 התמיכה בגרמניה למתקני גגות קטנים באמצעות תעריפי הזנה גבוהה בממוצע ב-10 אירו-סנט ביחס למתקנים גדולים (מתקני קרקע וגגות גדולים), אך לאחר ששוק הגגות הקטנים התפתח, ההפרש בתעריף ההזנה בהשוואת מתקנים קטנים וגדולים ירד לפחות מ-4 אירו-סנט. מהתרשים נראה כי התמיכה בגרמניה במתקנים סולאריים בכלל, ובמתקני גגות בפרט, גבוהה ביחס לתמיכה הנהוגה כיום בישראל. עם זאת, חשוב לציין כי התמיכה הנדיבה בגרמניה אינה נובעת רק מהתועלת ממתקנים סולאריים – לא פחות מכך, מדובר ברצון ובמדיניות של גרמניה לעבור למשק חשמל נקי, המבוסס בעיקר על אנרגיה מתחדשת.

תרשים 6: תעריפי הזנה למתקנים סולאריים (פוטו-וולטאיים) בגרמניה לפי שנים 2000–2016



מקור: Wirth, 2017.

המחקר בנוי באופן הבא: בפרק 2 אנו נסקור את הספרות הקיימת וגוזרים מכך את סוגי התועלת הרלוונטיים בהשוואה בין גגות לשדות. בפרק 3 אנו נתאר את כלל סוגי התועלת בהרחבה ומכמתים אותם לערכים כספיים במונחי קוט"ש. בפרק 4 אנו נסכם את הממצאים ונציג את ההמלצות.

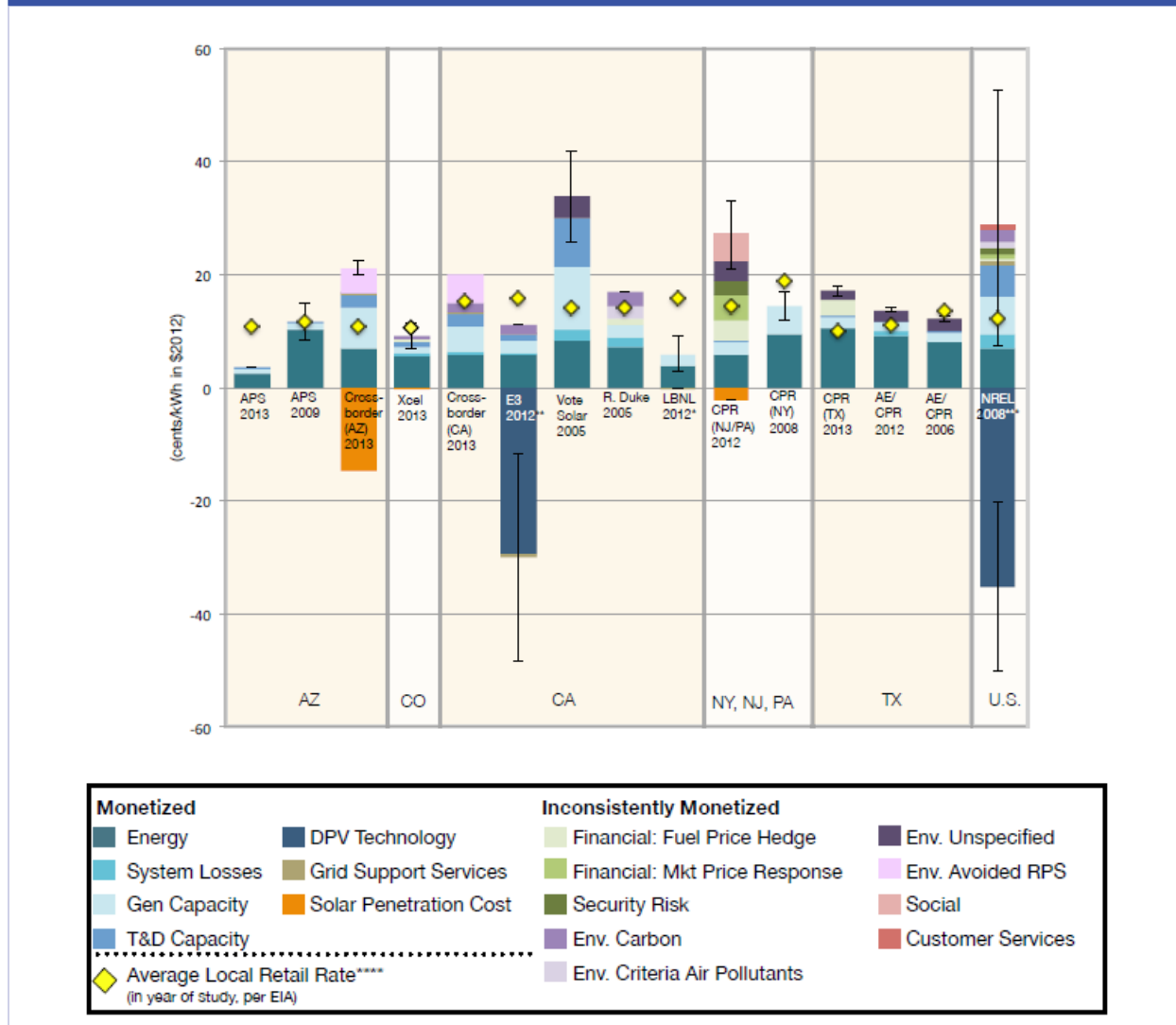
2. סקירת ספרות

הספרות הקיימת מלאה במחקרים שבחנו את התועלת בייצור חשמל באמצעות אנרגיית שמש בהשוואה למתקנים קונבנציונליים (Value of Solar), אך פרט למספר מחקרים (זליכה, 2012; וייל ואחרים, 2016; Shofrony, 2016) כמעט לא נעשו השוואות קונקרטיות בין תועלת ממתקני גגות לתועלת משדות סולאריים. מסיבה זו נתייחס לספרות הקיימת בבחינת התועלת בין מתקנים סולאריים למתקנים קונבנציונליים, ונבחן אילו סוגי תועלת יכולים להיות רלוונטיים בהשוואת מתקני גגות ושדות.

המחקר המוכר ביותר בישראל בבחינת התועלת מאנרגיה מתחדשת היה הוועדה לבחינת המחיר הכלכלי של אנרגיה מתחדשת, "ועדת קנדל", (המועצה הלאומית לכלכלה, 2013). במחקר זה כימתו את התועלת העיקרית למשק מחדירה של אנרגיה מתחדשת (בעיקר טכנולוגיה פוטו-וולטאית). סוגי התועלת שכומתו כללו: תועלת ישירה למשק החשמל על ידי צמצום צריכת דלקים ושימוש בהון לבניית מתקני ייצור קונבנציונליים, צמצום נזקים סביבתיים, השפעות על הביטחון האנרגטי בישראל, והשפעות על פיתוח אזורי וכלכלי. באופן דומה, נעשו מחקרים רבים בעולם, ובמיוחד בארה"ב, שבחנו את התועלת מאנרגיית שמש ומייצור מבוזר (Clean Power Research 2006, 2012, 2013, 2014, 2015). פרט למחקרים שעסקו בכימות התועלת, ניתן למצוא גם מחקרים חשובים שעסקו בהבניית המתודולוגיות לאמידת סוגי התועלת (IREC, 2013; NREL, 2014).

מכיוון שכימות התועלת מאנרגיית שמש הוא עבודה מורכבת, ומחקרים שונים אינם משתמשים בהכרח באותה המתודולוגיה, סקר מכון המחקר האמריקאי Rocky Mountain Institute (RMI) כמות גדולה של מחקרים מהשנים 2005–2013, והשווה ביניהם. תרשים 7 מציג את הערך של סוגי התועלת (ובחלק מהמקרים גם עלויות) של ייצור חשמל ממתקנים סולאריים בייחס למתקנים קונבנציונליים במחקרים השונים. מהתרשים ניתן לראות את השונות בקטגוריות שהמחקרים בחרו להתייחס אליהן, ואת הקושי בכימות חלק מהתועלת (Inconsistently Monetized). כמו כן, נראה כי ישנה שונות רבה אפילו בין מחקרים הבוחרים להתייחס לסוגיות דומות ואף במדינות זהות. שונות זו נובעת בחלקה משימוש במתודולוגיות ובהנחות שונות, ובחלקה משונות במערכת החשמל באזורים הנבדקים.

תרשים 7: תועלת ועלות (במקרים אחדים) של מתקנים סולאריים מול מתקנים קונבנציונליים במחקרים מהעולם



מקור: RMI, 2013.

בהסתכלות על כלל המחקרים שנסקרו, RMI הגדירו את הקטגוריות הבאות כרלוונטיות בבחינת הערך של ייצור חשמל סולארי בהשוואה לייצור קונבנציונלי:

1. אנרגיה

- עלות דלקים נמנעת
- איבוד אנרגיה

2. הון

- עלויות הון נמנעות בייצור
- עלויות הון נמנעות ברשת ההולכה והחלוקה

3. שירותי מערכת

- שירותי איזון המערכת (ייצוב תדר ומתח)
- שירותי גיבוי
- ניהול המערכת

4. מימון ומחירים

- גידור מחירי הדלק (ביטוח)
- השפעה על מחירי החשמל בשווקים

5. ביטחון

- אמינות אספקה

6. סביבה

- פליטות פחמן דו-חמצני (CO_2)
- פליטות מזהמי אוויר (SO_2 , NOX, PM)
- מים
- קרקע

7. ערך חברתי

- פיתוח כלכלי (תעסוקה והכנסות ממיסים)

מכיוון שברצוננו לבצע השוואה בין מתקני גגות במוקדי צריכת החשמל לבין מתקני קרקע מחוץ לאזור הצריכה, נתייחס רק לסוגי תועלת שניתן להצביע עליהם באופן חד-משמעי בהשוואה המתוארת לעיל. במסגרת זו לא נתייחס לתועלת כגון הפחתת פליטות ומזהמים אחרים, שכן גם במתקנים סולאריים על קרקע וגם במתקני גגות מדובר באותה התועלת (לפי הספק מותקן). סוגי התועלת שנבחרו לבחינה על ידינו לאחר סקירת הקטגוריות לעיל ולאחר בחינה של חומרים נוספים שיפורטו במסגרת הפרקים הבאים במחקר, הם:

- חיסכון בתשתיות

- הפחתת איבוד החשמל
- חיסכון בקרקע
- תרומה לאמינות אספקה וביטחון אנרגטי
- תרומה לתעסוקה
- תרומה להתייעלות אנרגטית (הצללה)

3. חישוב התועלת

3.1. תשתיות ההולכה והחלוקה

בסעיף זה נרצה לבחון את התועלת הנובעת מחיסכון בעלויות התשתיות במעבר מייצור חשמל בשדות סולאריים לייצור על גגות. החיסכון מתבטא בשני אופנים:

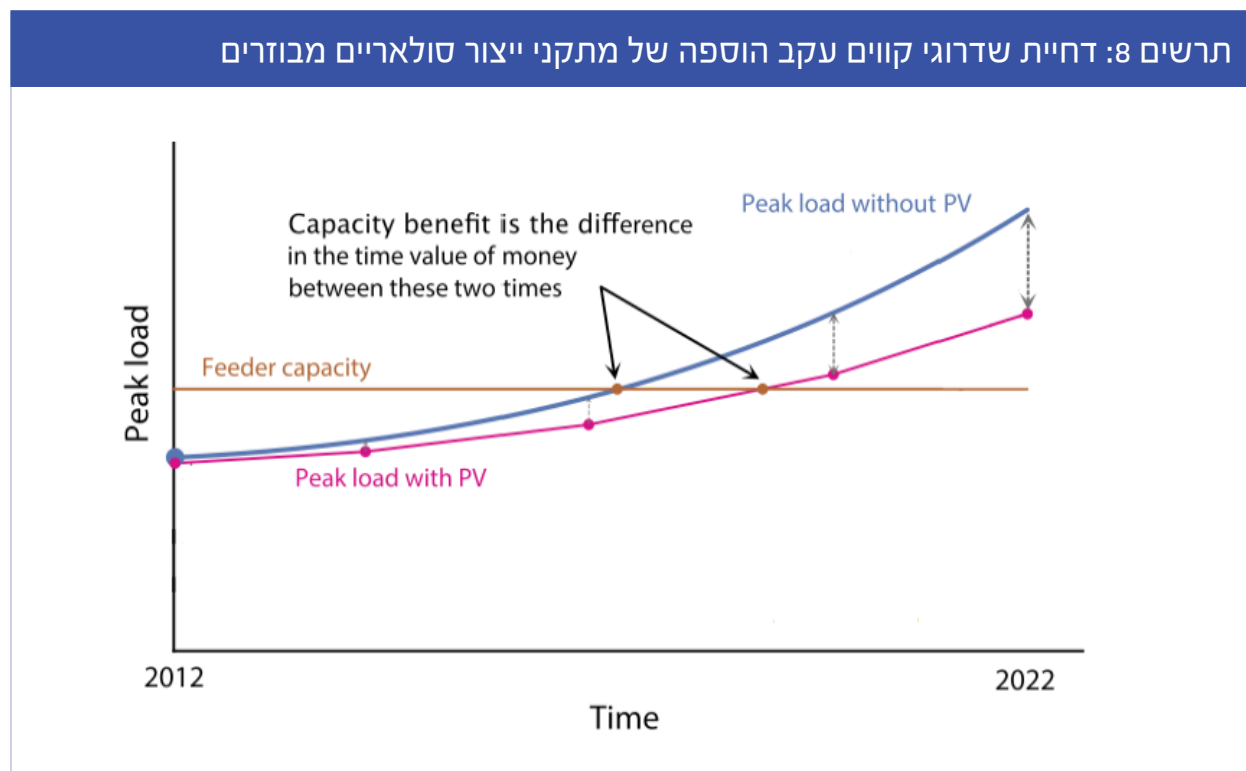
- חיסכון בעלויות הקמת תשתית ייעודית לחיבור מתקני שדות לרשת
- חיסכון בדחיית שדרוגים למערכת ההולכה

כאשר מקימים שדות סולאריים בשטחים המרוחקים מרשת החשמל, יש צורך לסלול קווי חשמל ייעודיים כדי לחבר את השדות לרשת. מעבר לכך, כאשר אנו מוסיפים עוד "תחנת ייצור" נוצרות עלויות השנאה, כגון שדרוג תחנות משנה של חברת החשמל ישראל (חח"י), מיתוג והוספת שנאים. כל אלה עולים כסף רב, ומי שנושא בעלויות הללו זו חח"י, ולמעשה ציבור צרכני החשמל בישראל. שלא כמו מתקני שדות, במתקני גגות על פני מבנים בערים אין צורך לסלול קווי חשמל ייעודיים לשם חיבור המתקנים. אם כך, ההימנעות מהקמת תשתית ייעודית עבור חיבור מתקני שדות היא למעשה החיסכון (תועלת) ממתקני הגגות. לצורך חישוב חיסכון זה הסתמכנו על נתוני חברת החשמל משנת 2017 על אודות עלויות הקמת תשתית לחיבור מתקנים במתח גבוה ועליון. חישובנו את ממוצע העלויות בהנחה כי מרבית מתקני השדות מתחברים למתח גבוה ועליון. עבור חיבור מתקנים ברשת החלוקה העלות היא 175 מיליון ש"ח ל-700 מגה-ואט, ועבור חיבור מתקנים ברשות ההולכה העלות היא 125 מיליון ש"ח ל-300 מגה-ואט מותקן.¹⁸ בהנחת 23 שנות פעילות, ו-1,750 שעות פעילות בשנה לקו"ט מותקן בשדה סולארי, עלות הקמת התשתית הייעודית לחיבור שחישובנו מסתכמת בכ-1.1 אג' לקוט"ש.¹⁹ פרט לחיסכון על התשתית הייעודית, ייתכן גם חיסכון בשדרוג יכולת העברת החשמל בקווי ההולכה. עם הזמן חברת החשמל נדרשת לשדרג את הקווים עקב התיישנותם או מכיוון שצריכת החשמל עולה, ועל כן צריך להעביר בהם יותר חשמל. כאשר אנו מייצרים חשמל במוקדי הצריכה, אנו מורידים מהעומס על קווי ההולכה. תרשים 8 ממחיש את החיסכון

¹⁸ עלויות אלה כוללות רק את עלויות החיבור הישירות, ואינן כוללת עלויות פיתוח כגון חידוש רשתות ייעודיות ואוטומציה.

¹⁹ הנחת העבודה היא כי עלות החיבור של מתקני הגגות לרשת קטנה באופן ניכר בהשוואה לחיבור מתקני שדות הדורשים, בין היתר, הקמת קווים ייעודיים. אם עלות חיבור מתקני הגגות תיעשה משמעותית, ובהנחה שמדובר במתקנים שאינם נמצאים בקרבת תשתית קיימת, הרי שיהיה צורך לקזז עלות זו מהחיסכון שחושב.

הפוטנציאלי באופן גרפי. מצד שני, ברמות חדירה גבוהות של אנרגיית שמש ייתכן שצריך לעבות את רשת החלוקה, שכן בשעות שיש ייצור בגגות אך אין צריכה, יהיה צורך להעביר את החשמל הנוצר הלאה. לנוכח ההשפעות הסותרות בדבר האפשרות לדחות שדרוגים ברשת ההולכה, ומצד שני הצורך בשדרוגים נוספים ברשת החלוקה, החיסכון על התשתיות שחושב במסגרת מחקר זה הוא רק על הקווים הייעודיים שנועדו לחיבור מתקני שדות סולאריים לרשת.²⁰



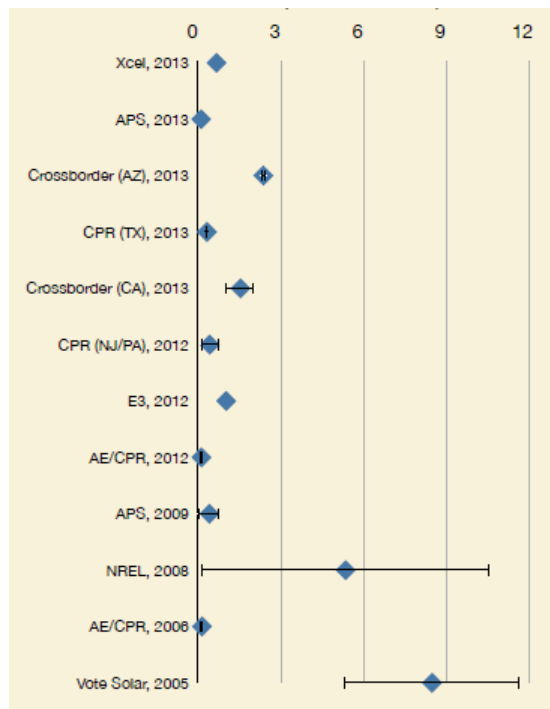
מקור: Cohen, Kauzmann, and Callaway, 2016.

תרשים 9 מציג תוצאות ממחקרים שונים בעולם בדבר החיסכון האפשרי מדחיית שדרוג תשתיות ההולכה והחלוקה בהקמה של מתקנים סולאריים מבוזרים. ככלל, ניתן לראות כי המספרים אינם גבוהים בגלל הצורך בתשתיות בשעות שבהן המתקנים הסולאריים לא מייצרים חשמל. כמו כן, נראה כי התוצאות משתנות בין מחקר למחקר, שכן מאפייני רשת החשמל שונים ממקום למקום ואף מורכבות הבדיקות משתנה.²¹

²⁰ ישנה סברה שניתן לקחת את תעריף ההולכה והחלוקה מספר התעריפים ולייחס אותו לחיסכון במתקני גגות בשעות שהם מייצרים חשמל ואינם מסתמכים על הרשת. מחשבה זו אינה מדויקת, שכן התעריף מגלם בתוכו את עלות התשתיות לפי העברת החשמל הצפויה על פני שנים. אם נעביר פחות חשמל, יהיה צריך לשלם יותר עבור כל קוט"ש שאנו מעבירים (כדי לכסות את העלויות הקבועות). בשל כך, יש להסתכל על שדרוג הקווים ורק בהתאם לזאת לבחון אם מתקני גגות מביאים לחיסכון בדחיית שדרוגים. עם זאת, ברגע שתהיה אגירה, ומתקני הגגות יוכלו להתנתק כמעט לחלוטין מהרשת, אזי סביר שיתקיים חיסכון משמעותי על שדרוגי התשתית.

²¹ במחקרים המופיעים בתרשים 9 ובתרשים 10 מבצעים השוואה בין מתקנים סולאריים במוקדי הצריכה לבין מתקנים קונבנציונליים, אך מהות השוואה דומה לזו שאנו עושים, היינו, בין צריכה במוקדי הייצור לבין העברת החשמל ממרחק.

תרשים 9: העלויות הנמנעות בדחיית שדרוג הרשת (סנט אמריקאי לקוט"ש)



מקור: RMI, 2013.

3.2 איבוד חשמל ברשת

בעת העברת החשמל על פני קווי ההולכה והחלוקה, מתחנות הייצור לצרכנים, יש איבוד של אחוז מסוים מן החשמל עקב ההתנגדות החשמלית. כאשר מייצרים חשמל וצורכים אותו במקום, מונעים למעשה את איבוד החשמל הנוצר בהעברה למרחקים ארוכים (למשל משדות סולאריים בדרום הארץ למוקדי הצריכה).²² בסעיף זה נכמת את החיסכון הנובע מהקטנת איבוד החשמל ברשת על ידי שימוש במתקנים סולאריים באזור הצריכה.

שיטות לחישוב איבוד החשמל ברשת החשמל (RMI, 2013; NREL, 2014):

1. בשיטה הפשוטה ביותר משתמשים בממוצע הכולל של איבוד אנרגיה ברשת ההולכה והחלוקה. לדוגמה, לפי נתונים של חברת החשמל עבור ממוצע חמש השנים האחרונות עד שנת 2013, עמד איבוד החשמל ברשת החלוקה על 2.6%–2.7%, ואילו איבוד החשמל ברשת ההולכה עמד על 1.3%–1.2% (חברת החשמל לישראל, 2013).
2. בשיטה השנייה בוחנים את האחוז השולי של איבוד החשמל בהתאם לזמן הצריכה ביום, ונוסף על כך מפרידים בין רשת החלוקה ורשת ההולכה. בשעות שיש עומס, עולה אחוז איבוד החשמל בשל הזרם הגבוה. מכיוון ששעות

²² בשוליים ניתן גם לחסוך בהספק המותקן, מכיוון שאם מאבדים פחות חשמל אזי ניתן מלכתחילה לייצר פחות חשמל במוקדי הצריכה.

ייצור החשמל מאנרגיית שמש מתמזגות עם שעות העומס בביקוש לחשמל (לפחות בקיץ), היתרון בייצור במוקדי הצריכה נעשה משמעותי יותר.²³

3. השיטה השלישית דומה לשיטה השנייה, אלא שכעת נכנסים לרזולוציה מקומית יותר, ומבצעים חישוב של איבוד החשמל השולי לפי אזורים ולפי תחנות (בהתאם למרחקים השונים של קווי ההולכה או חלוקה מהצרכנים).

4. השיטה האחרונה היא המורכבת ביותר, ומשלבת הדמיות של מודלים מסוג "Power Flow" הבוחנים את כמות החשמל הזורם בכל קו בהתבסס על הייצור והביקוש, ובהתאם לכך את איבוד החשמל. שיטה זו מאפשרת לחשב את איבוד החשמל העתידי לאחר הוספה של תשתיות הולכה וחלוקה עבור מערכות בשדות לעומת מערכות על גגות.

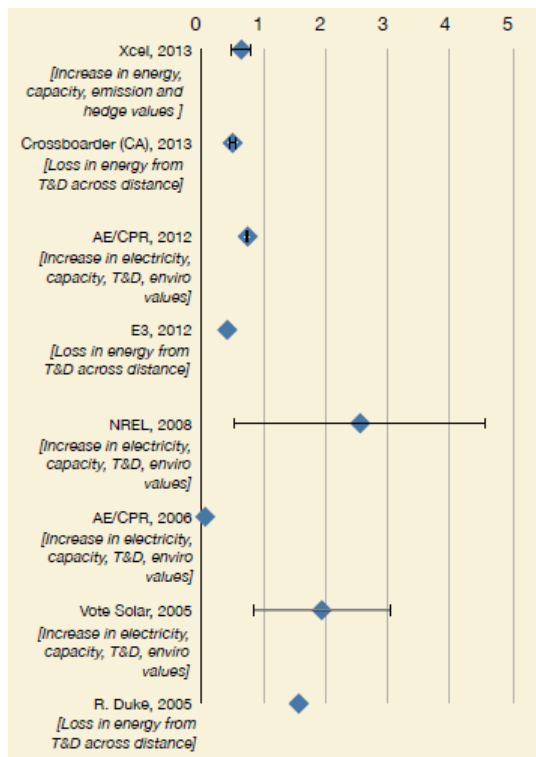
במחקר זה בחרנו להסתמך על השיטה השנייה המוצגת לעיל. שיטה זו פשוטה יחסית ולא מצריכה כלים מיוחדים, אך עם זאת היא מדויקת מספיק לצורך הערכת התועלת. על כן, לקחנו את לוח מקדמי איבוד החשמל מספר התעריפים של רשות החשמל, הכולל את איבוד החשמל במקטע ההולכה, החלוקה, והאספקה, לפי מקבץ שעות הביקוש (מש"ב) ולפי העונות הרלוונטיות (חורף, מעבר, קיץ), וחישבנו את מקדם איבוד החשמל הממוצע על פני כל עונה ומש"ב. לאחר מכן התאמנו את מקדם איבוד החשמל הממוצע עבור כל מש"ב ועונה לפי מבנה ייצור נורמטיבי למתקן סולארי. החישוב הכולל מביא לתוצאה של 6.2% איבוד ממוצע על פני כלל רשת החשמל, תוצאה הקרובה לממצאים בדו"ח קנדל (המועצה הלאומית לכלכלה, 2013). אם ניקח את תעריף ייצור החשמל האחרון למתקנים סולאריים שנקבע על 19.9 אג' לקוט"ש נקבל כי שווי האיבוד הממוצע עומד על 1.2 אג' לקוט"ש. כלומר, אם נייצר חשמל במקום הצריכה, ונצרוך את רובו בקרבת מקום, נחסוך כ-1.2 אג' לקוט"ש על איבוד החשמל הפוטנציאלי.²⁴

תרשים 10 מציג את התועלת מחיסכון באיבוד חשמל ברשת החשמל ממחקרים שונים. מהתרשים ניתן לראות כי ישנה שונות בחלק מהמחקרים, אך יש להביא בחשבון כי המחקרים נעשו לעיתים בתקופות שונות, באזורים שונים, ותוך שימוש במתודולוגיה שונה (חלק מהמחקרים כללו גם את ההשפעות הנלוות לאור האפשרות לייצר פחות חשמל עקב הקטנת איבוד החשמל). הערך הממוצע של הפחתת איבוד החשמל הוא כ-70 סנט אמריקאי (אם נתעלם מהתצפיות הקיצוניות), כלומר כפול מהערך שחישבנו בישראל.

²³ מכיוון שבקווי ההולכה מעבירים חשמל על פני מרחקים גדולים, נעשה שימוש במתח גבוה ובזרם נמוך כדי לצמצם את איבוד החשמל. עם זאת, ככל שהמתח עולה, כך עולה גם דרגת הסיכון בהעברת החשמל, ולכן ברשת החלוקה (שקרובה יותר לצרכנים הסופיים) נעשה שימוש במתח נמוך יותר ובזרם גבוה.

²⁴ התעריף שחישבנו לפיו את החיסכון לקוח ממכרזים למתקנים המחוברים לרשת המתח הגבוה והנמוך, בהנחה שהם מתקנים קרקעיים. במתקנים כאלה, בממוצע, אין צורך להעביר את החשמל על פני קווי ההולכה, ובחישוב שטחי נראה כי החיסכון באיבוד החשמל יהיה קטן בשליש. עם זאת, בחרנו לכלול את הערך המלא של החיסכון, כחלק מההשוואה למתקנים קרקעיים בדרום הארץ המחוברים למתח עליון. מסיבה זו הערך שחושב הוא סף עליון בבחינת איבוד החשמל.

תרשים 10: התועלת מהקטנת איבוד החשמל ברשת ההולכה והחלוקה (סנט אמריקאי לקוט"ש)



מקור: RMI, 2013.

3.3. קרקע

3.3.1. ערך שטחים פתוחים

כיוון ששדות סולאריים תופסים שטח רב, נשאלת השאלה אם אנו מפנימים את הערך המלא של השטחים בעת שאנו בונים עליהם שדות סולאריים. אומנם שדות הקמים כיום, כמו השדה המתוכנן באזור דימונה, מיועדים לקום בעיקר על שטחים מופרים, אומנם יש לזכור כי השטחים הללו לא בהכרח היו מופרים בעבר הרחוק. כמו כן, יש לתת את הדעת על כך שגם השטחים המופרים מוגבלים בהיקפם, וגם עליהם ישנה תחרות מצד תשתיות אחרות, כמו בנייה ועוד. מה יקרה כאשר בעוד עשרות שנים מהיום, נוכח ההתרחבות וההתפתחות של המדינה, נצטרך את השטחים הללו? האם נפנה את המתקנים הסולאריים כשהם למעשה מייצרים עבורנו חשמל בחינם (בניכוי עלויות תחזוקה ותפעול), או שנעבור להשתמש בשטחים אחרים, בעלי רגישות סביבתית גבוהה יותר? אין אנו טוענים כי שטחים פתוחים הם ערך קדוש שאין לפגוע בו, אך מאחר שכמות השטחים במדינה מצומצמת, יש לחשוב בכובד ראש בטרם אנו מקצים שטחים כלשהם לתקופות של עשרות שנים, ובייחוד כשיש חלופות שחוסכות את השימוש בקרקע, כמו שימוש בגגות. בפרק זה נתייחס לחשיבות של שטחים פתוחים

וננסה לכמת, עד כמה שניתן, את הערך שהם מספקים לנו. עם זאת, מעצם נדירותם של השטחים הפתוחים במדינה קטנה כמו ישראל, ייתכן כי כל ערך שניתן להם לא ישקף את ערכם המלא.

בעיסוק בשטחים פתוחים יש לבצע הבחנה בין מחיר לבין ערך. מחיר משקף את שווי השוק של המוצר, בעוד שערך מייצג את השווי הסובייקטיבי שלו. שטח פתוח הוא מוצר ציבורי מעיקרו, ועל כן אין הוא נסחר בשוק וגם אין לו מחיר שוק. עם זאת, העובדה כי לשטח פתוח אין מחיר שוק אינה באה לומר כי לשטח אין ערך כלל. לשטחים הפתוחים יש ערך מעצם העובדה שהם מספקים שירותים שונים לבני האדם, בין אם מדובר בשירותים בפועל (ערכי שימוש) או באפשרות להשתמש באותם השירותים בעתיד (ערכי אי-שימוש).²⁵ חלק מן השירותים הללו הם מוצרים שניתן לאמוד את ערך השוק שלהם, כגון חומרי גלם, וחלק אחר הם שירותים שאין להם ערך שוק, כמו נוף. השירותים הללו נכנסים תחת ההגדרה של שירותי המערכת האקולוגית. על פי הגדרת תוכנית המארג (2017), מערכת אקולוגית היא אזור שיש בו מגוון של יצורים חיים (מגוון ביולוגי) המקיימים תהליכים אקולוגיים בינם לבין עצמם ועם סביבתם הפיזית והכימית.²⁶ המערכת האקולוגית מעניקה שירותים אקולוגיים שהאדם מפיק מהם תועלת לקיומו ולרווחתו.

את שירותי המערכת האקולוגית ניתן לחלק לשלוש קבוצות עיקריות (המארג, 2017):

1. **שירותי אספקה** – תהליכים אקולוגיים המספקים מוצרים שהאדם צורך, כמו מים, מזון וצמחי מרפא.
 2. **שירותי ויסות** – תהליכים אקולוגיים המווסתים תהליכים סביבתיים (למשל בקרת אקלים) או תהליכים אקולוגיים אחרים (פעילות מזיקי חקלאות) לתועלתו של האדם.
 3. **שירותי תרבות** – תרומתם של תהליכים ורכיבים במערכות האקולוגיות להעשרת חייהם של בני האדם, כדוגמת השראה רוחנית, מחקר ואפשרות לפעילות פנאי ונופש.
- מכיוון שלחלק מהשירותים הללו אין מחיר שוק, כלכלני סביבה פיתחו מגוון שיטות לשם אמידת הערך משטחים פתוחים. הנה העיקריות שבהן (פליישר, צור ובר אוריון, 1999; רוזנטל ואחרים, 2009; בקר, 2013; Lavee and Baniad, 2013):
1. **שיטת ההערכה המותנית (CVM - Conditional Value Method)** – בשיטה זו בודקים באמצעות שאלונים את הערך הכספי שפרטים מאוכלוסייה מייצגת היו מוכנים לשלם כדי לשמר שטח כפתוח. שיטה זו מבוססת למעשה על רצון תיאורטי של הפרטים לשלם (Willingness to Pay).
 2. **שיטת עלות ההגעה (TCM - Travel Cost Method)** – בשיטה זו בוחנים את מספר המבקרים בשטח הפתוח, את תדירות הביקורים ואת עלות הביקור (דלק ועוד). ההנחה בשיטה זו היא כי עלות הביקור איננה גבוהה מהמחיר שהפרטים היו מוכנים לשלם כדי לשמר את השטח כפתוח.

²⁵ ערכי שימוש הם ערכים שהאדם מקבל משימוש במשאב, והם כוללים: שימוש ישיר הכרוך בצריכת המשאב (צריכת מזון מהטבע), שימוש ישיר ללא צריכה (טיול בטבע), ושימוש עקיף (צפייה בטבע בטלוויזיה). לעומתם, ערכי אי-שימוש הם ערכים שמתקבלים משימוש עתידי או מהאפשרות לשימוש, והם כוללים: ערך האופציה להשתמש, הערך להוריש, וערך הקיום (רוזנטל ואחרים, 2009; בקר, 2013).

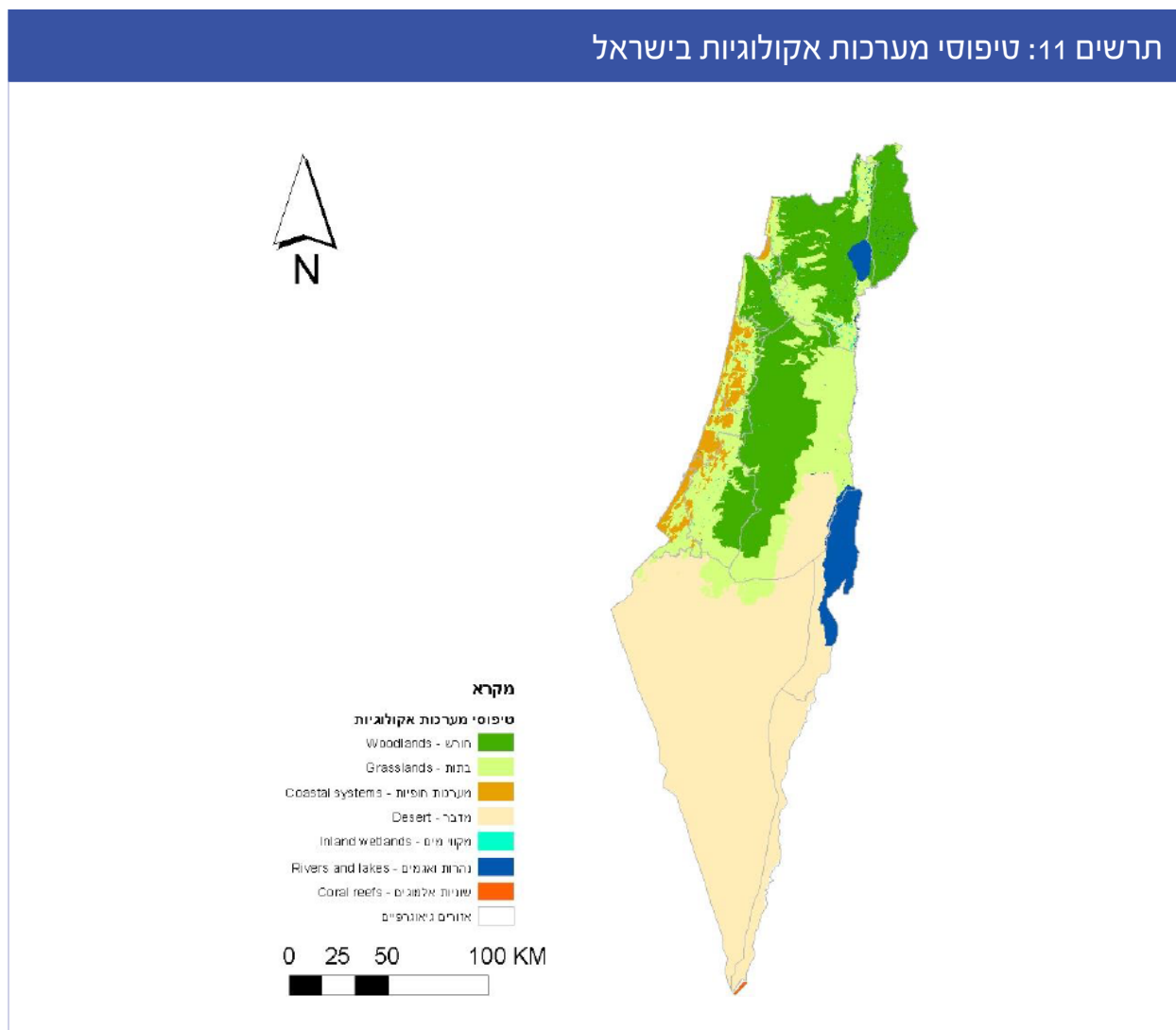
²⁶ המארג היא תוכנית לאומית להערכת מצב הטבע בישראל, הפועלת בחסות חסות מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט – המרכז הלאומי לחקר המגוון הביולוגי שבאוניברסיטת תל-אביב. במארג שותפים המשרד להגנת הסביבה, רשות הטבע והגנים והקרן הקיימת לישראל. אחת ממטרותיו של המארג היא לסכם ולנתח את הידע הקיים באשר לתרומת המערכות האקולוגיות לחיים ולרווחה של האוכלוסייה בישראל (אתר המארג, 2017).

3. **שיטת המחירים ההדוניים (Hedonic Pricing Model)** – באמצעות שיטה זו מנסים להעריך את ערך השטח הפתוח על ידי בחינת ההשפעה של השטחים הפתוחים על מחיר נכס הנסחר בשוק. לדוגמה, ניקח את מחירי הדירות בשכונה הנמצאת בקרבה לשטח פתוח, ונשווה אותם למחירי הדירות בשכונה שאינה נמצאת בקרבת השטח הפתוח. ההנחה בשיטה זו היא שבהינתן שכלל מאפייני דירות זהים, ההפרש בין מחירי הדירות בשתי השכונות נובע מהקרבה לשטח הפתוח.
4. **שיטות העלות הנמנעת או עלות השיקום (Avoided Cost / Mitigation and Restriction Cost)** – בשיטות אלה מעריכים את העלות הנמנעת או את העלות הממשית שבשיקום שטח פתוח המספק שירותים אקולוגיים. כלומר, בשיטה זו מעריכים את חישוב ההוצאה הציבורית הדרושה לבניית תשתית שתחליף את הפונקציה שממלאת המערכת הטבעית (למשל סכר).
5. **שיטת העברת תועלת (Benefit Transfer)** – בשיטה זו מנסים להעריך ערך של שטח פתוח על סמך מחקרים קודמים שעסקו בהערכה כלכלית של שירותי המערכת בשיטות ובמקומות שונים בעולם. למעשה, משתמשים במחקרים שביצעו הערכה פרטנית לערך השטחים הפתוחים באמצעות השיטות המפורטות לעיל, ולאחר ביצוע התאמות והערכת הדמיון בין השטחים השונים והשטח הנידון, מיישמים את תוצאותיהם עבור חקר המקרה המסוים.
- לכל אחת מהשיטות שתוארו כאמור יש חסרונות ויתרונות. למשל, כיצד אפשר להיות בטוחים כי בשיטת ה-CVM המחיר שאדם אומר שהוא מוכן לשלם עבור השאתר השטח פתוח, הוא אכן מחיר שהיה משלם בפועל? כמו כן, הערכת שירותים שאינם נסחרים בשוק ושלחלק מהם אף ערך סובייקטיבי, היא תמיד משימה מורכבת. עם זאת, הבחירה לא לבצע הערכה כלל היא בעייתית כשלעצמה, שכן בפועל היא גוזרת ערך של אפס על המשאב, ובכך מטה כלפי מטה את ערכו ומקשה על תהליך ההשוואה בין חלופות שונות.
- במחקר זה בחרנו להשתמש בשיטת העברת התועלת, בהסתמך על מחקרו של פרופ' ניר בקר (בקר, 2013), ותוך ביצוע מספר התאמות. כאמור, גם בשיטה זו יש חסרונות, אך היתרון הגדול שבה הוא הזמינות שלה, שכן היא דורשת הרבה פחות תקציב מעבודה פרטנית על אזור שטח מצומצם מאוד. נוסף על כך, שיטה זו מאפשרת לנו להתבסס על מספר רב של מחקרים פרטניים בלתי תלויים ועל ניסיון מהעולם, תוך שאנו מבצעים התאמות לשטחים הרלוונטיים לישראל.
- לצורך מציאת ערכי השטחים הפתוחים השתמש בקר תחילה במאגר המידע EVRI, המאגד בתוכו נתונים על מאמרים ומחקרים בתחום שירותי המערכת האקולוגית מהעולם.²⁷ הנתונים במאגר המידע מקוטלגים לפי מפתח של אומדן גלובלי לשירותי המערכת האקולוגית TEEB.²⁸ המאגר מספק לנו ערכים מאזורים שונים בעולם עבור מכלול של שירותים אקולוגיים, ובהתאם לסוג המערכת האקולוגית. את ההתאמה בין סוגי המערכות האקולוגיות ב-EVRI לסוגי המערכות בישראל ביצע בקר באמצעות החלוקה הגיאוגרפית של האזורים הטבעיים בישראל לפי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. תרשים 11 מציג את המערכות האקולוגיות בישראל.

²⁷ EVRI - Environmental Valuation Reference Inventory

²⁸ TEEB - The Economics of Ecosystems and Biodiversity

תרשים 11: טיפסי מערכות אקולוגיות בישראל



מקור: בקר, 2013.

כדי להעביר את נתוני המחקרים השונים לישראל יצר בקר פונקציית מעבר הכוללת את משתני המערכות האקולוגיות, משתני שירותים אקולוגיים, משתנים סוציו-דמוגרפיים (תל"ג לנפש, צפיפות אוכלוסין, אחוז יודעי קרוא וכתוב ואחוז אוכלוסייה כפרית) ומשתנים גיאוגרפיים (יבשת, קווי אורך ורוחב). בסך הכול כלל בקר 665 מחקרים עבור 10 מערכות אקולוגיות ו-22 סוגים של שירותי מערכת. לאחר מכן, ביצע בקר אמידה אקונומטרית, כאשר המשתנה המוסבר הוא ערך הקרקע, והמשתנים המסבירים הם כלל המשתנים שתוארו קודם לכן. לאחר שקיבל אומדן לכל משתנה, הוא הציב את הערכים הרלוונטיים עבור כל אזור בהתאם לשירותים האקולוגיים שהקרקע מספקת, תוך ביצוע התאמות ותקנון על ידי שימוש במשתנים הגיאוגרפיים והסוציו-דמוגרפיים.

מכיוון שבמאגר המידע EVRI אין מספיק מחקרים העוסקים בשטחי מדבר (נוכח נדירותם של שטחים אלה במדינות רבות), היה צריך לבצע הערכה מקורבת על סמך שירותים אקולוגיים דומים שנמצאים בסוגי מערכות אקולוגיות אחרות. לשם כך,

הערכנו את השטח המדברי בהנחה שמרנית הגורסת כי הערך עבור השירותים הרלוונטיים במערכת מדברית הוא לפחות המינימום שהתקבל משירותים זהים במערכות אקולוגיות אחרות (לאחר התקנון למערכות האקולוגיות בישראל).

על כן, מתוך הגישה השמרנית שתוארה לעיל, בחרנו לכלול את השירותים הבאים עבור קרקע מדברית בנגב:

- **שירותי ויסות** – שירותים המסייעים לוויסות האקלים המקומי על ידי הצללה, לוויסות האקלים העולמי על ידי לכידת פחמן ולוויסות איכות האוויר.
- **שירותי תרבות** – שירותים הכוללים נופש, פנאי ואת הנגזרות מהם.

עבור שירותי הוויסות הערך הנאמד הוא 536 ש"ח לשנה לדונם, ועבור שירותי התרבות הערך הנאמד הוא 946 ש"ח לשנה לדונם. הערכים נלקחו מבקר (2013), ומכיוון שהם במונחי שנת 2011, היוונו אותם למונחים נוכחיים על ידי שימוש בנוסחת הצמדה לפי שיעור השינוי בפרמטרים הבאים: מדד המחירים, צמיחת האוכלוסייה ותוצר לנפש במכפלת גמישות ההכנסה הפנויה (0.85). יש הטוענים, ובצדק, כי בשירותי המערכת האקולוגית במדבר ישנו מרכיב של שירותי אספקה, כגון: משאבים רפואיים, משאבים גנטיים, מרעית לחיות משק, מאכלי בר, ועוד. לא כללנו את השירותים הללו מכיוון שקיימת שונות גדולה על פני השטחים השונים במדבר בדבר אספקת התוצרים. כלומר, יש שטחים שבהם יש תוצרים רבים, ויש שטחים שאין בהם כמעט. מסיבה זו, ומאחר שלא אמדנו גם שירותים אקולוגיים אחרים, בחרנו להוסיף עוד 15% לסך ערך השירותים האקולוגיים בקרקע במדבר. יש לציין כי למרות זאת סביר שמדובר בהערכת חסר, בגלל חוסר המידע הקיים בדבר הערכים המלאים של השירותים האקולוגיים במדבר בפרט, ובשאר האזורים בכלל. כמו כן, לא נלקחו אלמנטים חשובים נוספים, כגון רציפות השטחים. במסגרת זו, הערך שאמדנו הוא 2,032 ש"ח לדונם לשנה. אם נהוון את הערך הזה על פני תקופה של 23 שנים (תקופת החכירה לקרקע במכרזים הסולאריים הנוכחיים) בהנחת שער היוון 3%, נקבל 33,410 ש"ח לדונם.²⁹

אם נשווה את הערך שקיבלנו למחיר של דונם בשטח של רשות מקרקעי ישראל (רמ"י), העומד על 16,000 ש"ח (לתקופה חכירה של 23 שנים), נקבל כי ההפרש הוא 17,410 ש"ח לדונם. הפרש זה מייצג את התועלת הנוספת של השירותים האקולוגיים שאינה מתומחרת במחיר הקרקעות במכרזים הסולאריים. ברור כי כאשר מדובר בשטחים מופרים, בדומה לשטח המקודם בתת"ל 82 (תוכנית לתשתיות לאומית בדימונה דרום), ערך השירותים האקולוגיים כבר לא מתקיים במלואו. עם זאת, אין מן הנמנע לתת פרמיה ליזמים ולמשקי בית בגובה התועלת הנוספת כדי לעודד הקמת מתקני גגות וחיסכון בקרקע.³⁰ הרי ברור כי השטח המופר היה פעם שטח פתוח, ומכיוון שהדרישה לשימוש בשטחים בנגב רק תעלה ככל שהמדינה תתפתח, מתן פרמיה כיום יכול לסייע בהקטנת הלחץ לשימוש בשטחים פתוחים בעתיד. כמו כן, יש לציין כי ישנם

²⁹ השימוש בריבית 3% נעשה מתוך הנחה כי ישנו ערך אקולוגי ודאי שאנו מקבלים מהקרקע (ללא קשר להערכה שלנו) אם נמנע שימוש בקרקע על ידי הקמת מתקן על גג או על כל תצורה אחרת שחוסכת בקרקע. באופן קונקרטי, מאחר שהשירותים האקולוגיים מספקים ערך ודאי על פני זמן ואינם מתואמים עם השוק, הריבית שנבחרה מגלמת את העדפת הזמן החברתית (להרחבה ראו כהן, 2016). כמו כן, הריבית שנבחרה קרובה לתשואה הריאלית הממוצעת הנגזרת מאמידת עקום אפס בשנים 2008–2017 לתקופה לפדיון של 20 שנים, העומדת על 2.43%, לפי נתוני בנק ישראל.

³⁰ יש להדגיש כי אין אנו מציעים להעלות את מחיר הקרקע ליזמים סולאריים, אלא במקום זאת לתת פרמיה למתקני גגות כדי לעודד יזמים לעבור מקרקעות לגגות. מאחר שהקמת מתקן על גג חוסכת את ערך השירותים האקולוגיים (מעל מחיר הקרקע ליזמים סולאריים), יש לתת לגגות פרמיה בגובה של עד ערך החיסכון. נציין כי מדובר רק בערך מעל דמי החכירה, שכן עצם ההקמה על הגג כבר חוסכת את דמי החכירה, מכיוון שיזמי גגות אינם נדרשים לשלם לרמ"י תשלום זה.

שטחים שבהגדרתם הם מופרים, כגון שטחי אימונים של צה"ל בדרום הארץ, אך מאחר שבחלקם כמעט ולא נעשה שימוש, הרי שערך השירותים האקולוגיים בהם יכול להיות דומה לערך השירותים בשטח פתוח עם מאפיינים דומים (המארג, 2011). בהינתן 1,750 שעות שמש בשנה בשדה סולארי, ובהערכה שמרנית של 13 דונם קרקע למגה-ואט מותקן (כולל מקום לתשתיות), הערך המתקבל הוא תוספת של 0.8 אג' לקוט"ש למתקני גגות החוסכים בקרקע בשטח פתוח.³¹

3.3.2. ערך שטחים חקלאיים (ערך שוק וערך אקולוגי)

כיוון ששדות סולאריים רבים קמים על שטחים חקלאיים, ומכיוון ששטחים אלה נמצאים בעדיפות גבוהה יותר לשימוש ביחס לשטחים פתוחים, בחרנו להתייחס גם לערך של שטחים אלה במסגרת מחקר זה. קרקע חקלאית, בדומה לקרקע בשטח פתוח, מספקת שירותים אקולוגיים. עם זאת, בעיבוד האדמה חלק מן השירותים האקולוגיים נפגעים או נפסקים, ועל כן כמות השירותים האקולוגיים קטנה. פרט לערך האקולוגי, קרקע חקלאית יכולה לספק גם ערך שוק שהוא למעשה התוצרת הגדלה על השטח. נדגיש כי כאשר הקמת השדות הסולאריים נעשית על קרקע בייעוד חקלאי בשטח משבצת שאינה מעובדת, הרי שערך הקרקע בפועל יכול להיות נמוך יותר.³² כדי לתת אומדן לערך השוק ולערך האקולוגי של קרקע חקלאית השתמשנו במחקרו של בקר (2013) וצבן ואחרים (2004).

בקר יצר מיפוי מקורב של כלל סוגי השטחים החקלאיים בישראל באמצעות נתונים מהלמ"ס וממערכת הממ"ג (מערכת מידע גיאורפית – GIS). תרשים 12 מציג את כלל שימושי הקרקע החקלאית השונים (לא כולל שטחי מרעה וענפי הפרחים).³³ לצורך חישוב הערכים האקולוגיים השתמש בקר במחקרם של צבן ואחרים (2004) הכולל אומדן של שך התרומה החיצונית של ענפי החקלאות לפי השירותים השונים: קליטת קולחים, קליטת פסולת, שיפור איכות האוויר, חלחול מי גשמים, שמירת קרקע וערכי נוף. בחישוב תרומת השוק חישב בקר את ערך התרומה של מטעים ושדות מעובדים בהתאם לנתוני משרד החקלאות ופיתוח הכפר.

במחקר זה בחרנו לקחת את הממוצע המשוקלל של ערך השוק והאקולוגי על פני כלל סוגי השטחים החקלאיים לפי האזורים הגיאוגרפיים במדינת ישראל, שכן שדות סולאריים יכולים לקום בשטחים חקלאיים באזורים שונים ברחבי המדינה. הערך האקולוגי שאמד בקר במונחי 2013 הוא 663 ש"ח לדונם לשנה, וערך השוק הוא 747 ש"ח לדונם לשנה. את הערכים הללו התאמנו למונחי היום על ידי שימוש בשינוי במדד ערך התפוקות החקלאיות עבור ערך השוק, ועבור הערך האקולוגי השתמשנו באותה ההצמדה של השטחים הפתוחים. בסך הכול לתקופה של 23 שנים בשער היוון של 3% מדובר ב-23,874 ש"ח לדונם.

בהתאם לתקנות של רמ"י, מתקנים סולאריים יכולים לקום על שטחים חקלאיים בהינתן מגבלות מסוימות, כאשר המחיר שנקבע עבור דונם בחיבור למתח גבוה הוא 20,000 ש"ח לתקופת החכירה (23 שנים) והמחיר עבור חיבור למתח עליון נקבע על 25,000 ש"ח. אם נתייחס לסף התחתון, שכן מתקני גגות סולאריים יהיו מחוברים בעיקר למתח נמוך וגבוה, נקבל כי ההפרש בין דמי החכירה של רמ"י והערך שלקחנו בהסתמך על בקר (2013), עומד על 3,874 ש"ח לדונם לתקופת

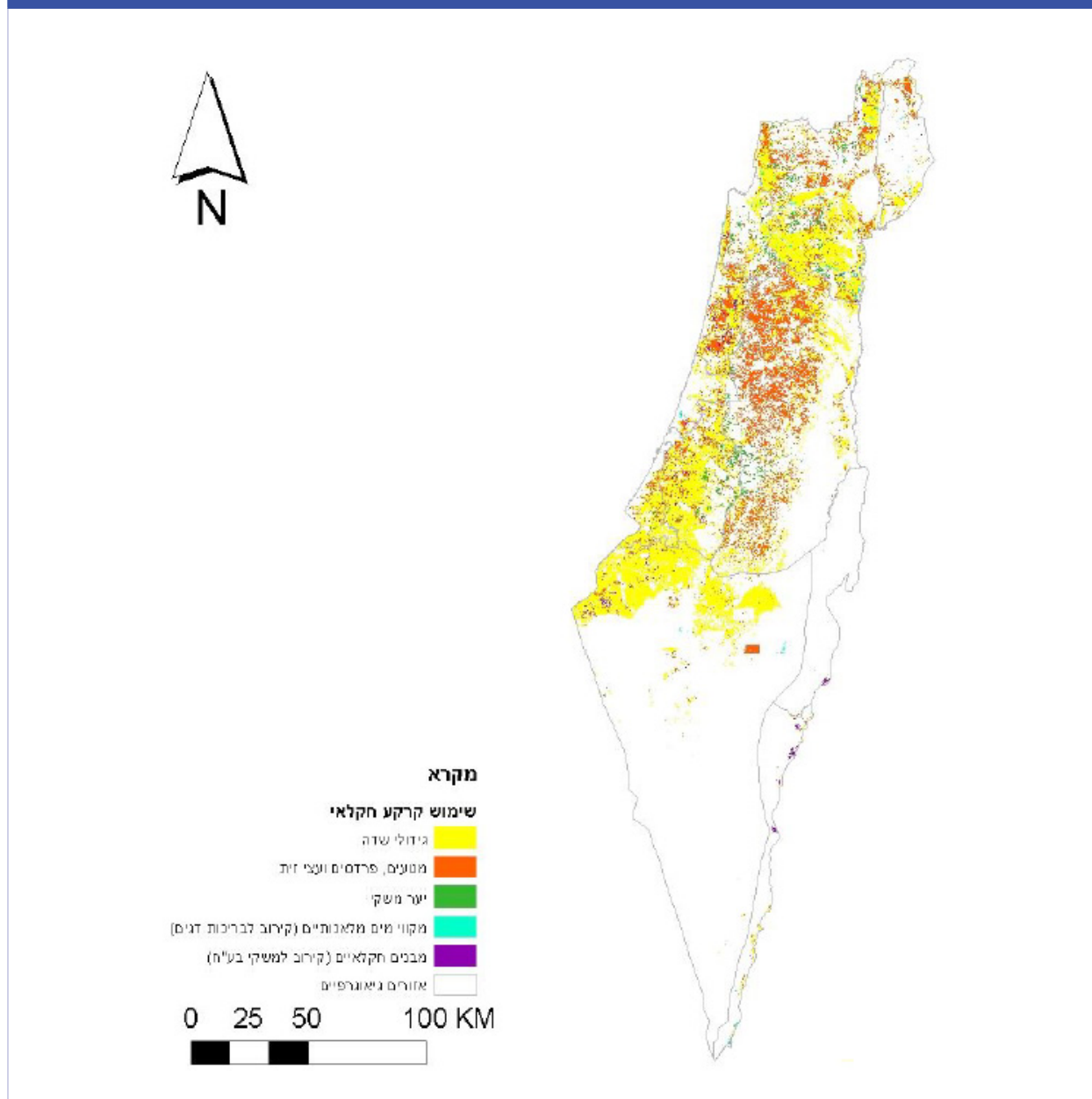
³¹ הפרמיה שחושבה יכולה להיות רלוונטית באותו האופן עבור יזמים הבוחרים להקים מתקנים על מאגרי מים, מגרשי חנייה וכדומה.

³² הקרקע החקלאית מספקת ערכי שוק אם היא מעובדת. אם הקרקע אינה מעובדת הרי שהיא מספקת רק שירותים אקולוגיים, ובמצב שכזה ערך השירותים הללו יכול להיות שונה בהשוואה לקרקע מעובדת.

³³ שטח הפרחים וצמחי הנוי אינו ידוע באופן מדויק עקב קושי באיסוף הנתונים, ואילו שטח המרעה הטבעי איננו נכלל בהגדרת הלמ"ס כשטח חקלאי (למ"ס, 2014).

החכירה. אם נניח כי דרושים 13 דונם למגה-ואט, וישנם 1,750 שעות פעילות בשנה לקו"ט מותקן בשדה, נקבל כי הפרמיה המגיעה למתקני גגות עבור החיסכון על קרקע חקלאית (כולל ערך התוצרת) עומדת על 0.2 אג' לקוט"ש.³⁴

תרשים 12: שימושי קרקע חקלאית בישראל



מקור: בקר, 2013.

³⁴ אם נבצע השוואה למול דמי החכירה בקרקע חקלאית במתח עליון, התועלת מהחיסכון בקרקע תהיה שלילית. זאת אומרת, דמי החכירה שהיזמים נדרשים לשלם מכסים את ערך השוק וגם את הערך האקולוגי של הקרקע החקלאית בממוצע.

3.4. ביטחון אנרגטי ואמינות אספקה

בהמשך לכלל סוגי התועלת שתוארו עד כה, בהתקנת מתקנים סולאריים במוקדי הצריכה קיים יתרון משמעותי נוסף – ביטחון אנרגטי ואמינות אספקה. פרט לאיום המתמיד של טילים, רשת החשמל בישראל חשופה לאיומים עתידיים נוספים, כגון: תקיפות סייבר, איומי הדופק האלקטרומגנטי (EMP) ואסונות טבע (וינשטוק ואלרן, 2016). עם איומים אלה מתמודדות מדינות נוספות בעולם, אך המצב של ישראל הוא ייחודי נוכח היותה אי אנרגטי, ללא אפשרות של יבוא חשמל במצב חירום. אם נתייחס למשל לתרחיש של מתקפת טילים, נוכל למנות לפחות שתי סכנות ממשיות לאספקת החשמל הסדירה: 1. פגיעה בתשתית הייצור; 2. פגיעה בתשתית האספקה (לדוגמה, פגיעה בקווי ההולכה). מתקנים סולאריים על גגות יכולים לסייע בהקטנת הנזק מהסיכונים הללו, שכן הם מבוזרים ויכולים לספק חשמל במוקדי הצריכה ללא תלות ברשת.

יש לציין כי נכון להיום, תקנות מנהל החשמל אינן מאפשרות לצרוך חשמל מהמתקן הסולארי בעת תקלה ברשת. המערכת הסולארית מתוכננת כך שבעת הפסקת חשמל היא מפסיקה את פעילותה, ולמעשה, הממיר מנתק את זרימת החשמל מהמתקן הסולארי ברגע שהוא מפסיק לקבל מתח מהרשת. התקנות של מנהל החשמל נובעות בעיקר מהחשש להתחשמלות הצוות המגיע לטפל בתקלה, וכאמור אין מדובר בסוגיה טכנית שאינה ניתנת לפתרון.³⁵

במחקר שנעשה בניו-ג'רזי ובפנסילבניה מטעם Clean Power Research, נמצא כי התועלת לאמינות האספקה של מתקנים סולאריים במוקדי הצריכה עומדת על 2 סנט אמריקאי לקוט"ש בממוצע (Clean Power Research, 2012). החוקרים טוענים כי בייצור חשמל במוקדי הצריכה אנו למעשה מורידים את הלחץ מהמערכת בשעות ביקוש, ועל כן הסבירות להפסקות חשמל עקב עומסי ביקוש קטנה. החוקרים הניחו כי 5% מסך העלות הכוללת בארה"ב מאי-אספקת חשמל, העומדת על כ-100 מיליארד דולר בשנה, נובעת מהפסקות חשמל בשל ביקושים גבוהים במוקדי הצריכה, המתרחשים בשעות שהמערכות הסולאריות יכולות לספק חשמל. בהנחה של דרגת חדירה של 15% ו-1,500 שעות ייצור בשנה של מערכת סולארית, כימתו החוקרים את החיסכון בהקטנת הסבירות להפסקות החשמל ב-2 סנט לקוט"ש.

הקושי בחישוב התרומה של המתקן הסולארי בהקטנת השעות הלא מסופקות נובע מכך שהמתקן מייצר רק בשעות של שמש, בעוד שהתקלה ברשת יכולה להתרחש בכל שעות היום. את הסיבה לתקלה ברשת ניתן לחלק לשני תרחישים עיקריים: 1. תרחיש חירום – כדוגמת מלחמה; 2. תרחיש שגרה – תקלות הנגרמות עקב עומס של ביקושים, רוחות בחורף או גורמים אחרים. בתרחיש חירום תרומתו של המתקן הסולארי רבה, שכן הוא יכול לייצר חשמל בממוצע למספר שעות ביום, אך הקושי הוא בבחינת ההסתברות למלחמה. לעומת זאת, אם נתייחס לתקלות המתרחשות בשגרה, נשאלת השאלה אם התקלות מתרחשות בעת שיאי ביקוש, שכן אז הפאנל על הגג הוא יתרון משמעותי (לפחות בקיץ), או, מצד שני, אם התקלות מתרחשות דווקא בעת מזג אוויר סוער, שבמהלכו אין שמש. משום שהמידע שיש בידינו לא מאפשר לנו להעריך את ההסתברות לתקלות בהתאם לתרחישים השונים שבשגרה ובחירום, הערכנו בצורה שמרנית למדי את התועלת לביטחון האנרגטי ולאמינות האספקה, מתוך הנחה כי האומדן שנגיע אליו יהיה אומדן חסר.³⁶

³⁵ ניתן לחשוב על שלל פתרונות, ובהם האפשרות להשתמש במפסק מיוחד המנתק את מקור הייצור (המתקן הסולארי) ואת מוקד הצריכה מהרשת, ומחבר ביניהם. פתרון זה ניתן ליישום בקלות יחסית על ידי שימוש בממיר נוסף, שאינו מחובר לרשת (יש לדאוג למתח יציב לממיר). החיסרון בפתרון המוצע הוא העובדה ששימוש בממיר נוסף מייקר משמעותית את המתקן הסולארי.

³⁶ יש לציין כי גם במקרים שהתקלה מתרחשת בעת מזג אוויר סוער, אין זה בהכרח אומר כי מתקנים סולאריים באזורי הצריכה לא יכולים לסייע. למשל, בעת סופת השלגים שהייתה בירושלים בדצמבר 2013, בתים רבים לא היו מחוברים לחשמל גם לאחר שהסופה הסתיימה והשמש האירה.

מכיוון שמרבית המתקנים הסולאריים הנמצאים על גגות מתחברים למתח נמוך, נתמקד בחתך זה של הצרכנים, הכולל משקי בית, עסקים קטנים (מסחר ותעשייה), המגזר הציבורי ויישוביים חקלאיים. נתוני חברת החשמל בדבר דקות אי-אספקה עבור ארבע השנים 2012–2015 (בניכוי הסופות ב-2013 וב-2015) מראים כ-172 דקות לא מסופקת במתח נמוך בממוצע בשנה. ממחקר שנערך עבור משרד האנרגיה (בלס, 2011), עולה כי עלות אי-אספקת החשמל (לקוט"ש) לצרכנים המחוברים למתח נמוך היא: 73, 196, 270, ו-103 ש"ח בהתאמה עבור משקי בית, מגזר התעשייה, המגזר המסחרי והציבורי, ויישובים חקלאיים.³⁷ ערך האי-אספקה גבוה במיוחד עבור המגזר המסחרי נוכח הפסדי פדיון והעובדה כי לבעלי עסק המחוברים במתח נמוך אין כדאיות ולפעמים גם אין אמצעים כדי לרכוש גיבוי.

אם נניח כי ישנן 1,700 שעות שמש מלאות בשנה שבהן הפאנל הסולארי (על הגג) מייצר חשמל, נקבל כי המערכת פועלת בממוצע 4.65 שעות ליום. 4.65 שעות ליום הן כאמור 19% ממשך היממה. מאחר שהתקלה יכולה להתרחש בכל שעות היממה, אזי ניתן להניח כי בממוצע ב-19% מהזמן אנו "מבוטחים" בחשמל סולארי. לכן, בממוצע ב-33 דקות מתוך 172 דקות לא מסופקות יהיה לנו חשמל סולארי.³⁸ בהנחה שמשק הבית צורך בממוצע כ-1 קילוואט בשעה (יש שעות שהוא צורך משמעותית יותר ויש שעות שהוא לא צורך כמעט בכלל) נקבל כי סך התרומה האפשרית של הפאנל הסולארי בהקטנת הסבירות להפסקת חשמל היא 41 ש"ח לשנה (לפי האומדן של בלס, 2011). עבור מערכת סולארית ביתית בגודל 4.7 קו"ט מותקן הפועלת 1,700 שעות בשנה, נקבל כי הערך לקוט"ש הוא 0.51 אג'. כלומר, התרומה של הפאנלים הסולאריים עבור משקי הבית בהקטנת הסבירות להפסקת חשמל היא 0.51 אג' לקוט"ש.

כדי לקבל את התועלת עבור המגזרים האחרים, נכפיל את האומדן שקיבלנו קודם לכן (0.51 אג' לקוט"ש) ביחס עלות האי-אספקה לקוט"ש בין המגזר הרלוונטי לבין משקי הבית. למשל, עבור המגזר התעשייתי היחס יעמוד על 2.69, ולאחר שנכפיל אותו ב-0.51 אג' נקבל כי התרומה של הפאנלים הסולאריים בהקטנת הסיכון להפסקת חשמל במגזר התעשייה (במתח נמוך) עומדת על 1.37 אג' לקוט"ש. בחישוב משוקלל, בהינתן הפרופורציה של כל אחד מהמגזרים בסך צריכת החשמל במתח נמוך בשנת 2011 (לא כולל שאיבת מים), נקבל כי התרומה הממוצעת משימוש בפאנלים סולאריים בהקטנת הסבירות להפסקת חשמל היא 1 אג' לקוט"ש לצרכן במתח נמוך.

חשוב להדגיש כי האומדן שחושב הוא סף תחתון, שכן לא הבאנו בחשבון תרחיש של מלחמה ואת האפשרות לפגיעה ברשת החשמל. במצב שכזה, התועלת שעשויה להגיע משימוש בפאנלים סולאריים יכולה להיות גבוהה מאוד, גם אם מדובר בשימוש למספר מצומצם של שעות ביום. מעבר לכך, פאנלים סולאריים יכולים להיות שימושים אף לגופים כמו בתי חולים, שמחזיקים בכל מקרה גיבוי בגנרטורים. לדוגמה, האפשרות לחסוך הפעלה של גנרטורים (למשך מספר שעות) משמעותית מאוד, מכיוון שלא רק שאנו חוסכים את עלות הדלק היקר ומוזהמים פחות, אנו יכולים גם להשתמש באותה כמות של מלאי דלק לתקופה ארוכה יותר, ולהפעיל את הגנרטורים לפרק זמן ארוך יותר מבלי שיתקלקלו. יש לציין כי כל ההתייחסות

³⁷ עלות האי-אספקה נאמדה בשנת 2011, ומשום כך ביצענו התאמה באמצעות מדד המחירים למחירי היום.
³⁸ אם תקלות מתרחשות בעת שיאי הביקוש, כפי שנטען לא פעם על ידי חברת החשמל, אזי ההתלכדות של שעות הפעילות של המערכת הסולארית עם השעות שיש בהן תקלות יכולה להיות למעלה מ-19% עבור משקי הבית (בייחוד בקיץ). אם לעומת זאת, התקלות הן ספורדיות וארעיות, אזי ההנחה כי המערכת הסולארית נותנת גיבוי במשך 19% מהיום, בהתאם לשעות הפעילות שלה, היא סבירה. עבור עסקים ומסחר ההנחה רלוונטית עוד יותר, שכן הנזק עבורם מתרחש בעיקר בשעות המסחר, שיש בהן אור, ולכן התרומה של הפאנלים הסולאריים בהורדת הנזק שלהם מהפסקות חשמל יכולה להיות רלוונטית ליותר מ-19% מהזמן.

בפרק זה מתעלמת מהאפשרות לאגירה. ברגע שהכדאיות של האגירה תגדל, התועלת משימוש במתקנים סולאריים במוקדי הצריכה תהיה גבוהה לאין שיעור.

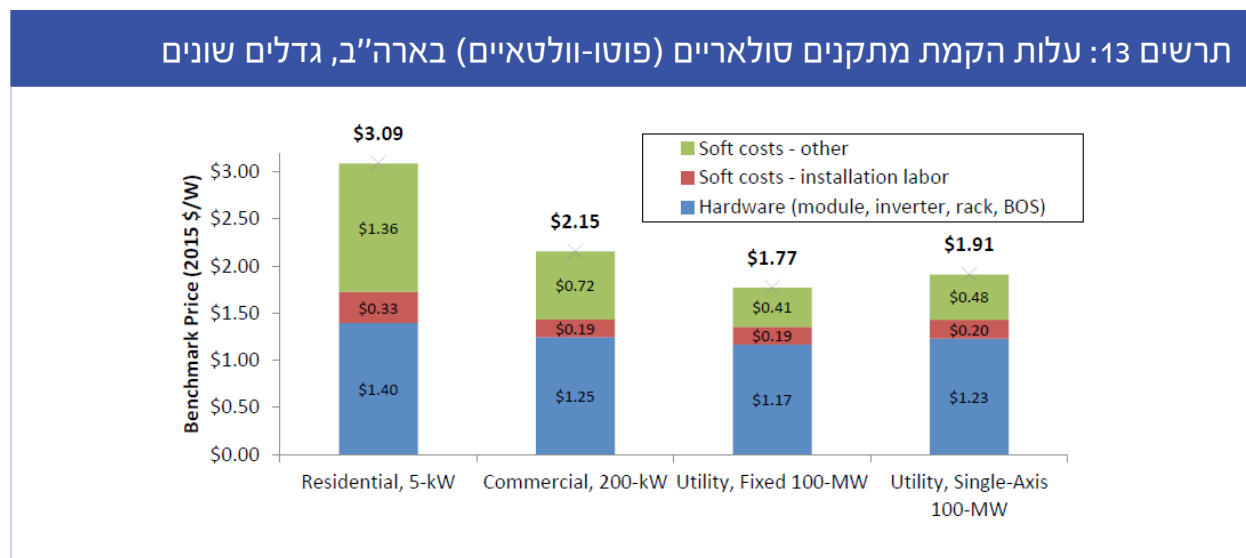
3.5 תעסוקה

היקף המועסקים בעולם בתחום הסולארי (פוטו-וולטאי) עמד בסוף שנת 2016 על 3.1 מיליון איש, והיווה למעלה משליש מסך המועסקים בתעשיית האנרגיה המתחדשת (IRENA, 2017b). בפרק זה נרצה לבחון את התרומה של מתקנים סולאריים קטנים (קו"ט בודדים ועד עשרות) בייחס למתקנים גדולים (מגה-ואטים בודדים ומעלה) מבחינת התעסוקה למשק.³⁹ הקמה של מתקני גגות רבים מצריכה יותר כוח אדם מהקמה של שדה בודד בהספק כולל זהה, ולכן מתקני גגות יכולים לספק פרנסה ליותר אנשים במשק. אין זה חדש כי מדינות רבות רואות חשיבות במציאת מקורות תעסוקה לפרטים במשק, ולראיה – שירות התעסוקה הישראלי, הנתון לפיקוחו של שר הרווחה והעבודה, משקיע משאבים רבים ומטפל בכ- 500 אלף מחפשי עבודה מדי שנה (שירות התעסוקה הישראלי, 2017). אין זה אומר כי יש לעודד תעסוקה בכל מחיר, שכן אם כך היו פני הדברים אזי לא היינו מתקדמים למיכון בענפים שונים (תעשייה, חקלאות, ועוד) שייתרו עבודה של אנשים רבים. עם זאת, כאשר מפעלים נסגרים ויחידות ייצור עוברות למדינות עם כוח עבודה זול יותר, ישנה תועלת משמעותית ביצירת מקומות עבודה מקצועיים במשק, על פני תשלום דמי אבטלה וקצבאות למחוסרי העבודה. כיוון שהקמה של מתקנים סולאריים דורשת כוח עבודה מגוון, ההנחה היא כי ענף זה יוכל לקלוט חלק מדורשי העבודה הקיימים במשק.⁴⁰

תרשים 13 מציג את עלות ההקמה לוואט עבור מתקנים בגדלים שונים בארה"ב במהלך הרבעון הראשון של 2015. מהתרשים עולה כי עלות העבודה בהקמת מתקן ביתי גדולה ב-74% לפי ואט מותקן בהשוואה למתקנים בגודל של 200 קו"ט ומעלה. במתקן קטן עלות העבודה מתחלקת על פחות ואט (חלק הוא עלות קבועה), ועל כן עלות ההתקנה עבור המערכת תהיה גבוהה יותר (עד סף מסוים). יש לציין כי בישראל הסף (במנוחי קו"ט מותקן) שממנו עלות העבודה תהיה קבועה יכול להיות גבוה יותר, שכן שוק הגגות בישראל פחות מפותח.

³⁹ התרומה לתעסוקה בהקמה של מתקני גגות מסחריים בגודל של מאות קו"ט יכולה להיות קטנה מהתרומה של מתקנים קטנים (כפונקציה של עלויות עבודה). למרות זאת, בסעיף זה בחרנו להתמקד במתקנים קטנים, מכיוון שחלק גדול מהגגות במוקדי הצריכה בארץ מותאימים למתקנים בסדרי גודל של עד עשרות קו"ט.

⁴⁰ במצב הנוכחי המשק נמצא בשיעור אבטלה נמוך (4.5% בלתי מועסקים ביוני 2017, למ"ס) ועל כן התרומה לתעסוקה מהקמת מתקנים קטנים מהותית פחות. עם זאת, בהנחה שהקמת המתקנים הקטנים תהפוך למקור תעסוקה בר-קיימא ושיהיו שינויים בדפוסי התעסוקה במשק, ייתכן שבטווח הרחוק התרומה לתעסוקה תהיה רלוונטית יותר.



מקור: NREL, 2015.

מחקרים שבחנו את תועלת התעסוקה ממתקנים סולאריים התמקדו בדרך כלל בהשוואה למתקנים קונבנציונליים. כך למשל, במחקר שנעשה בסן-אנטוניו, טקסס, בוצעה השוואה בין התועלת מהקמת מתקנים סולאריים לבין הקמת מתקן טורבינת גז במחזור משולב (מחז"מ) (Clean Power Research and Solar San Antonio, 2013). על סמך עלות המתקנים חישוב החוקרים את התועלת הכלכלית הישירה לתעסוקה. הם הניחו כי במתקן סולארי שליש מהעלויות הן חומרה ושני שלישים הן עלויות אחרות. עבור עלויות החומרה הם הניחו כי 20% ניתן לשייך לתעסוקה מקומית, ועבור שאר העלויות הניחו כי 90% רלוונטיים לתעסוקה מקומית. באופן דומה הם ביצעו תחשיב עבור המחז"מ, בהנחה ש-50% מעלות המחז"מ תשוך לתעסוקה מקומית. התועלת לתעסוקה המקומית כומתה ב-3,750 דולר לקו"ט מותקן.⁴¹

במחקר קודם שנעשה בניו-ג'רזי ובפנסילבניה בוצעה השוואה דומה בין מחז"מ למערכת סולארית, אלא ששם רצו החוקרים לבחון את הגידול נטו בהכנסות ממס ההכנסה (Clean Power Research, 2012). ההנחות במחקר (אחוז עלויות החומרה, אחוז שיוך לתעסוקה מקומית) היו זהות למחקר שנערך לאחר מכן בסן אנטוניו. תוך שימוש בשיעורי מס ההכנסה הפדרלי והמקומי בכל אחת מהמדינות, התועלת נטו מהגידול בהכנסות ממסו על תעסוקה שחושבה על ידי החוקרים עמדה על 3.9 סנט ו-4 סנט לקו"ט ש לטובת מתקנים סולאריים עבור פנסילבניה וניו-ג'רזי בהתאמה.

במחקר הנוכחי בחרנו, מתוך גישה שמרנית, להתבסס על המתודולוגיה ועל שיטת ההערכה ששימשו בדו"ח קנדל (המועצה הלאומית לכלכלה, 2013). בדו"ח קנדל בחרו להכיר ב-20% מסך עלות ההעסקה הישירה במתקנים סולאריים כתועלת מִקְרו-כלכלית למשק, מתוך ראייה כי מרבית המיזמים יקומו באזור עדיפות א'. במחקר זה בחרנו גם כן להסתמך על אומדן של 20%, אף על פי שאיננו מתייחסים רק לאזור מוגדר אחד, שכן הקמה של מתקנים סולאריים על גגות יכולה להיות

⁴¹ התחשיב נעשה עבור דרגות חדירה נמוכות, ולפיו קו"ט סולארי מחליף 0.71 קו"ט של מחז"מ.

רלוונטית עבור כלל הארץ. עם זאת, סביר כי מועסקים רבים בתחום ההתקנה יגיעו מאזור הפריפריה, ועל כן ניתן לראות את העסקתם כתרומה ישירה גם לפריפריה.⁴²

בהתייחס לעלות העבודה בחרנו לכלול את עלות ההנדסה, התכנון וההתקנה של המתקנים (EPC).⁴³ תיתכן גם תועלת מקומית בהזמנת ציוד נוסף מספקים ישראלים, אך לשם השמרנות בחרנו שלא לכלול אותה, כיוון שההבחנה בין הציוד המקומי והמיובא לא ברורה באופן מלא. כמו כן, לא התייחסנו לתרומה של התחזוקה לתעסוקה, מכיוון שמדובר בהיקף עבודה זניח יחסית, בוודאי כשמביאים בחשבון שבשדות הסולאריים רובוטים מנקים את הפאנלים, ואילו את התחזוקה הביתית יכולים לבצע בעלי הבית.

את עלויות ההתקנה אימצנו ממדד בלומברג, הכולל נתונים בדבר עלויות ההקמה של מתקנים סולאריים בגדלים שונים. מנתונים לסוף 2016 עולה כי עלות ההקמה למתקן ביתי עומדת על 1.53 דולר לואט מותקן, ועלות ה-EPC עומדת על 42 סנט. עלות ההקמה למתקן שדה עומדת על 1.03 דולר לואט מותקן, ועלות ה-EPC עומדת על 25 סנט. מהנתונים עולה כי עלות ההקמה במתקן ביתי גבוהה בכ-50%, עלות ה-EPC במתקן הביתי היא למעלה מ-25% מסך עלות ההקמה, וגבוהה ב-68% בהשוואה לשדה סולארי.⁴⁴ סביר כי עלות המתקנים בישראל שונה ממדד בלומברג, שהוא ממוצע עולמי, אך מדובר בקירוב מספק, שכן מה שחשוב לצורך החישוב הוא ההפרש בעלויות ולא העלויות עצמן. בחישוב לפי 1,700 שעות פעילות עבור קו"ט מותקן למתקן ביתי ו-1,750 שעות פעילות עבור שדה, ובהנחה ששער הדולר 3.6 ש"ח, התרומה הנוספת לתעסוקה ממתקני גגות עומדת על 0.5 אג' לקוט"ש.

יש להדגיש כי התועלת הזו מתווספת בעת התקנת גגות, ואין מדובר על התרומה המלאה לתעסוקה ממתקני אנרגיה מתחדשת, שכן היא גבוהה משמעותית. יתרה מכך, חשוב לציין, בדומה למה לנאמר בדו"ח קנדל, כי ההנחה היא שבעקבות הרצון לעמוד ביעדי הממשלה, הדרישה לביצוע מיזמים של אנרגיה מתחדשת תלך ותגבר, כך שהחברות יוכלו להתקיים לאורך זמן מעוד ועוד מיזמים.

3.6. התייעלות אנרגטית (הצללה)

כאשר מדברים על שימוש בפאנלים סולאריים, בדרך כלל מתייחסים לאפשרות לצמצם את צריכת החשמל מהרשת, אך לא רבים מזכירים את האפשרות לצמצם את צריכת החשמל על ידי הצללת הגג. הגג חשוף ונמצא בזווית מתאימה לספיגה של מרבית האנרגיה שבקרירת השמש. התחממות הגג בקיץ תורמת להתחממות פנים המבנה, דבר שיכול להגדיל את צריכת החשמל. ישנם פתרונות ייעודיים לצמצום כמות החום שהגג סופג, כדוגמת בידוד הגג, צביעתו בלבן, שימוש בציפויים רפלקטיביים ועוד. לרשימת הפתרונות הללו ניתן להוסיף גם את הפאנלים הסולאריים. מחקרים מהארץ ומהעולם מראים כי לפאנלים ישנה תרומה לקירוי הגג מאחר שהם קולטים את חום השמש לפני שהוא נספג במלואו בגג.

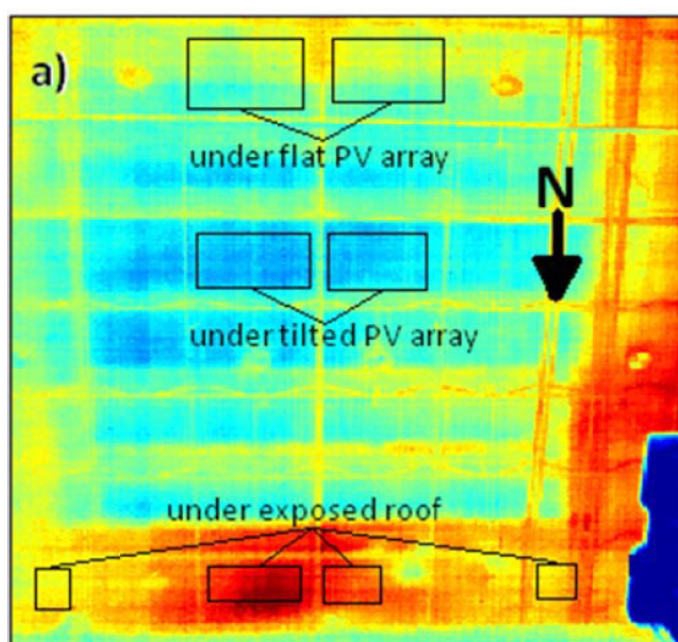
⁴² ההשוואה אינה מביאה בחשבון מקומות תעסוקה מאנרגיה קונבנציונלית שעלולים להתייתר, הואיל ואנו יוצאים מנקודת הנחה כי בכל מקרה אחוז מסוים מהחשמל המיוצר במשק יהיה סולארי, ובתוך המסגרת הזו, השאלה היא היכן יש יותר מועסקים, בהקמה של מתקני גגות או בהקמה של מתקני שדות.

⁴³ EPC - Engineering, Procurement, and Construction.

⁴⁴ התרומה לתעסוקה מחושבת על בסיס השוואת מתקן ביתי ומתקן שדה, ולכן מהווה סף עליון לתרומה לתעסוקה בהשוואת מתקן שדה למול מתקן גג גדול (מסחרי).

במחקר שנעשה באוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו, בוצעה בחינה של אפקט ההצללה שיש לפאנלים סולאריים על גג מבנה תעשייתי (Dominguez, Kleissl, and Luvall, 2011). במהלך חודש אפריל בחנו החוקרים את הטמפרטורה על הגג בשלוש חלופות: עם פאנל סולארי בזווית, עם פאנל סולארי שטוח וללא פאנל סולארי. על סמך הנתונים מחדש אפריל, בוצעה הדמיה ליתר השנה (בהתאם לנתונים מטאורולוגיים). תרשים 14 מתאר באמצעות מצלמה תרמית את אפקט ההצללה. מהתרשים עולה כי שטח הגג הנמצא תחת הפאנל בשיפוע הוא האזור הקר ביותר.⁴⁵ אם המערכת ממוקמת בשיפוע, סך החיסכון בחשמל מההצללה לאורך חיי המערכת שווה ערך ל-5% מעלות המערכת.⁴⁶

תרשים 14: מבט על ממצלמה תרמית על גג המבנה



מקור: Dominguez, Kleissl, Luvall and, 2011.

במחקרים נוספים שנעשו בעולם המסקנות היו דומות. במחקר שנערך בדרום קליפורניה, נבחנה ההשפעה של התקנת מערכות סולאריות על גגות ב-260 אתרים, ונמצא כי עלייה של מעלה אחת בטמפרטורה היומית הממוצעת (בימים חמים) הביאה לכך שבבתים עם מערכות סולאריות השתמשו ב-0.501 קוט"ש פחות ביום בהשוואה לבתים ללא מערכות סולאריות (Itron, 2010). מהדמיה שנעשתה בפריז, הסיקו החוקרים כי מערכת סולארית על גג מקטינה באמצעות ההצללה את הצורך במיזוג אוויר בקיץ בכ-12% ומגדילה את הצורך במיזוג ב-3% בחורף (Masson et al., 2014). במחקר שנערך באריזונה, הראו החוקרים כי הצללה ממערכת סולארית על גג מקטינה את הצורך במיזוג בימים חמים ב-8% עד 11%

⁴⁵ ההצללה בפאנל הנטוי משמעותית יותר מבפאנל השטוח מכיוון שהאוויר החם שנקלט בין הפאנל לבין הגג מנותב בחלקו על ידי הרוח.

⁴⁶ מכיוון שההדמיה בוצעה על פני שנה, הובא בחשבון האפקט ההפוך – בחורף הגג מתחמם פחות עקב ההצללה של הפאנלים הסולאריים, ולכן פנים המבנה יכול להיות קר יותר.

(Salamanca et al., 2016). במחקר שנערך ביוון הראו החוקרים כי הבדלי הטמפרטורה בין השטח המוצל על ידי המערכת הסולארית לבין השטח החשוף הגיע במהלך אוגוסט בשיא היום לבין 10.7 עד 16.2 מעלות צלזיוס (Kapsalis, Vardoulakis, and Karamanis, 2014).

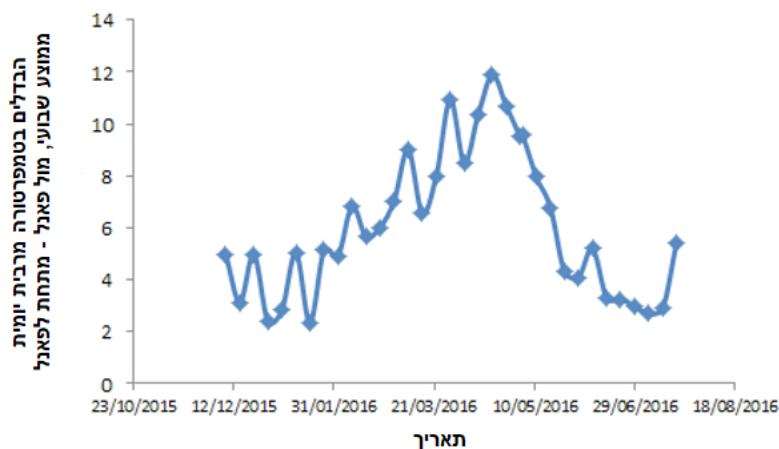
במחקר שנערך בארץ במרכז קדס שבאוניברסיטת חיפה הגיעו החוקרים לתוצאות דומות (שינדלר ואחרים, 2016). תרשים 15 מציג את אופי המדידה של הצללה, ותרשים 16 מציג את הבדלי הטמפרטורה היומיים המרביים במהלך מספר חודשים בין השטח המוצל (מתחת לפאנל הסולארי) לבין השטח החשוף. מהגרף עולה כי במהלך חודש אפריל הגיע הפרש הטמפרטורות עד 14 מעלות צלזיוס, ולאחר מכן נראה כי ישנה ירידה משמעותית, ועלייה נוספת לקראת חודש יולי. הירידה הזו איננה ברורה, מאחר שהיינו מצפים שאפקט הצללה יהיה משמעותי יותר בקיץ. הסבר אפשרי לתופעה הוא שינוי בזווית השמש, שהביא לכך שהאזור המוצל היה קטן יותר, ולכן נראה כי במספר חודשים אפקט הצללה משמעותי פחות. יש לציין כי הממצאים ממרכז קדס הם חלק ממחקר גדול יותר על שילוב גגות ירוקים עם פאנלים סולאריים, ונראה שדרוש מחקר נפרד ומעמיק יותר כדי לתת ערך מדויק לאפקט הצללה.

תרשים 15: הצללה ממתקנים פוטו-וולטאיים על גבי יריעות ביטומניות



מקור: שינדלר ואחרים, 2016.

תרשים 16: הבדלים בטמפרטורה מרבית יומית בין האזור המוצל לבין האזור החשוף



מקור: שינדלר ואחרים, 2016.

אף על פי שנראה מהמחקרים שתוארו לעיל כי לפאנלים הסולאריים יש השפעה משמעותית על הצללת הגג, במחקר זה בחרנו בהערכה שמרנית, כ-25% מערך החיסכון שהוערך במחקר מאוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו. זאת אומרת, הערכנו את התועלת מאפקט ההצלה ב-1.25% מסך עלות המערכת לקו"ט מותקן. בהנחה של 1,700 שעות פעילות ועלות של 1.53 דולר לקו"ט מותקן למערכת ביתית (נתוני בלומברג לסוף 2016), ולפי שער דולר של 3.6 ש"ח, התרומה מהצללה נאמדת ב-0.3 אג' לקוט"ש.

הסיבות לשימוש בהערכה שמרנית נובעות בין היתר מכך שההשפעה על החיסכון בחשמל משתנה כתלות במספר הקומות במבנה, בחומרים השונים שהגג בנוי מהם, ובאופן הצבת הפאנל על הגג. על כן, דרוש מחקר מעמיק בארץ, נוסף לזה שנעשה במרכז קדס, כדי שנוכל לתת ערך מדויק יותר, שייתכן שיהיה אף גבוה יותר, לאפקט של הצללת הגגות על ידי מתקנים סולאריים.

4. סיכום

השניים הקרובות טומנות בחובן אתגרים רבים למשק הישראלי בכלל, ולתחום האנרגיה בפרט. בין האתגרים המשמעותיים ישנו הצורך לעמוד ביעדי הממשלה לשנים 2020 ו-2030 בדבר שילוב האנרגיות המתחדשות בתמהיל ייצור החשמל בישראל (10% עד 2020 ו-17% עד 2030). ככל שהזמן עובר, השלמת היעד ל-2020 נראה קשה עוד יותר, שכן כיום נותרו לנו כשנתיים וחצי להתקין 1,500–2,000 מגה-ואט של הספק סולארי, כפול ממה שהותקן עד היום ביותר מ-5 שנים. בהנחה שמרבית החשמל מאנרגיה מתחדשת יהיה סולארי, יהיה עלינו למצוא דרכים יצירתיות להגדיל את סך ההספק שהציבור בוחר להתקין. לא ניתן להסתמך על רוב של מתקני קרקע כפי שנעשה עד היום, כיוון שמשך הקמת מתקנים כאלה ארוך מאוד בגלל הצורך באישורים לשימוש בקרקע ובתשתיות לחיבור לרשת החשמל. לעומת זאת, מתקני גג סולאריים

הם פשוטים יותר להקמה, ולכן הם למעשה המשלים לפתרון לעמידה ביעדי הממשלה, לפחות עבור היעד של 2020. לאור הפוטנציאל הרב של הגגות והאפשרות להקים מתקנים כאלה בערים, בייחוד באזורים שהרשת ערוכה לקלוט מתקנים חדשים, יש צורך לעודד ככל הניתן את הקמתם.

האתגר בהקמת מתקני הגגות הוא העלות שלהם. הקמת מתקני הגגות (בעיקר הקטנים) יקרה ביחס למתקנים גדולים, וללא תמריצים מתאימים אנשים לא ירצו להקים מתקנים כאלה. מסיבות אלה רצינו לבחון במחקר זה אם מתקני הגגות טומנים בחובם ערך נוסף למשק מעבר לערך הגלום בשדות סולאריים, ואם כך כיצד יש לתת להם עדיפות. בחנו את כלל סוגי התועלת העיקריים ממתקני גגות, וכימתנו אותם למונחים כספיים. סוגי תועלת אלה, כפי שנראה, הם לא מעטים: חיסכון על קווי חיבור של מתקני שדות לרשת, חיסכון על איבוד חשמל בהעברת האנרגיה למוקדי הצריכה, חיסכון על משאב הקרקע, תרומה לביטחון האנרגטי ולאמינות אספקת החשמל, תרומה לתעסוקה ותרומה לחיסכון בחשמל מהצללת הגג. באמצעות שימוש במתודולוגיה מתאימה וסקירת מחקרים מהארץ ומהעולם, כימתנו את הערך התוספתי של מתקני הגגות ב-4.3 אג' לקוט"ש. הערך הזה הוא למעשה החיסכון שבהקמת מתקני גגות סולאריים (ביחס לקרקע) ותרומתם הנוספת למשק ולציבור בישראל. מכיוון שהעדפנו להיות שמרנים, ייתכן שבפועל התועלת גבוהה יותר.

מפני שהערך שחושב הוא התרומה של הגגות למשק ולציבור בישראל, ניתן לחשוב על מנגנונים שונים כדי לתת תמריצים ליזמים ולמשקי הבית להקים מתקנים כאלה. בין השאר העלינו את האפשרות לתת פרמיה בגובה התועלת הישירה למשק החשמל (מניעת איבוד חשמל וחיסכון בתשתיות), שתתווסף לתעריף על מתקני קרקע, ליזמים הבוחרים להקים מתקני גגות (2.3 אג' לקוט"ש). לפרמיה זו רצוי להוסיף את התועלת מהתרומה לביטחון האנרגטי ולאמינות האספקה, בהנחה שאפשר להשתמש במתקנים סולאריים בעת תקלת רשת ביום. עבור יתר סוגי התועלת יש לפעול בתיאום עם הגופים האמונים על הנושאים הרלוונטיים לשם מתן תמריצים מתאימים.

כמו כן, יש לשים דגש מיוחד על סוגיות הנוגעות להסדרות הקיימות: יש צורך לשפר את הסדרת מונה-נטו, ובמסגרת זו כדאי לאפשר לציבור למכור עודפים לרשת מעבר לצריכה, במקומות שהרשת עוד פנויה לקלוט. נוסף על כך, רצוי להתייחס לחסמי אסדרה שאינם מאפשרים לקזז את הצריכה של דיירים בבניין עם גגות משותפים. על הממשלה לעשות ככל יכולתה כדי לדאוג שהציבור יהיה מודע לנושא ולאפשרויות העומדות בפניו בכל הנוגע להפקת חשמל על מבני המגורים. ככל שהממשלה תהיה פעילה יותר ותעודד את התחום, כך סביר שיותר חברות ייכנסו לענף וכך גם התחרות על מחירי הקמת המתקנים הקטנים תגבר. בהקשר זה, הממשלה יכולה לנסות להזיל את העלויות באמצעות התערבות ישירה בקול קורא. כלומר, הממשלה תבחר באמצעות מכרז ספק מופך, המתחייב למחיר מוזל, ותפנה אליו מאתר ממשלתי.

במחקר זה לא התייחסנו ליעדים של 2030 עקב האי-ודאות הרבה הקיימת עד תאריך זה, אך יש לזכור כי צריך יהיה להתכונן גם ליעד זה מבעוד מועד. זאת ועוד, בגלל הרצון להתמקד ביעדי 2020 לא התייחסנו במחקר זה לסוגיית ההשפעה על הרשת אם תתרחש חדירה משמעותית של מתקנים סולאריים של מעל 10%. נוסף על כך, לא התייחסנו לשיפורים הטכנולוגיים בתחום האנרגיה המתחדשת ולהשפעתם הפוטנציאלית על העמידה ביעדי שילוב האנרגיות המתחדשות. בהקשר זה ניתן למנות את נושא האגירה, שכן כאשר האגירה תיעשה כדאית, אנרגיית השמש תהפוך למשאב בסדר גודל משמעותי מאוד. לבסוף, לאור הצפי לקליטה של מתקני גגות סולאריים כדאי לבצע הדמיות פרטניות באזורי הצריכה כדי לראות באופן מדויק אם וכיצד ניתן לחסוך בהשקעות ברשת ההולכה, ומצד שני אילו השקעות יידרשו ברשת החלוקה.

ביבליוגרפיה

- בלס, א' (ERCG). 2011. אומדן עלות אי-אספקת חשמל צד הביקוש. משרד האנרגיה.
- בקר, נ'. 2013. הערכה כלכלית ראשונית של שירותים אקולוגיים בשטחים טבעיים וחקלאיים בישראל. המשרד להגנת הסביבה.
- גיאופרוספקט. 2016. תת"ל 82, תחנת כוח סולארית דימונה – דרום, סקירת ההליך התכנוני ובחירת חלופות מיקרו. משרד האנרגיה.
- המארג. www.hamaarag.org.il [נצפה בינואר, 2017].
- וייל, ד', שגיא, ה', שגיא, י', רמון, א', רוזנטל, ג' וחרמוני, ח'. 2016. השפעת חלופות פריסה שונות של מתקנים לייצור אנרגיה חשמלית מאור השמש (פוטו-וולטאיים) על שירותי המערכת האקולוגית במרחב שקמה. מחקר חלוץ ליישום גישת שירותי המערכת האקולוגית בתכנון ובניהול מרחב שקמה. מכון דש"א – דמותה של ארץ.
- וינשטוק, ד' ואלרון, מ'. 2016. ביטחון מערכת החשמל בישראל – הצעה לאסטרטגיה רבת. המכון למחקרי ביטחון לאומי.
- ורדימון, ר'. 2010. הערכת הפוטנציאל לייצור חשמל פוטו-וולטאי מבוזר על גגות בתים בישראל. מכון דש"א – דמותה של ארץ.
- זליכה, י'. 2012. המחיר המשקי האופטימלי למערכת פוטו וולטאי המותקנת על גגות. חברת SBY.
- חברת החשמל לישראל. 2013. מחויבות למשק האנרגיה חשמל אמין ומין.
- חברת החשמל לישראל. 2017. חיבור מתקנים פוטו-וולטאיים במערכת ההולכה והחלוקה בהתאם ליעדי הממשלה.
- כהן, א'. 2016. מתודולוגיה לקביעת שער ההיוון הממשלתי. מרכז מילקן לחדשנות, מכון ירושלים למחקרי מדיניות.
- לברון, י', וינשטוק, ד', דולב, ש' והלס, ג'. 2016. בחינת פוטנציאל החדירה המרבי של מקורות מתחדשים לרשת החשמל הישראלית. משרד האנרגיה, לשכת המדען הראשי.
- הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2014. שנתון סטטיסטי לישראל 2014.
- הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2016. ישראל במספרים 2016.
- המארג. 2011. דוח מצב הטבע 2010. ירושלים: התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע.
- המארג. 2017. מערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הערכה לאומית. תל-אביב: התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע.
- המועצה הלאומית לכלכלה. 2013. הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות (ועדת קנדל). משרד ראש הממשלה.
- משרד האנרגיה. www.energy.gov.il [נצפה בנובמבר, 2016].
- משרד ראש הממשלה. 2009. החלטת ממשלה 4450 – קביעת יעד מנחה וגיבוש כלים לקידום אנרגיות מתחדשות בפרט באזור הנגב והערבה.
- משרד ראש הממשלה. 2015. החלטת ממשלה 542 – הפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק.
- פליישר, ע', צור, י' ובר אוריון, י'. 1999. הערך הכלכלי של שטחים פתוחים בישראל. המכון לחקר מדיניות ושימוש קרקע, קק"ל.

צבן, ח', פלר, נ', אמדור, ל', אבנימלך, י' ואילון, א'. 2004. חקלאות בת קיימא – כיצד להביא למימוש ערכים חיצוניים של החקלאות כחלק מהכנסות החקלאי באזורי הארץ השונים. מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

רוזנטל, ג', יהושע, נ', היימן, ב' וקשטן, א'. 2009. אומדן הערך הכלכלי של שטחים פתוחים. מכון דש"א – דמותה של ארץ. רשות החשמל. www.pua.gov.il [נצפה בנובמבר, 2016].

רשות החשמל. 2017. בסיס נתונים לדו"ח מצב משק החשמל לשנת 2016. רשות החשמל. 2017. לוחות תעריפים.

שינדלר, ב', סייפן, מ', לוי, ש', גיונגיבר, ק', קראכמלניי, מ', שלום, ה' ובלאושטיין, ל'. 2016. שילוב גג ירוק ופנלים סולאריים: השפעות על יעילות הפנלים וצמחיית הגג. מרכז קדם לחקר אקולוגיה של גגות ירוקים, אוניברסיטת חיפה. שירות התעסוקה הישראלי. www.taasuka.gov.il [נצפה ביוני, 2017].

Clean Power Research. 2006. *The Value of Distributed Photovoltaics to Austin Energy and the City of Austin*. Austin Energy (USA).

Clean Power Research. 2012. *The Value of Distributed Solar Electric Generation to New Jersey and Pennsylvania*. Mid-Atlantic Solar Energy Industries Association & Pennsylvania Solar Energy Industries Association.

Clean Power Research and Solar San Antonio. 2013. *The Value of Distributed Solar Electric Generation to San Antonio*. U.S. Department of Energy.

Clean Power Research. 2014. *Minnesota Value of Solar: Methodology*. Minnesota Department of Commerce, Division of Energy Resources.

Clean Power Research. 2015. *Valuation of Solar + Storage in Hawaii: Methodology*. Interstate Renewable Energy Council.

Clean Power Research, Sustainable Energy Advantage, Perez, R., and Rábago, K.R. 2015. *Maine Distributed Solar Valuation Study*. Maine Public Utilities Commission.

Cohen, M.A., Kauzmann, P.A., and Callaway, D.S. 2016. Effects of Distributed PV Generation on California's Distribution System, Part 2: Economic Analysis. *Solar Energy* 128: 139–152.

Dominguez, A., Kleissl, J., and Luvall, J.C. 2011. Effects of Solar Photovoltaic Panels on Roof Heat Transfer. *Solar Energy* 85(9): 2244–2255.

Faiman, D., Blumberg, D.G., and Rotenberg, Z. 2011. *Solar Radiation Maps of the Negev*. Ministry of National Infrastructures, Research and Development Division.

International Renewable Energy Agency (IRENA). 2016. *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*.

- International Renewable Energy Agency (IRENA). 2017a. *Renewable Energy Auctions*.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). 2017b. *Renewable Energy and Jobs*.
- Interstate Renewable Energy Council (IREC). 2013. *A Regulator's Guidebook: Calculating the Benefits and Costs of Distributed Solar Generation*.
- Itron. 2010. *CPUC California Solar Initiative 2009 Impact Evaluation*. Southern California Edison and California Public Utilities Commission Energy Division.
- Kapsalis, V.C., Vardoulakis, E., and Karamanis, D. 2014. *Simulation of the Cooling Effect of the Roof Added Photovoltaic Panels*. *Advances in Building Energy Research*. 41-54 :8.
- Lavee, D. and Baniad, G. 2013. Assessing the Value of Non-Marketable Land: The Case of Israel. *Land Use Policy* 34: 276–281.
- Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J.C., Briottet, X., and Lemonsu, A. 2014. Solar Panels Reduce Both Global Warming and Urban Heat Island. *Frontiers in Environmental Science* 2, Article 14.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2014. *Methods for Analyzing the Benefits and Costs of Distributed Photovoltaic Generation to the US Electric Utility System*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. *US Photovoltaic Prices and Cost Breakdowns: Q1 2015 Benchmarks for Residential, Commercial, and Utility-Scale Systems*. NREL Technical Report 6A20-64746. USA.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 2017. *Renewables 2017 Global Status Report*.
- Rocky Mountain Institute (RMI). 2013. *A Review of Solar PV Benefit & Cost Studies*, 2nd edition. Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute.
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustou, A., and Martilli, A. 2016. Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorology* 161: 203–221.
- Shofrony, G. 2016. *Towards a Solar Rooftop Reform: How Israel's Residential Photovoltaics Can Upscale the Economy*. (MBA thesis). Jerusalem: The Hebrew University of Jerusalem.
- Wirth, H. 2017. *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*. Fraunhofer ISE.

מכון ירושלים למחקרי מדיניות
מרכז מילקן לחדשנות
רחוב רד"ק 20 ירושלים 9218604
משרד: 02-5630175 (שלוחה 34)
www.milkeninnovationcenter.org



מכון ירושלים
מרכז מילקן לחדשנות