

# NZO

תוכנית לאומית לאנרגיה מתחדשת

## 95% עד 2050

חשמל ממקורות מתחדשים בישראל  
פרק ב' פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי





Net Zero  
Emissions

**היעד:**

**ייצור 95% מהחשמל בישראל  
ממקורות מתחדשים**

אין זו אנדה

יולי 2021



## על אודות

עבודה זו גובשה על ידי צוות NZO במרכז השל לקיימות. מרכז השל לקיימות מפתח ומיישם את חזון הקיימות: חברה צודקת ומלוכדת, כלכלה חסונה ודמוקרטית, וסביבה יצרנית ובריאה לכל תושביה. המרכז מחבר בין ידע רעיוני לידע מעשי, מפיץ את סיפור הקיימות בדרכים יצירתיות, ומסייע לסוכני שינוי מכל המגזרים לקדם תהליכי שינוי משמעותיים בישראל. אסטרטגית השינוי של מרכז השל נגזרת מגודל האתגר ודחיפותו. מרכז השל מקיים פעילות ענפה ברמה המקומית המדגימה שהחיים משתפרים כשהם מתנהלים באופן מקיים, ופועלת לרישות וחיבור של אנשים מכל הקשת של החברה הישראלית הפועלים להתחדשות ולתיקון, שכן ללא לחץ אזרחי ודרישה מהשטח לא יתרחש שינוי ברמת המדיניות. בתחום משבר האקלים מרכז השל מוביל תהליכים ליצירת השפעה על מקבלי ההחלטות על ידי מחקר ופיתוח של דרכים למעבר צודק לכלכלה דלת פחמן. צוות NZO הוקם ביוזמת מרכז השל וכולל מומחים מתנדבים מתחומים שונים שמגויסים כדי ליצור תוכנית מעבר לאנרגיות מתחדשות התואמת את גודל האתגר של משבר האקלים.

**מחקר, עיבוד הנתונים והיגוי:** צוות פרוייקט NZO  
**כתיבה ועריכה:** היוֹבֵל מחקרים, יניב כרמל וארז רביב  
**עיצוב:** סטודיו "החבורה"

ליצירת קשר ופרטים נוספים - [www.nzo.org.il](http://www.nzo.org.il)



בשעה שברא הקב"ה את אדם הראשון,  
נטלו והחזירו על כל אילני גן עדן ואמר  
לו: ראה מעשי כמה נאים ומשובחין הן  
וכל מה שבראתי בשבילך בראתי; תן  
דעתך שלא תקלקל ותחריב את עולמי,  
שאם קלקלת, אין מי שיתקן אחריך.

קהלת רבה, פרשה ז', א'



# תוכן העניינים

8	תקציר
12	מבוא
12	הפקת חשמל מאנרגיה סולארית
13	כושר הייצור הסולארי בסוף 2020
14	סוגי השטחים להתקנת מערכות PV
15	סוגי החיפויים של מערכות PV
16	הערות אחרונות לפני היציאה לדרך
18	שיטת המחקר
20	פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי
20	מבני מגורים ותעסוקה
22	תכסית במרחב העירוני
24	תכסית במרחב הכפרי
28	שדות סולאריים קרקעיים
30	סיכום
32	סיכום: בדרך למיצוי הפוטנציאל הסולארי בישראל
32	מיצוי השטח הפוטנציאלי להתקנת מערכות בדו-שימוש
33	אגירה
33	רשת ההולכה
35	נספחים
36	נספח א': פירוט פוטנציאל במבני מגורים ותעסוקה
39	נספח ב': פירוט הפוטנציאל בתכסית במרחב העירוני
44	נספח ג': פירוט פוטנציאל בתכסית במרחב הכפרי
48	נספח ד': פירוט הפוטנציאל בשדות סולאריים קרקעיים
49	נספח ה': הערכת השיפור העתידי בנצילות מערכות ה-PV
51	נספח ו': השוואה לעבודות נוספות שבוצעו בנושא
54	נספח ז': תרחישים נוספים להתקנת מערכות סולאריות



## תקציר

אזרחי ישראל, כמו שאר אזרחי העולם, נמצאים עתה בצומת דרכים היסטורי בתולדות האנושות. האופן שבו יפעלו ממשלות העולם בעשור הקרוב בנושא משבר האקלים יקבע איך יראו חיי הדורות הבאים. בידי הממשלות והתעשייה להאט את שינויי האקלים הקיצוניים, אשר ניתן כבר לראות את נזקיהם. מדינת ישראל צפויה לסבול מהשלכות משבר האקלים באופן חריף, בשל מיקומה הגיאוגרפי ואקלימה היבש. אין בכוחה של ישראל לבדה למנוע את שינויי האקלים, זה ודאי. אך תכנית NZO מבוססת על האמונה שעל ישראל לאפס את פליטות גזי החממה שלה, ובד בבד לפעול ליצירתה של כלכלה וחברה מקיימת. כך נוכל לעשות את המיטב כדי לשמור על ישראל מפני נזקי האקלים, ואולי אף ליצור כלים ומודלים שימשו את ההתמודדות הבין-לאומית והכלכל אנושית עם משבר האקלים.

### ישראל, כמו שאר העולם, נמצאת בצומת דרכים היסטורי. בידי הממשלות והתעשייה להאט את שינויי האקלים הקיצוניים. תכנית NZO שואפת לאפס את פליטות גזי החממה בישראל

בישראל ישנו פוטנציאל משמעותי לייצור חשמל סולארי, כלומר: חשמל המופק מאנרגיה שמקורה בשמש; עובדה זו ידועה לכל אדם שמכיר או חווה את האקלים הישראלי. אך האם די באנרגיה הסולארית על מנת לספק את צריכת החשמל בישראל בעשורים הקרובים?

על שאלה זו נבקש לענות כאן. לשם מענה מקצועי ומבוסס עלינו לשים יעד מספרי ברור ל"כמות" הנדרשת של חשמל, ולהגדיר את טווח הזמן אותו אנו בודקים. בהתבסס על עבודה קודמת של צוות NZO שהתפרסמה לאחרונה<sup>1</sup>, ננסח את השאלה כך:

**האם ניתן יהיה, עד שנת 2050, להתקין בישראל מערכות PV בהספק של 115 GW?<sup>2</sup> ולא פחות חשוב – האם ניתן לעשות זאת מבלי לפגוע בשטחים הפתוחים ובריאות הירוקות של ישראל?**

מדוע דווקא 115 GW? כפי שהראינו בעבודה המוזכרת לעיל, אם תשכיל ישראל לפתח כושר ייצור חשמל סולארי בהיקף שכזה, וכן יכולת אגירת חשמל /או אנרגיה בהיקף

1 היעד: 95% מהחשמל בישראל ממקורות מתחדשים, צוות NZO 2050, ישראל: מרכז השל לקיימות, ינואר 2021. להלן בחוברת זו: תכנית 2021, NZO.

2 מערכות PV הן מערכות פוטו-וולטאיות, בעיקר פאנלים סולאריים. ראו הרחבה בפרק המבוא.

משמעותי לצדו, הרי שב-2050 ניתן יהיה לספק כ-95% מהביקוש לחשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות.

אספקת 95% מהחשמל מאנרגיות מתחדשות היא בעלת תועלות אדירות, כמעט מכל בחינה שניתן להעלות על הדעת: מבחינה אקלימית זהו יעד חיוני למאבק בהתחממות הגלובלית; מבחינה סביבתית התוצאה תהיה הפחתה עצומה בזיהום האוויר הקטלני בישראל, אשר מביא לתמותה מוקדמת של כ-2,000 איש ואישה בשנה, על פי ההערכות; מבחינה כלכלית היא עשויה להביא לחיסכון כולל (עד לשנת 2050) למשק בסך של עשרות מיליארדי שקלים; ומבחינה מדינית היא עשויה להביא לעצמאות אנרגטית וביטחון אנרגטי, תוך שיפור מצבה הגיאופוליטי של ישראל במזרח התיכון.

כאמור, כל ההשלכות החיוביות הללו תלויות ביכולת להתקין מערכות PV בהיקף הנדרש, תוך שילוב עם מערכות אגירת אנרגיה. על כן עבודה זו מטרתה לבחון את השאלה האם מדובר ביעד בר-השגה? וכן, האם ניתן להשיג את היעד מבלי לפגוע ביעדים חברתיים וסביבתיים חשובים, ובראש ובראשונה שמירה על השטחים הפתוחים והרגישים? נקדים את המאוחר ונציין את השורה התחתונה: התשובה היא כן, ישנה אפשרות ריאלית, ניתנת למימוש, להתקנה של למעלה מ-115 GW אנרגיה סולארית בישראל. אולם את התשובה הזו יש לתפוס לא רק כעובדה, שנבדקה על ידינו מחקרית. זו קריאה לפעולה משותפת, מאומצת ועקבית של מקבלי ומקבלות ההחלטות בכל מגזרי החברה.

## רק מיצוי הפוטנציאל הסולארי יאפשר קיום חברה וכלכלה מתקדמות, עם אפס פליטות מזיקות לסביבה ולאדם

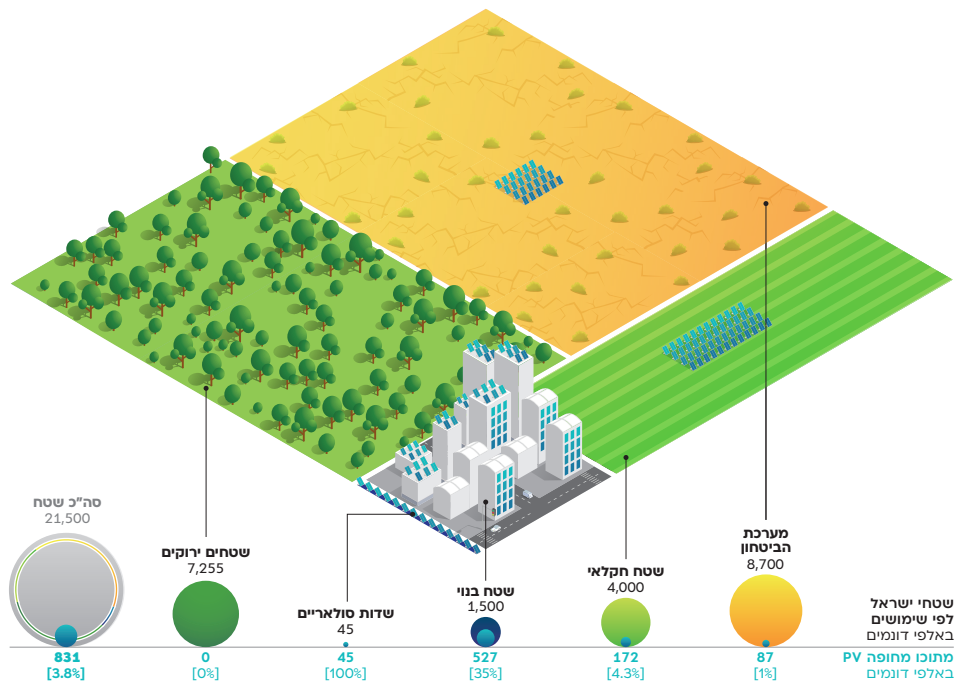
עד כה לא השכילה ישראל להתייחס באופן מערכתי וכולל לפוטנציאל הסולארי הטמון בה לצורך ייצור חשמל. פריצות דרך טכנולוגיות של שני העשורים האחרונים, המשפרות את יעילות מערכות ה-PV ומאפשרות אגירה של אנרגיה וחשמל, הופכות שגיאה זו לקשה עוד יותר. נכון להיום, הממשלה הציבה יעד נמוך וקצר טווח לחלקן של אנרגיות מתחדשות בחשמל שצפוי להיצרך ב-2030: 30% בלבד, זאת בעוד הפוטנציאל רב בהרבה.

**על מנהיגים ומנהיגות בכל שדרות החברה, בממשלה, במערכת הבטחון, במגזר העסקי ובארגונים חברתיים, לשלב ידיים ולפעול. רק פעולה משותפת תאפשר את מיצוי הפוטנציאל הסולארי הטמון בשטח מדינת ישראל – ורק מיצוי הפוטנציאל הסולארי יאפשר קיום חברה וכלכלה מתקדמות עם אפס פליטות מזיקות לסביבה ולאדם.**

### ריכוז פוטנציאל ייצור חשמל סולארי

בעת כתיבת שורות אלו, בתחילת שנת 2021, ישנה אפשרות ריאלית להתקין בישראל מערכות PV בהספק של כ-21.8 GW. הספק מותקן שכזה יאפשר ייצור של כ-37.1 TWh, שהם כ-50% מהביקוש הקיים לחשמל. ב-2030 ניתן יהיה לייצר כ-61% מהביקוש באמצעות אנרגיית השמש. ועד 2050 ניתן יהיה לספק כ-95% מהביקוש לחשמל במהלך השנה.

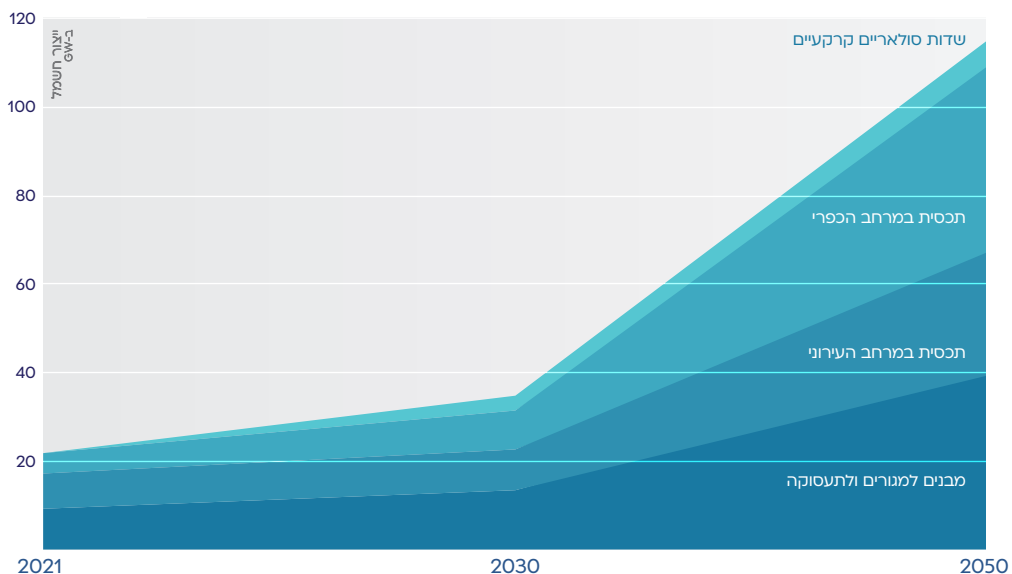
**תרשים 1: שטח ישראל לפי שימושים וייצור סולארי בשנת 2050, עפ"י תכנית NZO**



טבלה 1: ריכוז פוטנציאל ייצור סולארי, שנים נבחרות, ב-GW

2050	2030	2021	סוג שטח / שנים
42,576	13,174	9,068	מבנים למגורים ותעסוקה
24,591	9,276	7,924	תכסית במרחב העירוני
41,937	9,052	4,859	תכסית במרחב הכפרי
5,897	3,071	0	שדות סולאריים קרקעיים
<b>115,000</b>	<b>34,573</b>	<b>21,851</b>	<b>סה"כ</b>
195.5	58.8	37.1	ייצור שנתי ב-TWh
95%	60%	50%	אחוז מהביקוש השנתי לחשמל

תרשים 2: ריכוז הפוטנציאל הסולארי בחלוקה לסוגי שטחים עיקריים



## מבוא

### הפקת חשמל מאנרגיה סולארית

ישנן שתי טכנולוגיות מסחריות להפקת חשמל מאנרגיה סולארית: מערכות פוטו-וולטאיות (להלן: "מערכות PV") ומערכות תרמו-סולאריות.

מערכות PV, מבוססות על תאים פוטו-וולטאיים שהופכים את קרינת השמש לחשמל. הצורה המקובלת להפקת חשמל בשיטה זו היא על ידי הנחת תאים פוטו-וולטאיים על משטחים (פאנלים סולאריים) והתקנתם ברצף בתא שטח נתון. החשמל שניתן להפיק ממערכת PV תלוי בהספק של המערכת ובקרינת השמש, הנמדדת ב"שעות שמש אפקטיביות", על המערכת. בישראל ישנן כ-1,700 שעות שמש אפקטיביות בשנה.<sup>3</sup>

ישנה עלייה מתמשכת ועקבית בהספק של מערכות PV. שיפורים אלו הביאו לכך שבשנת 2020 נדרש שטח של 8 דונם להתקנת הספק של 1 מגה וואט.<sup>4</sup> בעבודה זו הנחנו שיפור מתמשך ועקבי, לינארי, ביעילות מערכות ה-PV. השיפור הצפוי בנצילות הינו כ-1.6% בשנה עד לשנת 2040.<sup>5</sup> לצורך עבודה זו הערכנו כי בין 2041 ל-2050 ימותן השיפור לקצב של 1% בשנה. בקצב הזה ב-2030 יהיה די בפריסת מערכות PV על 7.14 דונמים לייצור 1 MW, וב-5.41 דונמים ל-1 MW ב-2050.<sup>6</sup>

הטכניקה השנייה להפיק חשמל מאנרגיה סולארית נקראת תרמו-סולארית, והיא מבוססת על הפקת חום מהשמש ושימוש בחום לשם ייצור חשמל, לדוגמה באמצעות קיטור. הטכניקה הזו נחשבת בזבזנית בשטח ובעלת יעילות פחותה לעומת מערכות PV. בישראל נעשה בה שימוש במתחם "אשלים", שיש לו הספק מותקן השווה ערך לכ-388 MW מותקן של PV.

בעבודה זו הונח כי כל המערכות החדשות להפקת אנרגיה סולארית תהינה מערכות PV, בשל יתרונותיהן על פני מערכות תרמו-סולאריות.

3 מספר שעות השמש האפקטיביות בישראל נע בין 1,600 ל-1,800 שעות בשנה. המספר משתנה לפי האזור הגאוגרפי ותנאים נוספים. לצורך עבודה זו התבססנו על ממוצע של 1,700 שעות שמש אפקטיביות בשנה. זוהי הערכה שמרנית, כיוון שבעבודות מקבילות ודומות של רשות החשמל והמשרד להגנת הסביבה מסתמכים על ממוצע של 1,750 שעות שמש אפקטיביות בשנה.

4 הרחבה בנושא נצילות מערכות PV בנספח ה'.

5 על פי הערכת חברת בלומברג - Bloomberg Energy Outlook 2019, כפי שפורסם בניתוח של רשות החשמל באוקטובר 2020, במסגרת בחינת האפשרות להגדלת היעד ל-30% אנרגיות מתחדשות, קובץ נלווה - פוטנציאל שטחים - [https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030\\_final](https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030_final)

6 להרחבה ראו נספח ה'.

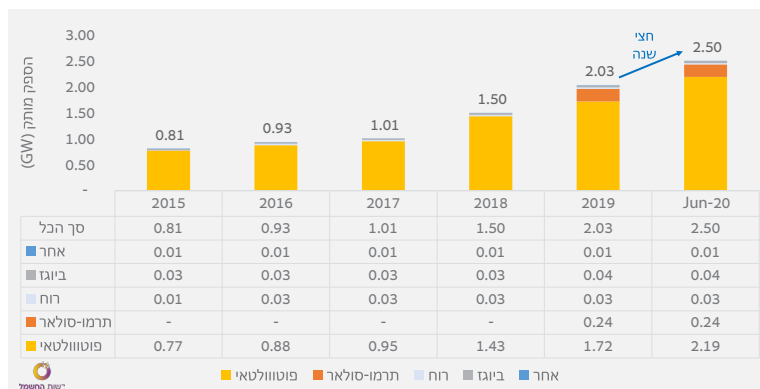
### כושר הייצור הסולארי בסוף 2020

על פי רשות החשמל, ביוני 2020 היו בישראל מערכות PV בהספק מותקן של כ-2.2 GW, וכן כ-0.24 GW הספק מותקן של אנרגיה תרמו-סולארית<sup>78</sup>. יחד עם אנרגיית הרוח (0.03 GW), הביוגז (0.04 GW) ו"אחר" (0.01 GW), היו בישראל ביוני 2020 כ-2.5 GW הספק מותקן של אנרגיות מתחדשות.

יצוין כי בשנים 2017-2020 חל גידול משמעותי בייצור חשמל מאנרגיה סולארית, מ-0.95 GW ל-2.19 GW באמצע 2020. על פי הערכת רשות החשמל, עד סוף 2020 יושג היעד שנקבע לשנה זו, של תוספת של למעלה מ-1.6 GW הספק מותקן מבוסס אנרגיות מתחדשות ביחס ל-2019<sup>79</sup>.

מרבית התוספת ב-2020 מקורה במערכות PV. רשות החשמל העריכה כי עד סוף 2020 יהיו בישראל מערכות PV בהספק מותקן של כ-3.3 GW וכי יחד עם החשמל התרמו-סולארי יעמוד כושר הייצור הסולארי של ישראל בסוף השנה על כ-3.55 GW, וההספק המותקן המבוסס על אנרגיות מתחדשות יעמוד על כ-3.7 GW. בפועל כנראה שיעדים אלו לא מומשו, ובסוף שנת 2020 עמד ההספק המותקן של מערכות PV על כ-2.5 GW, והאנרגיה הסולארית סיפקה כ-6% מהחשמל בישראל בשנת 2020. משרד האנרגיה צופה שבמהלך 2021 יעלה ההספק הסולארי המותקן, ושיעור החשמל המיוצר באנרגיות מתחדשות יעלה על 10% מהביקוש השנתי.

### תרשים 4: התפתחות התקנת אנרגיות מתחדשות בישראל



7 כפי שהוסבר מעלה 0.24 GW הספק מותקן תרמו-סולארי שקולים ל-0.388 GW הספק מותקן PV.  
 8 אנרגיות מתחדשות בישראל – שוק בתנופה (מצגת), רשות החשמל, ישראל: רשות החשמל, 2020.  
 9 אנרגיה מתחדשת בישראל – רקע וסוגיות לדיון, מתן שחק, מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 19 באוקטובר 2020.

## סוגי השטחים להתקנת מערכות PV

כאמור מעלה, הגידול בכושר ייצור החשמל הסולארי בישראל צפוי לנבוע מהתקנת מערכות PV. מערכות PV "צורכות" שטח – כלומר, לשם הפקת החשמל יש צורך לפרוש מערכות PV על פני תא-שטח. יש לקחת בחשבון את המאפיינים של תאי שטח שונים, אשר מקנים להם יכולת ייצור סולארית שונה. גגות של מבני מגורים הם סוג מסוים של תא-שטח פוטנציאלי, בעוד שדות סולאריים הפרוסים במרחב הפתוח הם סוג שונה בתכלית.

בעבודה זו הוגדרו ארבעה סוגי שטחים בהם ניתן להתקין מערכות PV. כל סוג כולל בתוכו מספר סיווגי משנה. לכל סיווג משנה ניתן להגדיר מקדמים במספר פרמטרים אשר יאפשרו את הערכת הפוטנציאל העתידי (ראו בפרק שיטת המחקר). העיקרון המנחה בהתייחסות לשטחים הוא דו-שימוש. כלומר, אין צורך להשתמש בשטחים פתוחים לטובת התקנת מערכות PV; במקום זאת ניתן להוסיף מערכות PV בתאי שטח מבונוים על גגות המבנים ועל החזיתות, ובשטחים נוספים אשר נעשה בהם שימוש, כגון מעל חניונים, סככות, כבישים, שטחים חקלאיים ומאגרי מים. לצד עיקרון ה-"דו-שימוש", עבודה זו מתייחסת גם לשטחים שהוקצו זה מכבר בתוכניות המתאר הארציות (תמ"א 41 ותמ"א 10/ד/10) לשדות סולאריים קרקעיים. תכנית NZO מבוססת אך ורק על שטחים בהם ניתן לעשות דו-שימוש יחד עם השטחים אשר כבר הוקצו לשדות סולאריים, ואינה מבוססת על שימוש בשטחים פתוחים נוספים. כפי שנראה, ניתן להגיע לייצור כ-95% מהחשמל הנצרך בישראל על ידי אנרגיה סולארית, מבלי לפגוע בשטחים הפתוחים.

השטחים הפוטנציאליים להתקנת מערכות PV סווגו בעבודה זו כך:

1. מבנים למגורים ולתעסוקה
2. תכסית במרחב העירוני
3. תכסית במרחב הכפרי
4. שדות סולאריים

המונח תכסית מתייחס לעצמים מעשה ידי-אדם המכסים את השטח הטבעי. מיצוי הפוטנציאל הסולארי, מבלי לפגוע בשטחים פתוחים, טמון בניצול היעיל של התכסית – כלומר מבנים ועצמים שהוצבו זה מכבר, או מתוכננים על פני השטח, אשר יעשה בהם שימוש דואלי: ליעודם המקורי ולהפקת חשמל סולארי, במקביל.

## להלן פירוט סיווגי המשנה של שטחים אלו:

## מבנים למגורים ותעסוקה

מבני ציבור  
גגות וחזיתותמבני תעסוקה  
גגות וחזיתותמבני מגורים  
גגות וחזיתות

## תכסית במרחב העירוני

שדות  
תעופהבתי  
קברותמתחמי פנאי  
ותעסוקהחניות וכבישים  
עירונייםאזורי  
תעשייה

## תכסית במרחב הכפרי

בסיסי  
צבאכבישים בין  
עירונייםתשתיות מים  
וחקלאותמאגרי  
מיםאגרי-  
וולטאי

## שטחים שהוקצו לפי תמ"א (שדות סולאריים)

תמ"א  
10/ד/10תמ"א  
41

## סוגי החיפויים של מערכות PV

רציפות החיפוי של השטח באמצעות מערכות PV משתנה בהתאם לשימוש העיקרי של השטח. על גגות בניינים גדולים ניתן להניח מערכות PV באופן רציף למדי. לכן בגגות, מוערך השטח הנדרש להתקנת 1 MW ב-8 דונם (עם שיפור בנצילות של כ-1.6% בשנה עד 2040, ו-1% בשנה מ-2041 ועד 2050, כפי שצוין מעלה). עבור חוות סולאריות הנחנן שיידרש שטח הגדול מהתקנות על גגות של 10%, כלומר 8.8 דונם להתקנת 1 MW, בשל השטח הנדרש להתקנת מערכות לחיבור האתר לרשת החשמל ועבור מערכות אגירה. התקנות על סככות אינן דורשות השארת מרווחים בין הפאנלים הסולאריים, ויתכן שנצילות השטח בהתקנות אלו אף עולה על גגות. במודל הנחנן שידרשו 8 דונם ל-1MW, כמו בגגות.



התקנות מעל שטחים חקלאיים מחייבות מרווחים על מנת לאפשר את המשך השימוש החקלאי, הנחנו שבהתקנות אלו יידרש שטח הגדול מהתקנות על גגות ב-35%, כלומר ידרשו 10.8 דונם להתקנת 1MW הספק. התקנות מעל כבישים הינו תחום שאין עדיין מידע מספיק להערכות אופן ההתקנה בו. מטעמי זהירות הנחנו שבכבישים יידרש שטח של 20% מעל הנדרש בהתקנות על גגות, כלומר 9.6 דונם להתקנה של 1MW. חיפוי על חזיתות מבנים יעיל פחות מסככות וגגות, בשל הזווית בה מוצבות מערכות ה-PV אל מול השמש. חיסרון זה מתקזז מעט בשעות השקיעה והזריחה, במפנה המערבי והמזרחי (בהתאמה) של הבניין. הערכת הפוטנציאל התבססה על ההנחה כי 20 דונם של חזיתות מבנים (אשר לא יכללו את המפנה הצפוני של המבנים) המחופים במערכות PV יפיקו 1 MW (עם שיפור בנצילות באותו שיעור שהוזכר).

## הערות אחרונות לפני היציאה לדרך

### הגדרת המושג "פוטנציאל" ו"פוטנציאל מקסימלי"

לצורך הערכת פוטנציאל השימוש בשטחים השונים לטובת ייצור סולארי נקטנו בגישה של הערכה ריאלית. כלומר, מדובר בסך הפוטנציאל שסביר כי ניתן יהיה לממש – אם ישראל תשכיל להתמודד עם האתגרים הכרוכים במימוש פוטנציאל זה. חשוב, עם זאת, להבהיר כי הערכה בגישה מקסימליסטית תראה כי הפוטנציאל רב עוד יותר מזה שמצוין על ידינו כאן.

כך לדוגמה, בעבודה למיפוי פוטנציאל הייצור הסולארי בשטח העירוני, אשר בוצעה על ידי המשרד להגנת הסביבה (להלן: מסמך הגנ"ס 2020)<sup>10</sup>, הוגדרו שני תרחישים להערכת הפוטנציאל הסולארי בשנת 2050: תרחיש מינימום ותרחיש מקסימום. התסריט הריאלי של תוכנית NZO מבוסס על הערך הממוצע בין המינימום למקסימום בסוגי השטח השונים, בהתבסס על מסמך הגנ"ס 2020.

התרחיש המקסימלי להתקנות בדו-שימוש מראה שקיים פוטנציאל להגיע להספק מותקן של 188GW סולארי וייצור של 319 TWh לשנה בשנת 2050, המהווים קרוב ל-200% מהביקוש הצפוי באותה שנה. תרחיש זה מתבסס אף הוא על התקנות מערכות סולאריות במודלים שונים של דו-שימוש, תוך שימוש מועט בהתקנות קרקעיות בשטחים פתוחים. פירוט של הפוטנציאל המקסימלי נמצא בנספח ז'.

10 "הערכת פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב הבנוי בישראל", ינואר 2020, המשרד להגנת הסביבה. כתיבה: ד"ר גיל פרואקטור, יערי גינות [המשרד להגנת הסביבה]; עומר תמיר, רון קמרה, אברי שכתר [חברת אקווריידרס בע"מ]; ד"ר שחר דולב [הפורום הישראלי לאנרגיה]; ד"ר בועז קידר. בחוברת זו להלן: מסמך הגנ"ס, 2020.

### שטחי הרשות הפלסטינית

בעבודה זו לא ניתנה התייחסות לפוטנציאל הייצור הסולארי הקיים בשטחי הרשות הפלסטינית. בכל הנוגע לביקוש העתידי לחשמל צרכי הרשות הפלסטינית מבוטאים בחישובים המשמשים כאן, כלקוחות של משק החשמל הישראלי. ניתן להעלות על הדעת, אם כן, כי לכשיתחיל מיצוי הפוטנציאל הסולארי הרב הקיים בשטחי הרשות הפלסטינית יהיו לכך, לצד השלכות חיוביות על משק החשמל הפלסטיני, השלכות חיוביות גם על משק החשמל הישראלי.

### הערכות ואומדנים

המעבר לאנרגיות מתחדשות עשוי להתרחש בתרחישים שונים של התקנות. המחקר מציג התפלגות אופציונלית של שימוש בשטחים המבוססת על שימוש נרחב בשטחים בדו-שימוש תוך התקנות בשטחים פתוחים על בסיס תוכניות המתאר הקיימות (תמ"א 41 ותמ"א 10/ד/10). עבודה זו בוצעה על בסיס הידע הנמצא ברשותנו והערכות שבוצעו בהסתמך עליו. מובן כי ייתכנו שינויים רבים ותרחישים נוספים.

## שיטת המחקר

### שאלת המחקר

מהו הפוטנציאל לייצור חשמל סולארי בישראל באמצעות מערכות PV, עבור כל שנה מ-2021 ועד 2050?

לשם מענה על שאלה זו יש לענות על השאלות הבאות, עבור כל אחד מסוגי השטחים וסיווגי המשנה שהוזכרו לעיל:

1. גודל השטח – מהו היקף השטח הקיים ומה צפי הגידול של השטח עד 2050?
2. ניצול השטח – מהו השיעור של השטח אותו ניתן לנצל לטובת התקנת מערכות PV?
3. מה צפויה להיות הנצילות של מערכות ה-PV בשנים לבוא?

### צורת העבודה

#### איסוף נתוני השטח

הערכת פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי בשטחים העירוניים – מבני מגורים ותעסוקה וכן תכסית נוספת במרחב העירוני – בוססה על מסד הנתונים המקיף שנאסף במסגרת עבודה שפורסמה על ידי המשרד להגנת הסביבה בינואר 2020, בשם "הערכת פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב הבנוי בישראל" (לעיל ולהלן: מסמך הגנ"ס 2020). במסגרת אותה עבודה, נתוני השטחים העירוניים ושטחים מבונים נוספים נאספו על ידי מרכז המידע הגיאוגרפי במשרד להגנת הסביבה באמצעות מערכת GIS ושכבות בסיס הנתונים הטופוגרפי הלאומי (בנט"ל) של המרכז למיפוי ישראל (מפ"י, גרסה 3/2019).

במסמך הגנ"ס 2020 בוצעה הבחנה בין שטחי הגנות והחזיתות של מבנים, לבין שטחי מתחמים – שטחים בנויים בעלי אפיון מיוחד של בנייה אותו ניתן לשייך לשימוש מבנים ומוסדות (לדוגמה, רחבה השייכת לתחום המסחר).

שטח גגות המבנים ושטחים מבונים נוספים התקבלו ישירות משכבות הבנט"ל של מפ"י. בחלק מהמקרים נותח השטח על בסיס שטח הפוליון המופיע בשכבת המידע. שטח חזיתות המבנים הוערך באמצעות הכפלת גובה המבנים בהיקף הפוליוגונים. ביחס לתכסית במרחב הכפרי ולשטחי השדות הסולאריים, עבודה זו מבוססת על נתוני רשות מקרקעי ישראל ועל נתוני תמ"א 41, תכנית מתאר ארצית כוללת למשק האנרגיה.

הערכת גידול השטח 2021-2050

עבור כל תת-סוג שטח שנותח, הונח כי השטח יגדל בין 2021 ל-2050, בהתאם לגידול בגורם המפתח הרלוונטי אליו. שיעור הגידול עבור כל תת-סוג שטח חושב בהתאם לתחזיות "תרחיש עסקים כרגיל ל-2050" אשר גובשו במסגרת תהליך "ישראל 2050: כלכלה משגשגת בסביבה מקיימת", אותו מובילים המשרד להגנת הסביבה והמכון הישראלי לדמוקרטיה. מקדמי הגידול המיוחסים לכל סוג ותת-סוג שטח מפורטים בנספחים א' עד ד'.

הערכת שיעור השטח הניתן לניצול לצורך התקנת מערכות PV, 2050-2021

גם לצורך הערכת שיעור השטח הניתן לניצול לצורך מערכות PV בשטחים מבוזרים, עבודה זו מבוססת על נתוני מסמך הגנ"ס 2020, תוך הצלבתם עם מקורות מידע נוספים כגון שיחות עם חברות מסחריות בתחום ומחקרים של מכוני מחקר מהעולם. חשוב לציין כי צפויים שיפורים ניכרים בנושא זה במהלך השנים הקרובות, באופן שיאפשר ניצול שיעור גבוה יותר של השטחים בהם יותקנו מערכות PV. זאת בהתאם להתפתחויות טכנולוגיות ושנויים רגולטוריים.

הערכת יחס הנצילות העתידי של מערכות ה-PV

נתוני השטח ויכולת ניצולו שתוארו מעלה עובדו במסגרת עבודה זו לצורך הערכת פוטנציאל הייצור הסולארי על בסיס הערכת יחס הנצילות העתידי של מערכות ה-PV. בהערכה זהירה עבודה זו מניחה שיפור שנתי של 1.6% בנצילות המערכות הסולאריות עד 2030 (כ-7.14 דונם לייצור 1 MW), אשר ימשך עד לשנת 2040 ושיפור שנתי של 1% משנת 2041 ועד ל-2050 (עד רמה של כ-5.41 דונם לייצור 1 MW). להרחבה בנושא זה ראו נספח ה'.

ביצוע החישוב

שלושת המשתנים (השטח, אחוז השטח הזמין לשימוש, נצילות הפנלים הסולאריים) נפרשו באקסל בהתפתחות שנתית, וכך חושבה לכל שנה תוספת הפוטנציאל לייצור חשמל סולארי (תוספת השטח, כפול האחוז של השטח שבאותה שנה ניתן יהיה לנצל ל-PV, חלקי יחס הנצילות באותה שנה). הנתונים המוצגים מטה הם הפוטנציאל הראשוני ב-2020, הפוטנציאל הכולל ב-2030 והפוטנציאל הכולל ב-2050.

## פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי

### מבני מגורים ותעסוקה

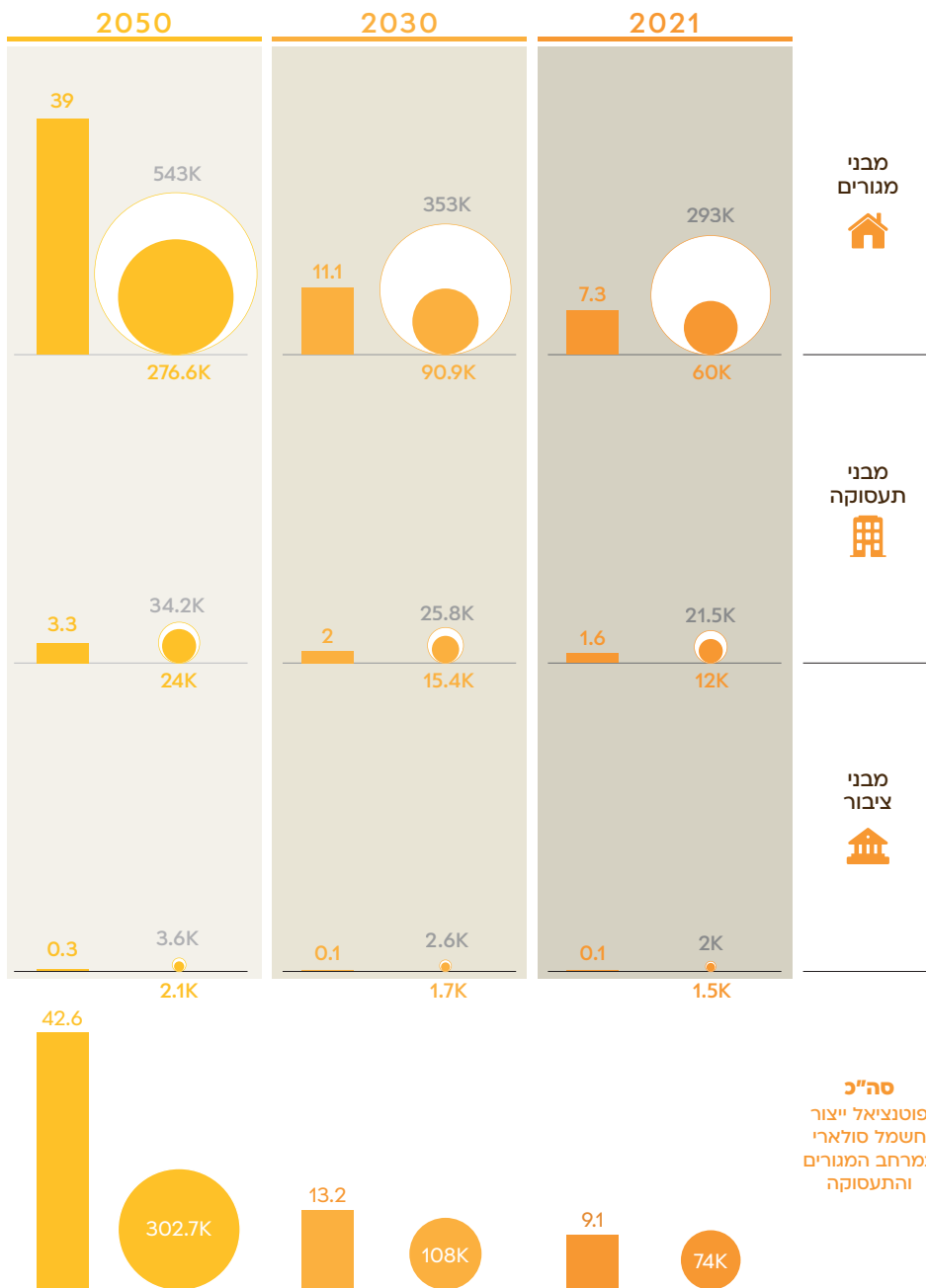
המבנים המשמשים למגורים ותעסוקה הם שטח פוטנציאלי עצום לייצור חשמל סולארי. האפשרות להתקין מערכות PV על הגגות מוכרת ומקובלת זה מכבר, ובכל זאת אינה ממומשת במלואה בישראל. יתרה מכך, הפוטנציאל הלא מבוטל הקיים כיום מתגמד לעומת הפוטנציאל העתידי.

יש לקחת בחשבון כי כיום ניתן להתקין מערכות PV רק על כ-21%, בממוצע, משטח גגות מבני המגורים. עד לשנת 2030 צפוי שיעור השטח המתאים לייצור סולארי במבנים חדשים לצמוח לכ-50%. גידול זה צפוי בעקבות שנויים בתקני הבניה אשר יאפשרו ואף יחייבו התקנת מערכות PV וייצור אנרגיה במבנים חדשים. יחד עם העלייה ביעילות מערכות ה-PV ותוספת שטח הגגות בבנייה חדשה, ניתן יהיה לייצר חשמל סולארי רב יותר.

כך גם לגבי הפוטנציאל הטמון בחזיתות המבנים. התקנת מערכות PV על חזיתות המבנים אינה שכיחה כיום, אך צפויה עליה במספר ההתקנות עם התגברות השימוש בטכנולוגיות BIPV (Building Integrated PV), כלומר הטמעת מערכות ה-PV בבנייה עצמה. יעילותן של מערכות PV המותקנות בחזיתות מבנים היא כ-40% מיעילותן של מערכות המותקנות על הגג, בגלל הזווית של קרינת השמש. אך בהתחשב בשטח הגדול של חזיתות מבנים בישראל, מדובר בפוטנציאל ייצור חשמל סולארי רב.

על פי הערכותינו, ישנם כיום 13,000 דונמים של חזיתות מבנים עליהן ניתן להתקין מערכות PV. זאת בניכוי "המפנה הצפוני", לשם השמש לא מגיעה, ובניכוי עשרת המטרים הראשונים של המבנה שאינם יעילים לייצור סולארי בדרך כלל בשל הצללה. שטח חזיתות המבנים שניתן לנצל צפוי לגדול לכ-68,000 דונמים עד שנת 2050, ולאפשר התקנה של קרוב ל-8 GW חשמל סולארי, פי 3 מההספק הסולארי שהיה מותקן בכל שטח ישראל ב-2020.

לסקירה מפורטת של פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי במבני מגורים ותעסוקה ואופן החישוב, ראו נספח א'.



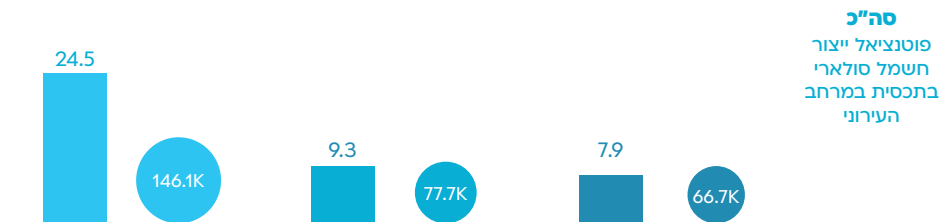
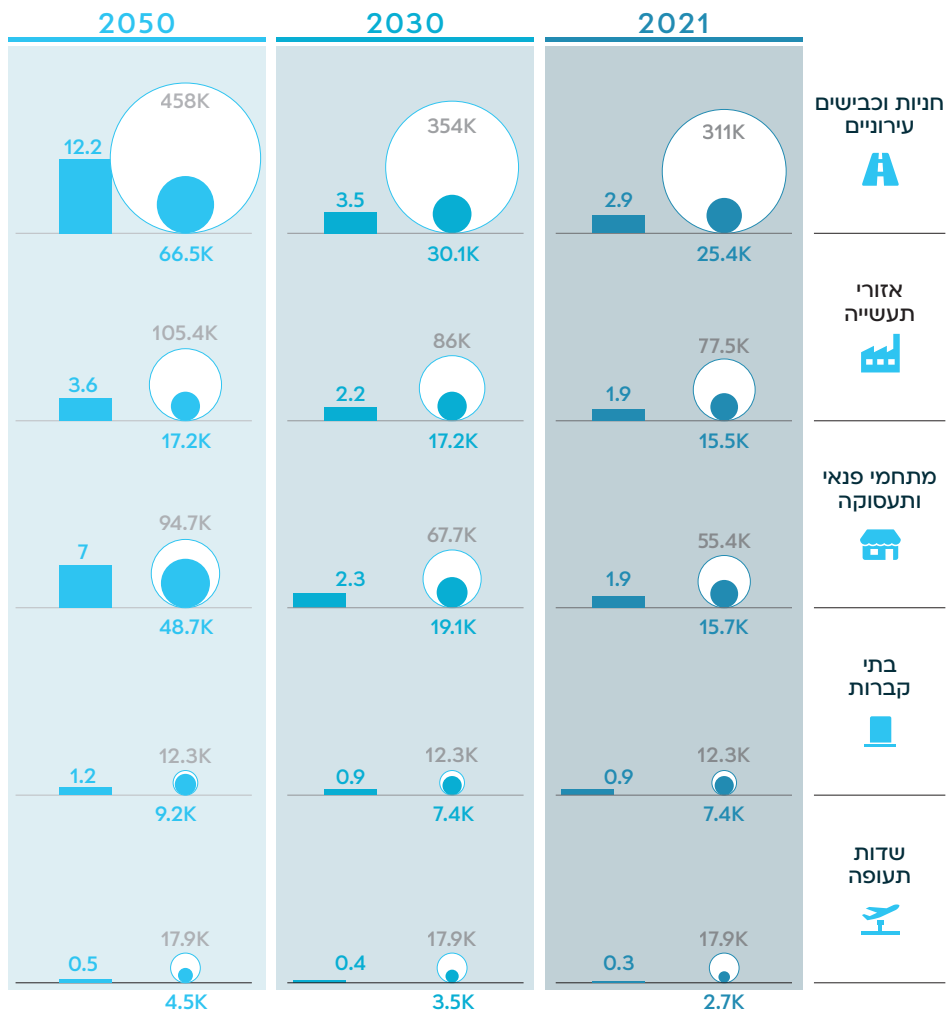
מקרא: ● שטח זמין להפקת חשמל בדונמים ○ סך השטח בדונמים ■ פוטנציאל ייצור החשמל מהשטח ב-GW

## תכסית במרחב העירוני

המרחב העירוני מאופיין בתכסית צפופה. יש לראות תכסית זו כפוטנציאל לשימוש כפול, דו-תכליתי: התכלית המקורית, ושטח להצבת מערכות PV. שימוש כפול שכזה ידרוש פתרונות מותאמים לכל סוג שטח, וברוב המקרים שיעור השטח הזמין לשימוש יהיה קטן מהשיעור האופייני לגג של מבנה מגורים. זאת כדי לא לפגוע בתכלית המקורית של השטח. אך ככל שהתפיסה כי ניתן וצריך לעשות שימוש דו-תכליתי בשטחים אלו תתקבל, כך ניתן יהיה לנצל שטחים עצומים לטובת ייצור סולארי. כך לדוגמה, שטח הכבישים העירוניים בישראל, בפתח שנת 2021, עומד על קרוב ל-290,000 דונמים. על פי הערכות של גורמים מקצועיים ניתן לעשות שימוש בכ-5% משטח כביש עירוני לטובת ייצור סולארי, מבלי לפגוע בתכונותיו ככביש. בעתיד שטח הכבישים צפוי לגדול, וההערכות המקובלות הן כי ניתן יהיה להגיע לניצול של כ-18% משטח הכביש. כך יעמוד ב-2050 פוטנציאל הייצור הסולארי בכבישים עירוניים על 9GW. פתרונות מסוג זה ניתן וצריך ליישם גם בחניות וחניונים, באזורי תעשייה, במתחמי מסחר, תיירות, רפואה, במתחמי פנאי כגון פארקים ומגרשי ספורט, וכן, להבדיל, בבתי קברות. לסקירה מפורטת של פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי בתכסית המרחב העירוני ואופן החישוב, ראו נספח ב'.



מערכות PV על גג מבנה באזור תעשייה עירוני



מקרא: ● שטח זמין להפקת חשמל בדונמים ○ סך השטח בדונמים ■ פוטנציאל ייצור החשמל מהשטח ב-GW



## תכסית במרחב הכפרי

משמעותית אף יותר מהתכסית במרחב העירוני היא התכסית במרחב הכפרי. האתגר בשימוש דו-תכליתי בתכסית במרחב הכפרי הוא כפול ומכופל: בנוסף לצורך למצוא פתרונות לייצור סולארי מבלי לפגוע בתכלית המקורית, יש להימנע באדיקות מפגיעה נופית ומפגיעה בערכי טבע נוספים.



מערכות PV בחיפוי על גבי גידולים חקלאיים

עם זאת, חשוב לעמוד על הפוטנציאל העצום הטמון בשטחים החקלאיים, אשר בישראל משתרעים על פני כ-4,350,000 דונמים<sup>12</sup>. בשנים האחרונות התפתח בעולם תחום **ייצור החשמל האגרי-וולטאי**, כלומר: מערכות PV המותקנות מעל לגידולים חקלאיים. הסימנים מעידים כי מדובר בטכנולוגיה עם פוטנציאל רב, שמאפשרת שימור הגידולים החקלאיים, ושימוש דואלי בשטחים נרחבים. ישנן עדויות כי כאשר מערכות אלו מותקנות, בריווח הנכון והמתאים, ישנם גידולים שלא רק שאינם ניזוקים מכך אלא אף משגשגים תחת צילה של מערכת ה-PV. מחקרים מראים כי להתקנת מערכות PV מעל לגידולים חקלאיים עשויה להיות השפעה חיובית לכל אורך שרשרת ייצור המזון, המים והאנרגיה<sup>13</sup>. הסיבה לכך היא, ככל הנראה, כי תחת צילן של מערכות ה-PV הגידולים נהנים מתנאים מיטביים. מחקרים שונים שנעשו מראים כי ישנו אידוי מופחת של מים תחת מערכות ה-PV וכי הטמפרטורה מתחת לפאנלים מעט נמוכה מאשר מעליהם, באופן שמיטיב עם חלק מהגידולים.

כיום מבוצעים פרויקטים פורצי דרך בנושא זה במדינות רבות בעולם בהן יפן, אוסטרליה ובלגיה. גם בישראל, משרדי האנרגיה והחקלאות מגלים עניין לבחון אפיק חשוב זה לייצור חשמל<sup>14</sup>.

פיתוחו של התחום מחייב עריכת מחקרי שדה לאיתור הגידולים המתאימים ושיטת ההתקנה המתאימה ביותר, ובמקביל לכך ביצוע ההסדרה הרגולטורית הנדרשת<sup>15</sup> והגדרת אסדרה תעריפית מתאימה. סוגיה חשובה לקידום האפיק האגרי-וולטאי הינה הגדרת מנגנון אשר יבטיח את המשך השימוש החקלאי בקרקע לאחר התקנת מערכות ה-PV.

ניצול של כ-172 אלף דונם המהווים 4.8% בלבד מהשטח החקלאי ב-2050 להתקנת מערכות אגרי-וולטאיות משקף פוטנציאל להספק סולארי מותקן של 18.7 GW אשר יספקו כ-20% מצריכת החשמל של המדינה.

בנוסף להתקנות במודל אגרי-וולטאי, קיימת היתכנות להקמת שדות סולאריים קרקעיים על שטחים חקלאיים, על בסיס תמ"א 10/ד/10, כמפורט בהמשך.

כך גם בבסיסי צבא ושטחים בשליטת מערכת הביטחון קיים פוטנציאל גדול להתקנות

12 הערכת השטח החקלאי בישראל מבוססת על מסמך מדיניות תכנון החקלאות בישראל, משנת 2015, משרד החקלאות. [https://www.moag.gov.il/yhidotmisrad/reshut\\_techun/tochnit\\_leumit/SiteAssets/Pages/ogdan\\_mipuy/mediunittic\\_hnun\\_kerechA.doch1.pdf](https://www.moag.gov.il/yhidotmisrad/reshut_techun/tochnit_leumit/SiteAssets/Pages/ogdan_mipuy/mediunittic_hnun_kerechA.doch1.pdf)

13 Benefits of Agrivoltaics Across the Food-Energy-Water Nexus. Sept. 11, 2019, NREL

14 משרד האנרגיה ומשרד החקלאות מקדמים במשותף את התחום ואף הכריזו על שתוף פעולה לקידום מחקרים בתחום, ראה פרסום מה-31 בינואר 2021: [https://www.gov.il/he/departments/news/press\\_310121](https://www.gov.il/he/departments/news/press_310121)

15 במסגרת תכנית NZO בוצעה עבודה לניתוח החסמים הרגולטוריים ובחינת הישמות המשפטית לקידום המסלול האגרי-וולטאי. עבודה זו תפורסם בעתיד.

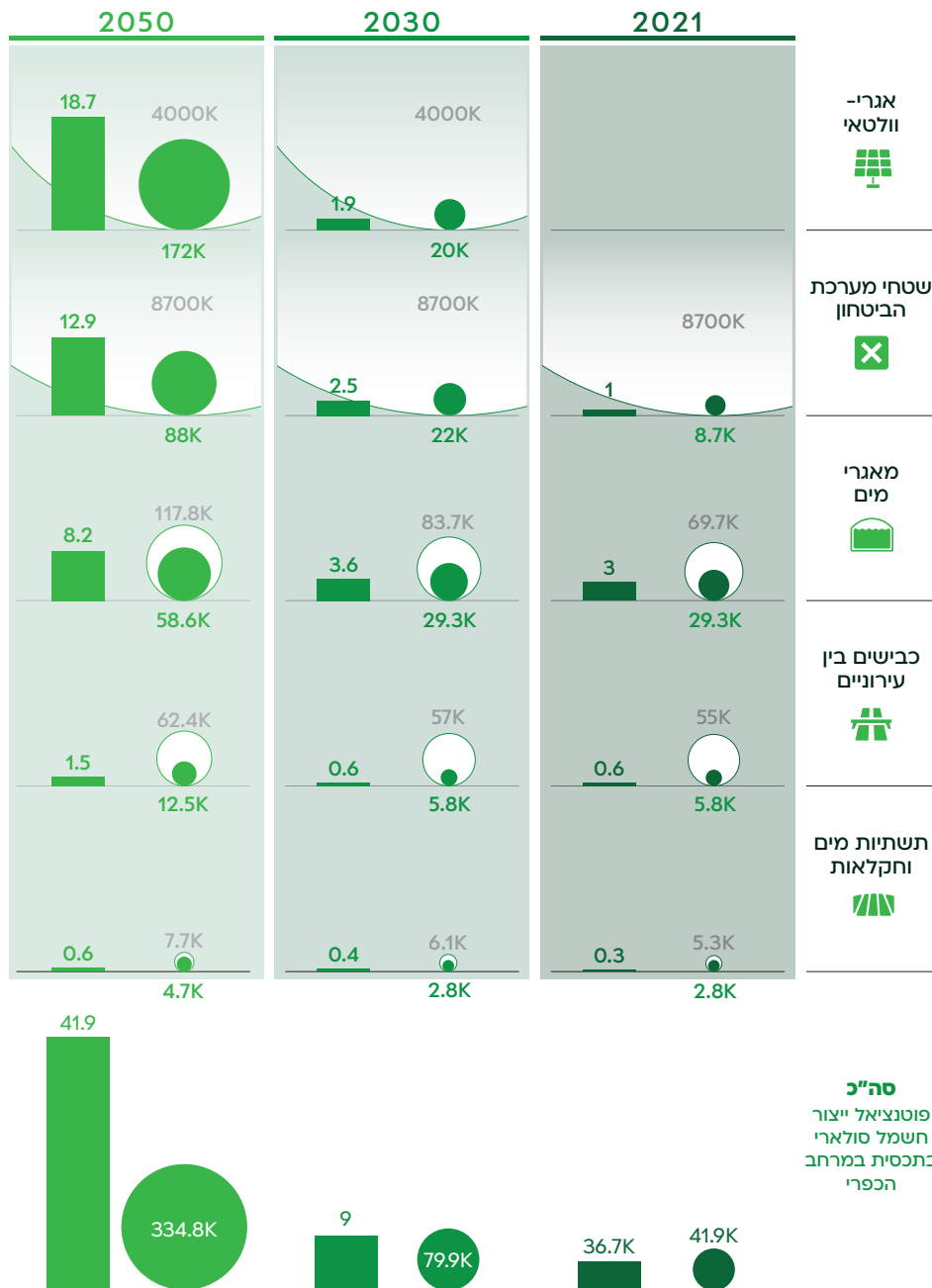
בדו-שימוש. כיום, כ-8,700,000 דונמים הינם בסמכות הצבא ו/או מערכת הביטחון, לרבות בסיסים ושטחי אש. הצבת מערכות PV על 1% משטח זה עד לשנת 2050 תוסיף לפוטנציאל הייצור הסולארי 12.9 GW.

מאגרי המים וצנרת המים, מהווים גם הם תכסית במרחב הכפרי שניתן לנצל. הצבת מערכות PV על פני מאגרים מתרחשת כבר עתה, ויש עוד פוטנציאל גדול בתחום זה. פוטנציאל נוסף טמון בכבישים הבין-עירוניים, ששטחם כיום הינו 55,000 דונמים וניתן יהיה להתקין מערכות סולאריות בצידי הכבישים, במחלפים ובקירוי מעל הכבישים. לסקירה מפורטת של פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי בתכסית המרחב הכפרי ואופן החישוב, ראו נספח ג'.



מערכות PV על פני מאגר מים





מקרא: ● שטח זמין להפקת חשמל בדונמים ○ סך השטח בדונמים ■ פוטנציאל ייצור החשמל מהשטח ב-GW

### שדות סולאריים קרקעיים (שטחים שהוקצו במסגרת תוכניות מתאר ארציות - תמ"א)

שדות סולאריים קרקעיים הינם שטחים אשר הוקצו להקמה של מערכות PV. תכנית NZO 2050 מניחה שלא יעשה שימוש בשדות סולאריים מעבר לשטח אשר כבר הוקצה לכך במסגרת תוכניות המתאר הארציות הרלוונטיות.

תמ"א 41 היא תוכנית מתאר ארצית כוללת למשק האנרגיה בישראל. התכנית נמצאת בתהליכי אישור אך נכון לאפריל 2021 טרם אושרה, ולכן גם אינה תקפה. עם זאת, לענייננו חשוב כי בישיבה של המועצה הארצית לתכנון ובניה מחודש ינואר 2021, הוחלט לאשר שימוש ב-15,700 דונם של שטחים פתוחים להקמת חוות סולאריות, תוך קביעת החשיבות במתן עדיפות לדו-שימוש בשטחים<sup>16</sup>. תכנית NZO מניחה שלא יאושר שימוש בשטחים פתוחים נוספים להקמת חוות סולאריות מעבר להחלטה זו עד לשנת 2050.

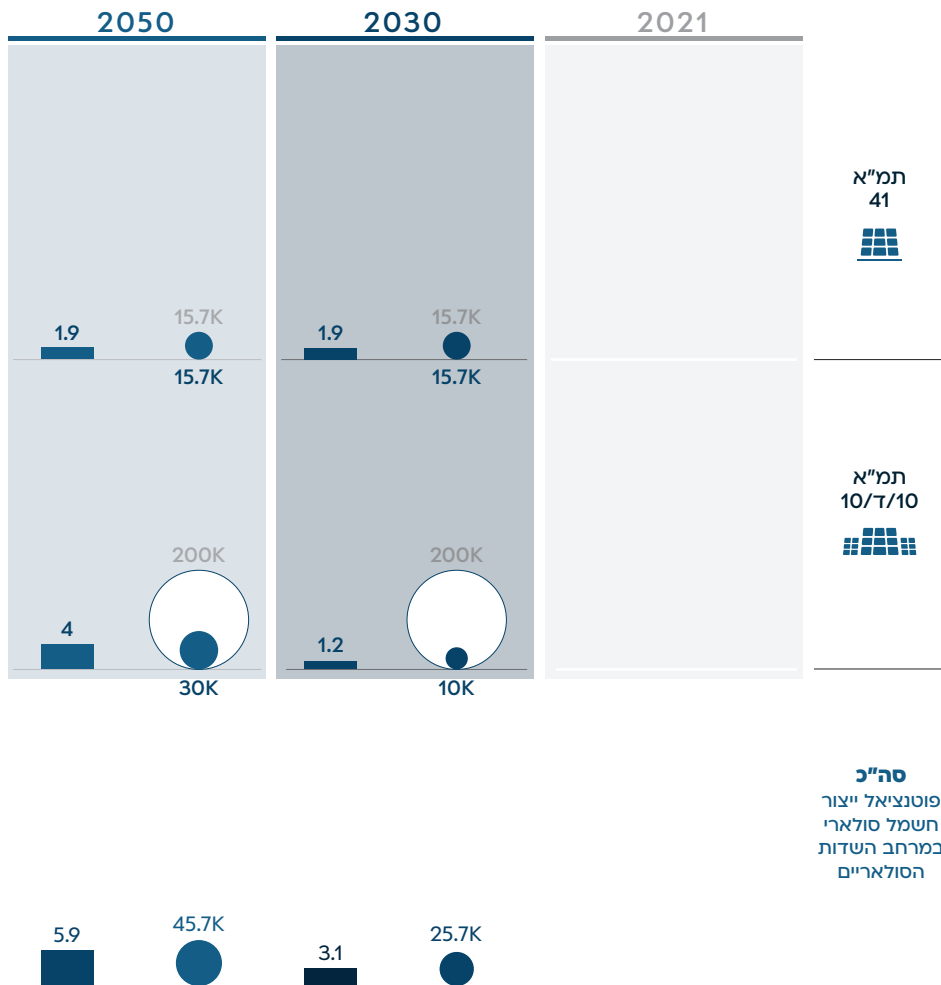
תמ"א 10/ד/10 היא תוכנית מתאר ארצית למתקנים פוטו-וולטאיים. התכנית מאפשרת הקמה של מערכות PV בשטחים חקלאיים, ביישוב חקלאי או כפרי, בהיקף של עד 10% מהשטח החקלאי במשבצת או 300 דונמים, הנמוך מביניהם. ההערכות הן כי סך השטח המקסימלי שעשוי להיות מנוצל על פי הוראות התכנית הוא כ-200,000 דונמים. בתכנית NZO 2050 נבחרה הערכה שמרנית, שעד 2030 יוסבו 10,000 דונמים חקלאיים למערכות PV ועד לשנת 2050 יוסבו בסך הכל 30,000 דונם.

הפוטנציאל הסולארי המוערך בשטחים אלו הוא 1.2 GW ב-2030 ו-4 GW ב-2050. לסקירה מפורטת של פוטנציאל ייצור החשמל הסולארי בשדות סולאריים ואופן החישוב, ראו נספח ד'.



שדה סולארי ייעודי להפקת חשמל

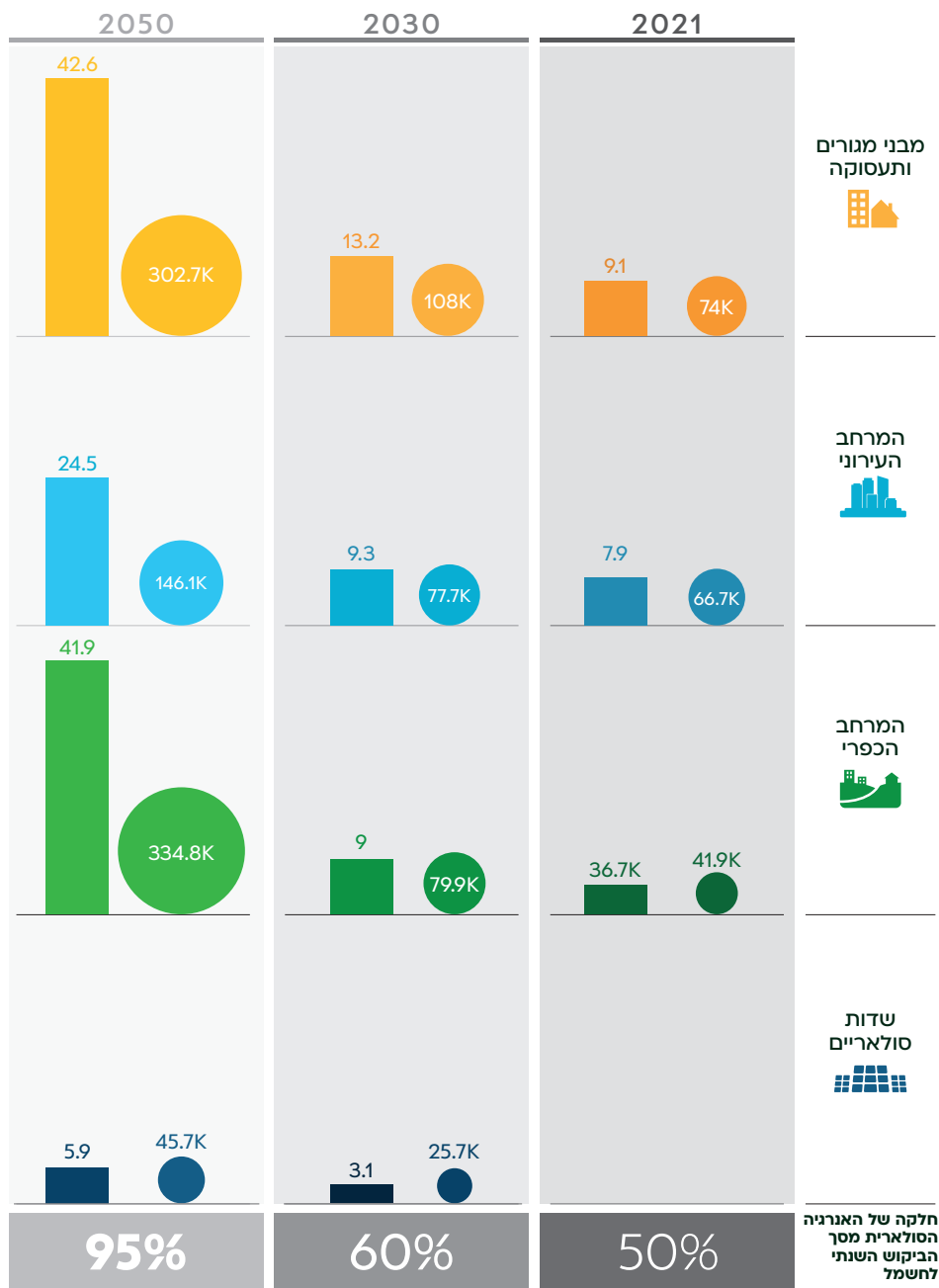
<sup>16</sup> במסגרת תכנית NZO בוצעה עבודה לניתוח החסמים הרגולטוריים ובחינת הישימות המשפטית לקידום המסלול האגרי-וולטאי. עבודה זו תפורסם בעתיד.



## סיכום

תכנית NZO 2050 שואפת למצות את הפוטנציאל הסולארי הקיים. לשם כך הוערך הפוטנציאל הסולארי לפי סוגי השטחים שינוצלו לצורך התקנת מערכות PV: מבני מגורים ותעסוקה, תכסית במרחב העירוני, תכסית במרחב הכפרי ושדות סולאריים. הפוטנציאל הוערך בשלוש נקודות זמן: ההווה, כלומר תחילת שנת 2021; סוף שנת 2030 וסוף שנת 2050, תוך התחשבות בשיפורים הטכנולוגיים הצפויים בנצילות מערכות ה-PV. על בסיס הערכות אלו ניתן לקבוע כי הפוטנציאל הסולארי ב-2021 הוא כ-21.8 GW, היקף שעשוי לספק כ-50% מהביקוש השנתי. הפוטנציאל הסולארי ב-2030 הוא 34.6 GW, שעשוי לספק 60% מהביקוש השנתי. והפוטנציאל הסולארי ב-2050 הוא כ-115 GW, אשר עשויים לספק 95% מהביקוש השנתי.<sup>17</sup>

17 הספק מותקן של 115 GW עשוי לספק מעל ל-120% מהביקוש הצפוי לחשמל ב-2050. אך מכיוון ושעות ייצור החשמל באמצעות מערכות PV אינן חופפות באופן מלא את שעות צריכת החשמל, חלק מהחשמל המיוצר בשעות השיא של הייצור (צהרי יום שמש, לדוגמה) ייאגר לטובת שימוש במועד מאוחר יותר (אמצע הלילה, או במהלך יום חורפי מעונן). לשם כך יש להקים מתקני אגירת חשמל ואנרגיה בהיקף מתאים. בתכנית NZO, 2021 הראינו כי נקודת האיזון האופטימלית מבחינה סביבתית וכלכלית הינה אספקה של 95% מהביקוש לחשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות, בהינתן הקמת יכולת האגירה הנדרשת. להרחבה ראו תכנית NZO, 2021.



מקרא: ● שטח זמין להפקת חשמל בדונמים ■ פוטנציאל ייצור החשמל מהשטח ב-GW



## סיכום: בדרך למיצוי הפוטנציאל הסולארי בישראל

במחקר קודם של צוות NZO, תחת הכותרת "היעד: 95% עד 2050", הראינו כי על מנת להגיע לאספקה של 95% מהחשמל שצפוי להיצרך בישראל באמצעות אנרגיות מתחדשות, יש להתקין מערכות סולאריות בהספק כולל של 115 GW. כך, ייצור החשמל הסולארי בעודף בשעות השמש ובעונות החמות, יאפשר אגירה של חשמל לשעות החשוכות ולעונות הקרות. המחקר שמוצג כאן מראה כי ישנו פוטנציאל סולארי מספק למימוש היעד. זאת אם יעשה שימוש מושכל במבני מגורים ותעסוקה, בתכסית העירונית והכפרית ובאפשרויות נוספות כגון אנרגיה אגרי-וולטאית. כל זאת, ללא פגיעה נוספת בשטחים הפתוחים בישראל.

על בסיס המחקר שמוצג כאן, ניתן לאתר את החסמים המרכזיים אשר עלולים למנוע את מימושו של התרחיש האופטימלי, חרף התכנותו הטכנית, עליה עמדנו. החסמים המרכזיים קשורים ביכולת למצות את פוטנציאל השטח לייצור סולארי, בהתמודדות עם התנודתיות הטבעית של המקורות המתחדשים (באמצעות פיתוח יכולת האגירה) ובשינוי הרגולציה כך שתתמוך בפיתוח אנרגיות מתחדשות על חשבון אנרגית הגז הפוסילית.

### מיצוי השטח הפוטנציאלי להתקנת מערכות בדי-שימוש

תכנית NZO מניחה התקנת מערכות סולאריות במגוון סוגי שטחים, אשר יאפשרו להגיע להיקף ההתקנות הנדרש. בכל אחד מסוגי השטחים קיימים חסמים שונים אשר נדרשת פעולה להסרתם וליצירת רגולציה תומכת.

רשות החשמל הינה רגולטור מרכזי בתחום ועליה לייצר את אסדרות אשר יעודדו את מצוי הפוטנציאל הסולארי על הגנות הגדולים, ואסדרות אשר יעודדו התקנות בקרבת אזורי הביקוש ובמודלים של דו-שימוש, תוך יצירת תנאים כלכליים אשר יעודדו את השוק להקים מערכות גם בהתקנות מורכבות ויקרות יותר כדוגמת: אגרי-וולטאי, קרוי כבישים וחזיתות מבנים.

על מנת לממש את פוטנציאל הקיים יש להסדיר את ההתקנות במודל של דו-שימוש, כולל באגרי-וולטאי, ובהתקנות בשטחים הנמצאים בשליטת מערכת הביטחון. יש להסיר חסמים המונעים שימוש מסוג זה בקרקע, ולהגדיר את התמריץ הכלכלי המתאים.

מימוש הפוטנציאל הסולארי מחייב התמודדות עם אתגרים נוספים כגון מודעות נמוכה בציבור ליתרונות הכלכליים והסביבתיים של התקנת מערכת PV, קשיי מימון, וכן האיסור לחבר לרשת החשמל מערכות PV בבתים בהם חיבור החשמל מוגדר "זמני" גם בחלוף שנים ארוכות מבנייתם.

היבט חשוב נוסף הינו שתוף הציבור, במטרה להגדיל את המוטיבציה של הציבור הרחב להקמת מערכות סולאריות על גגות המבנים, ובמקביל לכך להוריד את ההתנגדויות הקיימות למהלך (לדוגמה – התנגדויות הורים להתקנת מערכות סולאריות על מבני בית הספר, מחשש – בלתי מוצדק וחסר בסיס – לקרינה אשר כביכול תפגע בילדיהם).

### אגירה

תכנית NZO כוללת שימוש נרחב במערכות לאגירת אנרגיה, אשר חלקן יוקמו בשטחי המבנים והמתקנים אשר עליהם יוקמו המערכות הסולאריות. עבור התקנות בשדות סולאריים קרקעיים חישוב השטח הדרוש עבור התקנת 1 קילו-וואט הספק, כולל גם את השטח הדרוש עבור מערכות אגירת אנרגיה.

ישנן טכנולוגיות אגירה אשר משתמשות במערכות המוטמנות מתחת לקרקע. שימוש בטכנולוגיות אלו, יקטין באופן משמעותי את השטח אשר יידרש עבור הקמת מערכות האגירה.

### רשת ההולכה

בפברואר 2019 אושרה תכנית הפיתוח של חברת החשמל להרחבת רשת ההולכה.<sup>18</sup> בעקבות החלטת שר האנרגיה לקביעת יעד של 30% אנרגיות מתחדשות בשנת 2030 החל בחברת החשמל תהליך לעדכון התכנון של רשת ההולכה, תכנון אשר לא פורסם עד למועד כתיבת מסמך זה.

הפריסה של קווי מתח גבוה חדשים לשם חיבור מתקני ייצור מבוזרים תלויה במיקום שבו יוקמו המתקנים הסולאריים. מרבית הפוטנציאל לייצור חשמל סולארי, כפי שמופה בתכנית NZO, נמצא במרחב העירוני והבנוי, כלומר באזורים אשר קיים בהם ביקוש לחשמל, וניתן להעריך כי לא תידרש בהם השקעה להרחבת רשת ההולכה.

18 ראו אישור שר האנרגיה לתכנית הפיתוח של רשת ההולכה, פברואר 2019. [https://www.gov.il/he/departments/news/electricity\\_270219](https://www.gov.il/he/departments/news/electricity_270219)

## טבלה 2: התקנות צפויות ב 2050 בחלוקה סוג השטח העיקרי - וההשפעה על רשת ההולכה

קירבה לביקוש	אחוז מההספק הצפוי	הספק מותקן ב-GW בשנת 2050	סוג שטח עיקרי
גבוהה	37%	42.6	מבנים למגורים ותעסוקה
גבוהה	21.5%	24.6	תכסית במרחב העירוני
חלקית	36.5%	41.9	תכסית במרחב הכפרי
נמוכה	5%	5.9	שטחים שהוקצו לפי תמ"א
		115,000	סה"כ

השימוש הנרחב בהתקנות בדו-שימוש במרחב העירוני והבנוי מביא לכך ש-58% מההספק יותקן באזורים אשר בהם קיים ביקוש לחשמל, וסביר להניח שלא תדרש השקעה לחיבור של מתקני ייצור אלו לרשת ההולכה. התקנת מערכות במרחב הכפרי תחייב במרבית המקרים השקעה לחיבור לרשת ההולכה. עבור התקנות של שדות סולאריים קרקעיים תדרש בוודאות השקעה לשם חיבור השדה הקרקעי לרשת. תכנון ההשקעות הנדרשות ברשת ההולכה מחייב בחינה פרטנית בהתייחס לחלוקה גאוגרפית של המדינה, תוך התייחסות לקיבולת ולעומס הקיים היום על הרשת.

---

## נספחים

## נספח א': פירוט פוטנציאל במבני מגורים ותעסוקה

### גגות מבני מגורים

הערכה של מספר יחידות הדיור שייבנו התבססה על החלטת הממשלה ה-34 מספר 2457 מיום 19 בספטמבר 2017, תכנית אסטרטגית לדיור, י בה מוגדרים צרכי הדיור העתידיים עד שנת 2040, והמענה הצפוי להם – בדמות מספר יחידות הדיור שייבנו בעתיד. חלוקת יחידות הדיור למבנים התבססה על ההערכה של צורת הבנייה (צמודת קרקע – 10% מיחידות הדיור שייבנו בעתיד, בנייה רוויה עד 5 קומות – 10%, ובנייה רוויה למעלה מ-5 קומות – 80%) בהסתמך על המגמות הקיימות בתחום התכנון, כלומר העדפת בנייה לגובה וציפוף עירוני.

נמצא כי גידול שטח גגות מבני המגורים צפוי להיות כ-18 אלף דונמים עד 2025, כ-25 אלף דונמים נוספים עד 2030 וכ-88 אלף דונמים נוספים עד 2050. לפי מחקרי המעבדה הלאומית האמריקאית לאנרגיות מתחדשות, NREL, שטח הפנים שניתן יהיה לניצול בגגות של מבני מגורים צפוי לעמוד על 79%. הונח כי שיעור זה יהיה ישים החל מ-2025. לסיכום:

2050	2030	2021	
358,155	269,666	231,221	שטח (דונמים)
החלטת ממשלה 2457			גורם מפתח בגידול וסימוכין
79%	50%	21%	אחוז ניצול ל-PV
מחקרי מעבדת NREL			גורם מפתח בגידול וסימוכין
210,158	67,446	48,556	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-MW) <sup>20</sup>
31.3	8.6	6.1	פוטנציאל ייצור ב-GW

19 החלטת הממשלה ה-34 מס' 2457, מיום 19 בספטמבר 2017, תכנית אסטרטגית לדיור. ניתן לצפייה בקישור: [https://www.gov.il/he/Departments/policies/2017\\_dec2457](https://www.gov.il/he/Departments/policies/2017_dec2457)

20 הנצילות המוצגת הינה הערך הצפוי בסוף התקופה, פוטנציאל ההספק הסולארי חושב על פי הערך הממוצע הצפוי בתקופה. לדוגמה: פוטנציאל הייצור אשר יותקן בשנים 2030-2050 חושב על פי הערך הממוצע בין הנצילות הצפויה בשנת 2030 לשנת 2050.

### גגות מבנים מסחריים-ציבוריים

תת-סוג זה כולל בתוכו מבני ציבור, חינוך, מסחר, משרדים ותיירות. כותבי מסמך הגנ"ס 2020 העריכו את שיעור השטח הניתן לניצול על גבי כל סוג של מבנה (30% במבני תיירות, ו-70% במבני חינוך, לדוגמה) ועבודה זו מבוססת על ממצאיהם בנושא זה. גידול השטח הצפוי מבוסס על ממוצע הגידול בשנים האחרונות על פי נתוני הלמ"ס, אף זאת כפי שחושב במסמך הגנ"ס 2020.

2050	2030	2021	
20,992	14,935	11,927	שטח (דונמים)
ממוצע גידול בשנים האחרונות לפי נתוני למ"ס			גורם מפתח בגידול וסימוכין
57%	57%	57%	אחוז ניצול ל-PV
שיקולול לפי סוגי מבנים שונים			גורם מפתח בגידול וסימוכין
11,965	8,513	6,798	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>2.2</b>	<b>1.1</b>	<b>0.85</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### גגות מבני תעשייה

הונח כי 70% משטח גגות מבני התעשייה עשויים לשמש למערכות PV (על בסיס הערכות של חברות סולאריות) וכי שיעור זה יגדל ל-75% בעתיד, בהינתן תכנון מוטה PV. קצב הגידול בשטח הגגות הוצמד לקצב גידול התמ"ג בשיעור הצפוי כיום, כ-2.9% בממוצע בכל שנה.

2050	2030	2021	
11,637	9,498	8,557	שטח (דונמים)
גידול בתמ"ג			גורם מפתח בגידול וסימוכין
75%	73%	70%	אחוז ניצול ל-PV
שיקולול לפי סוגי מבנים שונים			גורם מפתח בגידול וסימוכין
8,728	6,934	5,990	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>1.1</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### חזיתות מבנים בטח העירוני

שטח חזיתות המבנים העירוניים חושב באמצעות איסוף נתונים קפדני שערכו כותבי מסמך הגנ"ס 2020 על בסיס נתוני הבנט"ל. ההערכות התבססו על גובה המבנים והיקפם, וכך חושב שטח המעטפת. משטח זה נוכו 25% בגין "המפנה הצפוני", היכן שהתקנת מערכות PV תהיה חסרת תועלת (מאחר והחשיפה לשמש נמוכה). וכן הופחת משטח זה השטח של שלוש הקומות הראשונות, על בסיס ההערכה כי בשטחים עירוניים צפופים ההצללה הנוצרת על קומות אלו של המבנים אף היא מפחיתה את יעילות הפקת החשמל הסולארי מהחזיתות. בנוסף, על בסיס המחקר הקיים בנוגע ליעילות מערכות PV המותקנות על חזיתות מבנים, ניתן מקדם של 0.4 למערכות אלו, ביחס למערכות המותקנות על גגות.<sup>21</sup>

ביחס לשיעור שטח החזית הניתן לניצול על ידי מערכות PV העריכו כותבי מסמך הגנ"ס 2020 את ההתפתחות השונה במבנים מסוגים שונים. להעמקה בנושא זה ראו מסמך הגנ"ס 2020 עמ' 26. להלן יוצגו ההערכות המשוקללות:

2050	2030	2021	
136,259	87,114	65,339	שטח (דונמים)
במבני מגורים לפי החלטה 2457, במבנים ציבוריים מסחריים לפי גידול ממוצע בשנים האחרונות, ובמבני תעשייה לפי גידול בתמ"ג			גורם מפתח בגידול וסימוכין
	משתנה	20%	אחוז ניצול ל-PV
שיקולול לפי סוגי מבנים שונים			גורם מפתח בגידול וסימוכין
63,266	24,219	13,068	שטח למערכות PV (דונמים)
17.4	19.14	20	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
7.95	2.6	1.5	פוטנציאל ייצור ב-GW

21 יש לציין כי המפנה המזרחי והמפנה המערבי עשויים לפצות מעט על חוסר היעילות היחסי של מערכות PV המותקנות על חזיתות כיוון שהם מסוגלים לקלוט את קרינת השמש בשעות הזריחה והשקיעה, בהתאמה, בעת שהמערכות על הגגות כבר פחות אפקטיביות. אך באופן כללי, למערכות PV המותקנות על חזיתות ביצועים פחותים לעומת מערכות על גגות, בשל זווית הפגיעה של קרינת השמש.

## נספח ב': פירוט הפוטנציאל בתכסית במרחב העירוני

### חניות

שטח החניות והחניונים העדכני נאסף מנתוני הבנט"ל. הוערך ניצול אפשרי של כ-50% משטח זה על בסיס האמור בתמ"א 10/ד/10, תכנית מתאר ארצית למתקנים פוטו וולטאיים, אשר מאפשרת התקנה של מערכות PV על 50% מהשטח בהסכמת בעל החניה. הוערך שניצול השטח צפוי לגדול עד ל-70% בעתיד. הגידול בשטח החניות הוצמד לגידול בבניה המסחרית-ציבורית.

2050	2030	2021	
38,634	27,487	21,951	שטח (דונמים)
הגידול, בהתאם לגידול המוערך בבניית מבנים מסחריים ציבוריים			גורם מפתח בגידול וסימוכין
70%	50%	50%	אחוז ניצול ל-PV
לפי תמ"א 10/ד/10			גורם מפתח בגידול וסימוכין
23,180	13,744	10,976	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
3.2	1.7	1.4	פוטנציאל ייצור ב-GW

### כבישים עירוניים

הגידול בשטח הכבישים העירוניים הוצמד להערכה בגידול השטח הבנוי, בניכוי השטח שייבנה במסגרת התחדשות עירונית (כיוון שבנייה זו תסתמך על תשתית הכבישים הקיימת).<sup>22</sup> כן הוערכה צמיחה משמעותית בהיקף השטח שניתן יהיה לקרות ולהתקין בו מערכות PV, מ-5% לכ-30%, הערכה שמגובה בהערכות של חברות מסחריות בתחום.



2050	2030	2021	
432,009	326,754	289,163	שטח (דונמים)
לפי תמ"א 42			גורם מפתח בגידול וסימוכין
30%	5%	5%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בגידול וסימוכין
73,375	16,338	14,458	שטח למערכות PV (דונמים)
7	8.74	9.6	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>8.95</b>	<b>1.7</b>	<b>1.5</b>	פוטנציאל ייצור ב-GW

### פארקים (גנים ציבוריים ומגרשי משחקים)

הגידול בשטח הפארקים הוערך על ידי כותבי מסמך הגנ"ס 2020 כצמוד לזה של הגידול במס' יחידות הדיור. השטח הניתן לניצול למערכות PV הוערך בסך נמוך של כ-20% בלבד, בהנחה שמרבית השטח יוקצה לצמחיה, אולם בהינתן תכנון נכון ניתן יהיה להגיע לשיעור גבוה הרבה יותר בעתיד, בסך של עד 70%.

2050	2030	2021	
54,210	38,543	31,737	שטח (דונמים)
מותאם לגידול ביחידות הדיור			גורם מפתח בגידול וסימוכין
70%	20%	20%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בגידול וסימוכין
24,395	7,709	6,347	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>3.6</b>	<b>1</b>	<b>0.8</b>	פוטנציאל ייצור ב-GW

### אזורי תעשייה

שטחים אלו כוללים את שטחי מכלול אזור התעשייה, ללא מבני התעשייה עצמם. הונח כי שטח אזורי התעשייה יצמח בהתאמה לצמיחה הממוצעת בתמ"ג. בשל ההנחה כי שטחים אלו מרובים בשטחי תפעול, הונח שיעור ניצול נמוך יחסית לטובת התקנות PV, כ-20% שייגדלו בעתיד, על פי הערכת חברות מסחריות, ל-30%. יתכן וזוהי הערכת חסר.

2050	2030	2021	
105,426	86,046	77,519	שטח (דונמים)
בהתאם לגידול בתמ"ג			גורם מפתח בגידול וסימוכין
30%	20%	20%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בגידול וסימוכין
26,357	17,209	15,504	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>3.6</b>	<b>2.2</b>	<b>1.9</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### מגרשי ספורט

הגידול בשטח מגרשי הספורט הוערך במסמך הגנ"ס 2020 כצמוד לזה של הגידול במס' יחידות הדיור. השטח המוערך לניצול למערכות PV הוא כ-60% ועשוי להגיע עד ל-90% בתכנון עתידי נכון.

2050	2030	2021	
10,932	7,773	6,400	שטח (דונמים)
מותאם לגידול ביחידות הדיור			גורם מפתח בגידול וסימוכין
75%	60%	60%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בגידול וסימוכין
8,199	4,664	3,840	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>1.15</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### מתחמי רפואה, תיירות ומסחר

המונח "מתחמים" מתייחס לשטח המקיף את המבנים המסחריים ועשוי לשמש אף הוא לייצור חשמל סולארי. הגידול בשטח מתחמי הרפואה, התיירות והמסחר הוצמד במסמך הגנ"ס 2020 לגידול הצפוי בשטח המבנים הללו, אשר הוצמד בתורו לצמיחה הממוצעת הצפויה בתמ"ג. שיעור השטח הניתן לניצול בכל מתחם שונה,

וזאת בהתבסס על הערכות של חברות מסחריות בתחום. בהינתן תכנון עתידי נכון ניתן יהיה להגיע לניצול מרבי של חלק מהמתחמים.

2050	2030	2021	
28,464	20,252	16,173	שטח (דונמים)
מותרת לניצול בשטח המסחרי-ציבורי			גורם מפתח בניצול וסימוכין
45-65%	20-40%	20-40%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בניצול וסימוכין
17,144	6,729	4,853	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>2.2</b>	<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### שדות תעופה

הונח כי השטח הכולל של שדות התעופה בישראל, העומד על כ-17,900 דונמים, לא יגדל עד 2050, וכן כי השטח שניתן לנצל לטובת מערכות PV הוא 15% בלבד, וכי שיעור זה יצמח ל-20% ב-2030 ול-23% ב-2050.

2050	2030	2021	
17,849	17,849	17,849	שטח (דונמים)
			גורם מפתח בניצול וסימוכין
23%	20%	15%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בניצול וסימוכין
4,462	3,570	2,677	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### בתי קברות

הונח כי לא יחול גידול בשטח בתי הקברות בישראל, אולם יחול גידול בהיקף השטח הניתן לניצול.

2050	2030	2021	
12,312	12,312	12,312	שטח (דונמים)
			גורם מפתח בגידול וסימוכין
75%	60%	50%	אחוז ניצול ל-PV
הערכות חברות מסחריות			גורם מפתח בגידול וסימוכין
9,234	7,387	7,387	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
1.2	0.9	0.9	פוטנציאל ייצור ב-GW

## נספח ג': פירוט פוטנציאל בתכסית במרחב הכפרי

### אגרי-וולטאי

כפי שתואר בהרחבה מעלה, ישנו פוטנציאל רב בשימוש דואלי בשטחים חקלאיים לטובת ייצור סולארי. עדויות מחקריות ראשוניות מעלות כי לא רק ששימוש דואלי לא פוגע בתנובה החקלאית, אלא שבגידולים מסוימים הוא עשוי אף לשפרה. בעבודה זה "השלמנו את החסר" מבחינת פוטנציאל ייצור סולארי, אשר נדרש על פי תרחיש NZO 2050, בעזרת שטחים חקלאיים בשימוש דואלי. ברור שהפוטנציאל לשימוש דואלי עשוי להיות רב הרבה יותר מהמונח כאן.

הונח כי אגרי-וולטאי מחייב מרווחים בין הפנלים הסולאריים, ונקבע שהשטח הנדרש להתקנת הספק סולארי גדול ב 35% בהשוואה להתקנה על גבי גנות. בהתאם לכך ועל בסיס הנצילות הקיימת כיום, יהיה צורך ב- 10.8 דונם של אגרי-וולטאי עבור הספק מותקן של 1 MW.

בחישוב הפוטנציאל האגרי-וולטאי הונח כי ניתן יהיה להתחיל לממש פוטנציאל זה רק החל מ-2030, ושמימוש הפוטנציאל יהיה בקצב עקבי, כלומר בכל שנה יותקן חלק שווה של מערכות PV.

2050	2030	2021	
4,000,000	4,000,000		שטח (דונמים)
			גורם מפתח בגידול וסימוכין
4.8%	0.5%		אחוז ניצול ל-PV
172,000	20,000		שטח למערכות PV (דונמים)
8.21	9.94	10.8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>18.7</b>	<b>1.9</b>	<b>0.0</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### מאגרי מים

הפוטנציאל מתבסס על עבודת המשרד להגנת הסביבה למפוי הפוטנציאל הסולארי בשטח הבנוי. בתכנית NZO הנחנו שיחול גידול במספר מאגרי המים בישראל כתלות בגידול הצפוי באוכלוסייה.

פוטנציאל השטח כולל את שטח המאגרים הצפוי ובנוסף לכך את השטח של דופן אחת במאגר.

2050	2030	2021	
90,864	62,773	52,311	שטח (דונמים)
גידול האוכלוסייה			גורם מפתח בגידול וסימוכין
30%			אחוז ניצול ל-PV
על פי הערכה של המשרד להגנת הסביבה			סימוכין
58,609	29,282	24,402	שטח למערכות PV (דונמים)
משתנה בין סוגי התשתיות			נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>8.2</b>	<b>3.6</b>	<b>2.95</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### תשתיות מים וחקלאות

שטחים אלו כוללים שטחים של מתקני חקלאות כגון סככות ובתי אריזה, ושטחים של תשתיות מים כולל מתקני התפלה, מכוני טיהור, מגדלי מים ומכוני שאיבה. הונח כי השטחים של תשתיות המים יגדלו בהתאם לסך הפקת המים הצפוי על פי נתוני רשות המים כתחזית הפקת המים. שיעור הניצול האפשרי של שטח זה הוערך ב-50%. תשתיות החקלאות – הנחנו שלא יחול גידול בשטחים אלו.

2050	2030	2021	
7,713	6,154	5,324	שטח (דונמים)
תשתיות מים - על פי תחזית הגידול בהפקת המים של רשות המים			גורם מפתח בגידול וסימוכין
תשתיות חקלאות - ללא גידול			
תשתיות חקלאות 60% עד 2030, 70% עד 2050.			אחוז ניצול ל-PV
תשתיות מים - 50% עד 2030, 60% עד 2050.			
תשתיות מים - על פי תחזית הגידול בהפקת המים של רשות המים   תשתיות חקלאות - ללא גידול			גורם מפתח בגידול וסימוכין
4,378	2,827	2,771	שטח למערכות PV (דונמים)
5.41	7.14	8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
<b>0.6</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### כבישים בין-עירוניים

שטח הכבישים הסלול נלקח מנתוני הבנט"ל. הגידול בשטח הכבישים הוערך על בסיס תמ"א 42, תכנית מתאר ארצית לתחבורה יבשתית משולבת.<sup>23</sup> השטח הניתן לניצול סולארי בכבישים בין עירוניים, במודל של קירוי הכביש, הוא מועט – כ-10% בלבד, אולם עשוי לצמוח עד ל-30% בעתיד.

2050	2030	2021	
62,412	57,543	54,994	שטח (דונמים)
לפי תמ"א 42			גורם מפתח בגידול וסימוכין
10%			אחוז ניצול ל-PV
לפי תמ"א 10/ד/10			גורם מפתח בגידול וסימוכין
12,482	5,754	5,499	שטח למערכות PV (דונמים)
7	8.74	9.6	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
1.5	0.6	0.6	פוטנציאל ייצור ב-GW

פוטנציאל נוסף להתקנת מערכות סולאריות קיים במחלפים ולצידי הכבישים. השטחים הכלואים במחלפים הינם בשטח כולל של 5,000 דונם, אשר ניתן להתקין עליהם כ-0.5 GW. התקנה לצידי כבישים עשויה להגדיל אף היא את פוטנציאל הייצור הסולארי לאורך נתיבי התחבורה.

### בסיסי צבא

הונח כי לא יחול גידול בשטח בסיסי הצבא ובשטחים שבשליטת מערכת הביטחון. כמו כן הונח שהשטח הפוטנציאלי הזמין הינו 2% מהשטח הכולל אשר נמצא בשליטת מערכת הביטחון. הנחנו שהניצול של שטחים אלו יגדל בהדרגה ויגיע עד ל-50% מהפוטנציאל, כלומר עד ל-1% מהשטח.

<sup>23</sup> תחזית הגידול של שטח הכבישים עובדה במסגרת מסמך הנ"ס 2020 בעזרת ד"ר ניר שרב, ובעבודה זו אנו מתבססים על ממצאיהם.

2050	2030	2021	
8,700,000	8,700,000	8,700,000	שטח (דונמים)
ללא גידול			גורם מפתח בגידול וסימוכין
1%	0.25%	0.1%	אחוז ניצול ל-PV
הערכה			גורם מפתח בגידול וסימוכין
87,000	21,750	8,700	שטח למערכות PV (דונמים)
6.2	7.9	8.8	נצילות PV (דונם ל-MW)
<b>12.94</b>	<b>2.55</b>	<b>1</b>	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### מחצבות

בשטחים של המחצבות הפעילות, אשר עשוי להגיע ל-21 אלף דונמים ב-2050, הונח שלא קיים פוטנציאל לייצור חשמל סולארי, בשל האבק העולה אנב פעולת החציבה. קיים פוטנציאל להתקנת מערכות סולאריות בשטח של מחצבות נטושות. בחלק מהמחצבות קיימים שטחים רבים אשר בהם קרינת השמש מוסתרת ונדרשת בחינה פרטנית לבחינת הפוטנציאל. בשל כך ומטעמי שמרנות לא כללנו בחישוב את הפוטנציאל הקיים במחצבות הנטושות.



## נספח ד': פירוט הפוטנציאל בשדות סולאריים קרקעיים

### תמ"א 41

השטח המוקצה לשדות סולאריים קרקעיים מוגדר בתמ"א 41. השיפור בפוטנציאל ייצור החשמל בשדות קשור בשיפור נצילות מערכות ה-PV. ב-2020 ישנו הספק מותקן של כ-1.2 GW בשדות סולאריים (כושר ייצור בפועל, לא פוטנציאל).

2050	2030	2021	
15,700	15,700	15,700	שטח (דונמים)
תמ"א 41			גורם מפתח בגידול וסימוכין
100%	100%		אחוז ניצול ל-PV
15,700	15,700		שטח למערכות PV (דונמים)
6.2	7.94	8.8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
1.9	1.9		<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

### תמ"א 10/ד/10

תמ"א 10/ד/10 מאפשרת הסבה של שטחים המוקצים כיום לשימוש חקלאי, לשימוש לייצור אנרגיה. הערכנו את היקף השטח הכלול במסגרת זו ב-200 אלף דונם, המוקצים כיום לשימושים חקלאיים וניתן יהיה להסב אותם לייצור חשמל סולארי. הערכנו כי עד 2030 ינוצלו כ-5% מהשטחים לצורך הסבה זו, וכי בין 2030 ל-2050 ינוצלו 10% נוספים.

2050	2030	2020	
200,000	200,000		שטח (דונמים)
תמ"א 10/ד/10			גורם מפתח בגידול וסימוכין
15%	5%		אחוז ניצול ל-PV
30,000	10,000	0	שטח למערכות PV (דונמים)
6.2	7.94	8.8	נצילות PV (דונם ל-1 MW)
4	1.2	0.0	<b>פוטנציאל ייצור ב-GW</b>

## נספח ה': הערכת השיפור העתידי בנצילות מערכות ה-PV

ההתפתחות הטכנולוגית של מערכות PV מביאה לשיפורים משמעותיים בנצילות של הפנלים הסולאריים, תהליך אשר מתרחש בעשור האחרון וצפוי להמשיך. הפאנלים הסולאריים הנפוצים כיום הם מסוג Single Junction Crystalline Silicon, או בקיצור המקובל: C-Si, ויעילותם היא כ-21%-20%. כבר עתה קיימים בעולם פאנלים שיעילותם היא 22% עד 24%,<sup>24</sup> וכן נודע כי במעבדות הגיעו ליעילות של 26.7%<sup>25</sup>. מחקרים מראים כי היעילות המקסימלית של פאנלים סולאריים מסוג זה היא 29.8%<sup>26</sup>. בטכנולוגיות אחרות ניתן להגיע לנצילות גבוהה יותר, כאשר הנצילות הגבוהה ביותר אשר הושגה בתנאי מעבדה הינה 47.1%<sup>27</sup>.

לצורך הערכת השטח הנדרש להתקנת מערכות ה-PV נאספו נתונים מ:

1. חברות מסחריות להתקנת מערכות PV
2. ניסויים בתנאי מעבדה בנצילות מערכות PV
3. מחקרי שוק בתחום

על בסיס נתונים אלו, ועל בסיס הנצילות הקיימת כיום של מערכות PV, נדרש שטח נטו של 5 מ"ר להתקנת פנלים בעלי נצילות של 20% לשם ייצור של 1 קילו-וואט חשמל. בפועל ישנם אילוצים הנובעים מזווית הצבת הפנלים ושטחים הנדרשים עבור קונסטרוקציה ושירות.

תכנון מיטבי של מערכות PV מניח זווית הצבה של 200 מעל לאופק וזווית פגיעת שמש של 320. עבור הקונסטרוקציה והשירות הנחנו שידרשו 20% מהשטח. סה"כ לאור אילוצים אלו ולאחר הוספת מרווח ביטחון, נקבע שנדרש שטח של 8 מ"ר עבור התקנה של 1 קילו-וואט הספק סולארי.

הנתון שהיה מקובל בתחום בשנת 2019, עפ"י מתקני המערכות, היה כי השטח הנדרש ל-1 קילו-וואט הספק מותקן הוא כ-10 מטר מרובע בממוצע. אך השיפור בנצילות הפנלים הסולאריים הביא לכך שבשנת 2020 נדרש שטח של 8 מ"ר להתקנת הספק של 1 קילו-וואט.

<sup>24</sup>ראו פירוט של חברת Sunpower: "Maxeon tm gen ii solar cells," pp. 3-4, 2017

M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. HohlEbinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, "Solar cell 25 efficiency tables (version 52)," Prog. Photovoltaics Res. Appl., Vol. 26, no. 7, pp. 427-436, 2018

T. Tiedje, E. Yablonovitch, G. D. Cody, and B. G. Brooks, "Limiting efficiency of silicon solar cells," [ 26 IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 31, no. 5, pp. 711-716, 1984

<sup>27</sup> מכון המחקר NREL מפרסם תרשים המציג את התפתחות היעילות של תאים סולאריים בטכנולוגיות השונות. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

מספר זה משתנה מעט בהתאם לפרמטרים שונים, למשל במעבר ממערכת קרקעית למערכת על גג מבנה, או בזווית ההצבה של המערכת וכן בשקלול השטח המוקצה, עם הקונסטרוקציה ושטחי השירות.

נצילות זו, של 8 דונמים ל-1MW הספק מותקן, מושגת באמצעות פאנלים סולאריים בעלי יעילות ממוצעת של כ-20%<sup>28</sup>.

הנחנו כי השטח שיידרש לקונסטרוקציה ושטחי השירות יישאר 20% גם בעתיד, וכי השיפור בנצילות יגיע כולו משיפור היעילות של התאים הפוטו-וולטאיים.

להערכתנו שיפור של 20% בנצילות מערכות ה-PV בטווח של 10 שנים הוא בר השגה, וייתכן שהדבר עשוי לקרות עוד קודם ל-2030. בשנת 2020 החברות המובילות בתחום השיקו מוצרים עם נצילות שעולה על 21%, (זהו שיפור של 5% בנצילות שכבר הושג בתוך פחות משנה). כמו כן התקדמות בפיתוח פנלים בטכנולוגיות Bi-Facial עשויה אף היא לתרום לשיפור נוסף בנצילות הפנלים.

למרות שיקולים אלו, ומטעמים של זהירות ושמרנות, הסתמכנו במודל NZO על הערכות של חברת Bloomberg לשיפור שנתי של 1.6% בנצילות של מערכות PV משנת 2020 ועד לשנת 2040 (תחזיות השוק של חברת Bloomberg בתחום האנרגיה הינן לטווח של 20 שנה). הנחנו שהמשך השיפור בנצילות משנת 2041 ועד ל-2050 יעמוד על 1% בשנה. על בסיס נתונים אלו התקבל שיפור צפוי של 17% בנצילות המערכות עד ל-2030 ושיפור של 29% נוספים במשך 20 השנה הבאות עד ל-2050.

האתגר צפוי להיות בעלויות הייצור, שעלויות למנוע ייצור מסחרי – אם כי הניסיון מלמד שנמצאים מענים גם לאתגרים מסוג זה.

### מערכות עוקבות - Trackers

מערכות ה-PV נחלקות למערכות חד ציריות ודו-ציריות, אשר עוקבות אחר השמש במהלך שעות היום ומאפשרות להגדיל את התפוקה מהמערכת. טכנולוגיה זו מגדילה את התפוקה של המערכת הסולארית מתא שטח נתון. השיפור בתפוקה מגיע ל-25--35% במערכות חד-ציריות ועשוי להגיע עד ל-45% במערכות דו-ציריות. למרות שנדרש שטח גדול יותר עבור ההתקנה של מערכות עוקבות, ההספק המושג עבור יחידת שטח הינו גבוה יותר.

מגבלות השטח הקיים במדינת ישראל מעלות את הכדאיות של השימוש במערכות עקיבה, לכל הפחות בחלק מסוגי ההתקנות. המודל של תוכנית NZO בוצע על בסיס התקנות רגילות וללא שימוש במערכות עקיבה, אשר שילובן יאפשר הגעה ליעדי ייצור החשמל מאנרגיות מתחדשות תוך חסכון משמעותי בשטח.

## נספח ו': השוואה לעבודות נוספות שבוצעו בנושא

בינואר 2020 פורסמה עבודה שבוצעה על ידי המשרד להגנת הסביבה להערכת פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב הבנוי בישראל (להלן: "הגנ"ס, 2020"). כמו כן במסגרת המענה של רשות החשמל בתהליך ההיוועצות להעלאת היעד לאנרגיות מתחדשות ל-30% נכלל ניתוח של הפוטנציאל הסולארי בישראל (להלן: "רשות החשמל, 2020").

תכנית NZO התבססה על נתונים אשר פורסמו בעבודות אלו, ובדגש על הניתוח המפורט אשר בוצע על ידי המשרד להגנת הסביבה עבור הפוטנציאל הסולארי במרחב הבנוי ובשטחים מופרים נוספים. חלק מהנתונים במסמך הגנ"ס 2020 עובדו במסגרת תכנית NZO על בסיס מידע שהצטבר מאז לצורך ניתוח מדויק יותר. להלן ההבדלים בין הנתונים בתכנית NZO לבין הפרסומים שהוזכרו לעיל.

### השוואה למסמך הגנ"ס, 2020

#### שטחים מופרים נוספים

בנוסף לסוגי השטחים אשר נכללו בהגנ"ס, 2020, הפוטנציאל הסולארי בתכנית NZO כולל גם את סוגי השטחים הבאים:

- אגרי-וולטאי
- שטחים חקלאיים בישובים – על פי תמ"א 10/ד/10
- שטחים בשליטת מערכת הבטחון

מאגרי מים – תכנית NZO הניחה שהפוטנציאל במאגרי המים גדול יותר מאשר ההנחות שנקבעו בעבודת הגנ"ס, 2020.

שטחים קרקעיים – הניתוח של הגנ"ס 2020 התייחס לשטחים מבונים ומופרים ולא כלל ניתוח של הפוטנציאל הסולארי בשטחים הפתוחים. תכנית NZO כללה את השטחים אשר אושרו להקמת שדות סולאריים קרקעיים במסגרת תמ"א 41.

### הנחות עבודה – שטח נדרש להתקנת 1 קילו-וואט של הספק מותקן

מסמך הגנ"ס, 2020 הניח שנדרשים 10 מ"ר לייצור קילוואט והשיפור הצפוי הוא 1.6% בשנה, עד ל-2030. תכנית NZO חושבה על פי 8 מ"ר להתקנת הספק של 1 קילוואט על גגות, נתון המשקף את המצב הקיים היום בשטח. כמו כן ההנחות לשיפור הנצילות של מערכות PV חושבו עד לשנת 2050.

### פוטנציאל לשנת 2050

מסמך הגנ"ס, 2020 העריך בפוטנציאל להספק סולארי מותקן בשנת 2050 תרחיש מינימום ותרחיש מקסימום. בתכנית NZO, נלקחו ערכים ריאליים לכל אחד מסוגי השטחים, ולסוגי השטחים אשר בהם התבססנו על נתוני הגנ"ס, נלקח הממוצע בין 2 ערכים אלו.

### השוואה למסמך רשות החשמל, 2020

ניתוח השטחים אשר בוצע במסמך רשות החשמל, 2020 מפורט בקובץ אקסל שפרסמה הרשות. סיכום הפוטנציאל כפי שמופה על ידי רשות החשמל מוצג להלן:

הספק (MW)	פוטנציאל בדונם	סוג פוטנציאל
3,461	34,920	קרקעי
5,079	41,933	גגות
5,558	45,888	מאגרים
240	2,420	מחלפים
4,955	50,000	פוטנציאל קרקעי בשטחי יהודה ושומרון, שטחי אש וקרקעות בדואים פרטיות
606	5,000	שימושים דואליים נוספים
<b>19,898</b>	<b>180,161</b>	<b>סה"כ</b>
<b>3,719</b>		<b>הספק סולארי עד שנת 2020 (כולל)</b>

### הנחות עבודה - שטח נדרש לייצור קילו-וואט

נתוני רשות החשמל מבוססים על הנחות עבודה של 9 מ"ר לקילו-וואט בהתקנה בגגות ו-11 מ"ר לקילו-וואט בהתקנות קרקעיות. נתונים אלו אינם מעודכנים בהתאם לשיפורים שחלו ביעילות של הפנלים הסולאריים. תכנית NZO חושבה על פי 8 מ"ר ל קילו-וואט על גגות ו-8.8 מ"ר לקילו וואט בהתקנות קרקעיות. נתונים אלו משקפים את השיפורים הטכנולוגיים הקיימים והינם על בסיס הסטנדרט המקובל כיום בקרב העוסקים בתחום.

### סוגי שטחים נוספים

תכנית NZO כוללת התייחסות לפוטנציאל הסולארי בסוגי שטחים רבים אשר לא נכללו בהערכת רשות החשמל. לדוגמא התקנות במודל של דו-שימוש על כבישים ובמודל אגרי-וולטאי. התקנות במודל דו-שימוש בסוגי השטחים הנוספים תורמות באופן משמעותי להגדלת הפוטנציאל הסולארי, תוך שמירה על השטחים הפתוחים.

### שטחים בשליטת מערכת הביטחון

בשל מגבלות מידע לא ניתן לבצע הערכה מפורטת של הפוטנציאל הקיים להקמת מערכות PV בשטחים הנמצאים בשליטתה של מערכת הביטחון. הערכתנו הינה שקיים פוטנציאל גבוה להתקנות PV ברחבי הבסיסים ובכלל זה בצידי הבסיסים, על הגנות ולאורך כבישי הגישה לבסיסים. כתוצאה מכך הפוטנציאל המוערך בתכנית NZO גבוה באופן משמעותי מהערכה של רשות החשמל.

### טווח זמן

הניתוח של רשות החשמל בוצע עד לשנת 2030 ותכנית NZO בוצעה בראייה ארוכת טווח עד לשנת 2050. שינוי בתקני הבניה והגדלת המודעות לאנרגיה סולארית צפויים להביא להגדלה של היקף השטחים הזמינים להתקנת PV ויאפשרו הגדלת פוטנציאל הייצור הסולארי בישראל.

## נספח ז': תרחישים נוספים להתקנת מערכות סולאריות

### בחירת הפוטנציאל המקסימלי

המחקר מבוסס על הנחות לגבי היקף ההתקנות אשר יבוצעו בכל אחד מסוגי השטחים. הפוטנציאל הקיים להתקנות בדו-שימוש הינו גבוה יותר, במרבית סוגי השטחים, ויאפשר לספק מענה לצרכי החשמל העתידיים של המדינה, ללא שימוש בשטחים הפתוחים, אף בתרחיש שבו הביקוש לחשמל יהיה גבוה מהתחזית הקיימת בתכנית NZO. הטבלה להלן מרכזת את הפוטנציאל הכולל בחלוקה לסוגי השטחים המרכזיים, ומראה שניתן יהיה לממש את התקנת המערכות הסולאריות במגוון תרחישים של התקנות תוך הסתמכות על התקנות בדו-שימוש.

הערות	ייצור שנתי TWh - ב	הספק מותקן GW	סוג שטח
על בסיס התרחיש המקסימלי לשנת 2050 במסמך המשרד להגנת הסביבה.	93	54.7	שטח מבונה
על בסיס שימוש ב-30% מהכבישים.	303	17.8	כבישים
בהנחה של שימוש ב-2% מהשטחים אשר בשליטת מערכת הביטחון להקמת מערכות PV.	44	25.8	בסיס צבא
בהנחה של שימוש ב-10% מהשטחים החקלאיים במדינה להתקנת מערכות PV במודל של דו-שימוש.	74	43.5	אגרי-וולטאי
	17.9	10.5	מאגרי מים
סוגי השטחים בקטגוריה זו מופו במסגרת עבודת המשרד להגנת הסביבה.	35.9	21.2	שטחים מופרים נוספים – חניות, מתחמים שונים ואזורי תעשייה
התרחיש מניח שימוש ב-60,000 דונם אשר יוסבו לשדות סולאריים במקום השימוש החקלאי בהם.	13.3	7.8	שטחים בישובים חקלאיים – על פי תמ"א 10/ד/10
התרחיש מניח הרחבת שטחים אשר יאושרו להקמת חוות סולאריות עד להיקף שהוצע למימוש בתמ"א 41 בסוף 2020.	9.6	5.6	שטחים פתוחים
	<b>319</b>	<b>188</b>	<b>סה"כ</b>





תכנית לאומית לאנרגיה מתחדשת