



NZO

תוכנית לאומית לאנרגיה מתחדשת

2050 עד 95%

חשמל ממקורות מתחדשים בישראל

פרק א'





Net Zero
Emissions

היעד:

**ייצור 95% מהחשמל בישראל
ממקורות מתחדשים**

אין זו אנדה

ינואר 2021

אודות

עבודה זו גובשה על ידי צוות NZO במרכז השל לקיימות. 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.

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.

אסטרטגיית השינוי של מרכז השל נגזרת מגודל האתגר ודחיפותו. מרכז השל מקיים פעילות ענפה ברמה המקומית המדגימה שהחיים משתפרים כשמתנהלים באופן מקיים, ורישות 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.

מחקר, עיבוד הנתונים והיגוי: צוות פרוייקט NZO
כתיבה ועריכה: "לקראת הימים הבאים" (חברה בע"מ), יניב כרמל וארז רביב
גרפיקה: סטודיו "החבורה"

ליצירת קשר ופרטים נוספים - 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
10	המלצות למדיניות
12	הרקע לתוכנית NZO 2050
13	משבר האקלים
14	משבר האקלים וישראל
15	גז אינו "דלק נקי"
17	בעולם – השינוי כבר כאן
18	היעד של עבודה זו, וצורת העבודה
21	שאלת המחקר
22	פרק א' - מקורות האנרגיה לייצור חשמל
22	רקע על מקורות האנרגיה הזמינים
22	אנרגיה פוסילית
23	אנרגיה סולארית
25	אנרגיית רוח
25	אנרגיה המופקת מפסולת
26	אתגר הזמינות של אנרגיה מתחדשת
27	הפתרון: אגירה של אנרגיה וחשמל
28	פרק ב' - הביקוש לחשמל 2050-2021
28	הערכת הביקוש השנתי לחשמל
30	הערכת הביקוש השעתי לחשמל
33	פרק ג' - תמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל
33	המודל לבחינת תמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל
33	בחינת המענה לביקוש וההשלכה הסביבתית
34	אופן חישוב עלויות ייצור החשמל
36	תחזית מרכיבי העלות להפקת חשמל ממקורות שונים
37	ממצאים מדגמיים ומסקנות מהמודל האנליטי
43	תרחיש "עסקים כרגיל" - BAU
44	פרק ד' - ממצאי המחקר והתרחיש האופטימלי
46	תרחיש NZO, התרחיש האופטימלי – סביבתי וכלכלי
47	ההיבט הסביבתי
49	ההיבט הכלכלי
51	עלויות ייצור החשמל
57	אחרית דבר
60	נספחים
60	נספח א' – אגירה של אנרגיה וחשמל
63	נספח ב' – מילון מושגים, יחידות מידה וקיצורים
67	נספח ג' – החברים והחברות בצוות NZO 2050
70	נספח ד' – תודות

תקציר

האם החזון של משק אנרגיה דל פליטות בישראל, הינו מעשי? כלומר: האם ניתן לספק את צרכי החשמל של המדינה במשך כל השנה ולאורך כל היממה על בסיס אנרגיות מתחדשות, בהינתן צרכי החשמל ההווים והעתידיים. לשם בירור מעמיק של שאלה זו יש להתייחס לשורה של שאלות משנה העולות ממנה, ביניהן: באילו תנאים אנרגיות מתחדשות עשויות לספק את מלוא צריכת החשמל; האם ישנו די שטח להפקת אנרגיות מתחדשות (עם דגש על אנרגיה סולארית) להפקת החשמל הנדרש לכל פגיעה קשה בשטחים הפתוחים; ומה העלות הנדרשת, בהשוואה למצב הקיים והצפוי. עבודה זו, אשר יש לראותה כחלק ממכלול של פרסומים אשר צפויים לטפל בשאלות המוזכרות לעיל, ממוקדת בשאלה מהו היעד שיש לקבוע ביחס לחלקן של אנרגיות מתחדשות בייצור החשמל בישראל?

שר האנרגיה, ח"כ ד"ר יובל שטייניץ, הודיע ביולי 2020 כי הוא מציב יעד של 30% ב-2030. כלומר, לפי מדיניות הממשלה, כ-70% ומעלה מהחשמל הנצרך בישראל ייוצר (עד 2030 ולאחריה) ממקורות פוסיביים, מדלקים מזהמים, והשאר ייוצר ממקורות אנרגיה מתחדשים.

תהליכים בתחום האנרגיה אורכים שנים רבות. יש לקבוע את היעד לחלקן של אנרגיות מתחדשות בייצור החשמל לשנת 2050

הודעת השר שטייניץ מהווה שיפור מבורך ביחס למדיניות עד כה, אך האם זהו היעד הנכון? 30% ב-2030? או שיש לקבוע יעד אחר?

עבודה זו מניחה את המסד התיאורטי הנדרש לצורך קביעת היעד לחלקן של האנרגיות המתחדשות בייצור החשמל בישראל. ראשית, מתוך הכרה כי תהליכים בתחום האנרגיה והחשמל אורכים שנים רבות, יש למתוח את פרק הזמן הנדון. השאלה שאנו שואלים היא מהו היעד שיש לקבוע בראייה לטווח ארוך.

שנית, עבודה זו שואפת להתמודד עם כמה דעות קדומות והנחות יסוד מוטעות בדבר אנרגיות מתחדשות, ובפרט ההנחה המוטעת כי אין ביכולתן לתת מענה מלא לביקוש לחשמל.

עבודה זו מראה כי ניתן לתת מענה לכ-95% מהביקוש השנתי לחשמל בשנת 2050 באמצעות אנרגיות מתחדשות. תרחיש שכזה, המכונה להלן תרחיש NZO 2050,

יביא להפחתה של למעלה מ-90% בפליטות גזי החממה התורמים למשבר האקלים בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל", המבוסס על המדיניות הנוכחית של הממשלה. תרחיש NZO 2050 הוא לא רק נקי יותר ועל כן בריא יותר, הוא גם מוצדק כלכלית. מאחר ומימוש התרחיש איננו מחייב השקעות מעבר לתרחיש "עסקים כרגיל". לצורך קביעת היעד הנכון לחלקן של האנרגיות המתחדשות בחשמל הנצרך בישראל הצבנו שאלה פשוטה:

מהו השימוש האופטימלי במקורות האנרגיה לייצור חשמל בישראל בשנים 2021 עד 2050, בהתחשב בשלושה פרמטרים: הראשון – מענה לביקוש לחשמל; השני – צמצום פליטות מזיקות לסביבה ולאדם; והשלישי – עלות כלכלית נמוכה ככל הניתן. לשם המענה על שאלה זו ייבחנו (בפרק א') מקורות האנרגיה לייצור חשמל העומדים לרשותנו. המקורות העומדים לרשותנו הם דלקים פוסיליים – ובעיקר גז; ואנרגיה ממקורות מתחדשים – בעיקר אנרגיה סולארית. כפי שיוסבר, על מנת לנצל את המקורות המתחדשים בצורה מיטבית יש צורך גם לפתח יכולות לאגירת חשמל או אנרגיה. בפרק ב' יוערך הביקוש לחשמל בישראל, באופן שנתי ובאופן שעותי, בשנים 2021 עד 2050. בהתבסס על הערכות של הגופים המוסמכים בישראל וניתוחן. בפרק ג' יתואר האופן בו נבחנו אלפי תמהילים שונים של מקורות אנרגיה לייצור חשמל, להם קראנו תרחישים, באמצעות מודל ממוחשב שתוכנן באופן ייעודי לעבודה זו. כל תרחיש נבחן על פי עמידתו בשלושת הפרמטרים שצוינו בשאלת המחקר: המענה לביקוש, ההשלכות הסביבתיות והעלות הכלכלית. בפרק ד' נציג את התרחיש האופטימלי שעלה במחקר זה. התרחיש ישווה לתרחיש "עסקים כרגיל" (BAU – Business As Usual), כלומר התרחיש שמתאר את המשך המדיניות הממשלתית הנוכחית. נציין כי פירמת רואי החשבון הבין לאומית דלוויט (Deloitte) ביצעה בקרה חיצונית להיבט הכלכלי של המודל והנחות היסוד בהן השתמשנו. הבקרה החיצונית אישרה את התוקף של המודל, הנחות היסוד והמסקנות שנמשכו ממנו. מימוש תרחיש NZO 2050 בישראל תואם לשינוי המתרחש בתחום האנרגיה בעולם – מעבר לייצור חשמל ממקורות מתחדשים. ב-2019, 72% מיכולת ייצור החשמל שנוספה בעולם הייתה ממקורות מתחדשים, והחלק הארי של המקורות המתחדשים היה אנרגיה סולארית¹. בתרחיש שגובש למעלה מ-90% מהחשמל שייוצר בישראל יגיע מאנרגיה סולארית, מקור אנרגיה שישראל משופעת בו.

1 כך על פי דו"ח של סוכנות האנרגיה המתחדשת הבין לאומית. ראו: Renewable Capacity Statistics 2020, IRENA, March 2020

אנרגיה סולארית מופקת בשעות האור ואינה זמינה בכל שעות היממה, בנוסף לכך בחלק מעונות השנה יכולת הייצור הסולארי קטנה באופן משמעותי. ניתן להתגבר על אתגר זה באמצעות אנגיה, ייצור חשמל מעבר לביקוש בשעות השיא של הייצור, והזרמת העודף למערכות אנגיה חשמל. החשמל האגור יוזרם לרשת החשמל בשעות בהן אין ייצור של אנרגיה סולארית (כך ניתן לספק חשמל שהופק מאנרגיה סולארית בשעות הלילה, לדוגמה).

אנגיה חשמל בהיקף נרחב לא הייתה כדאית כלכלית עד לאחרונה. אולם, הירידה המשמעותית במחיריהן של מערכות אנגיה, והצפי להמשך ירידת מחירים, מאפשרת להתבסס על ייצור אנרגיה סולארית בשילוב אנגיה כמקור המרכזי (Baseload) לאספקת החשמל.

תרחיש NZO יביא להפחתה של מאות מיליוני טונות פליטות מזיקות לסביבה ולאדם ולחסכון של מיליארדי שקלים, בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל", המייצג כאמור את המשך המדיניות הקיימת של ממשלת ישראל בתחום.

תרחיש NZO הוא כדאי מבחינה סביבית ובריאותית וללא צורך בהגדלת ההשקעות של המשק בתחום האנרגיה

המלצות למדיניות

לאור המסקנות העולות מעבודת המחקר שתוצג להלן, אשר מציבות את תרחיש NZO כתרחיש ריאלי, במסגרתו כ-95% מהחשמל הנצרך בישראל ייוצר ממקורות מתחדשים, אנו מבקשים להניח בפני מקבלי החלטות במגזר הציבורי, בחברה האזרחית, במגזר העסקי ובאקדמיה, מספר המלצות למדיניות.

הרובד האסטרטגי

- הגדרת מדיניות לאומית למעבר לאנרגיות מתחדשות** - קבלת החלטה אסטרטגית למעבר למשק אנרגיה מבוסס אנרגיות מתחדשות תוך הגדרת אבני דרך ויעדים המותאמים להמלצות ה IPCC. בהתאם להמלצות אלו קביעת יעדים לאנרגיה מתחדשת בישראל: 50% ב-2030 ו-95% ב-2050.
- תכנון כולל ברמה הלאומית** – תכנון ארוך טווח למעבר המדינה למשק אנרגיה דל פליטות תוך יצירת שתוף פעולה כולל של משרדי הממשלה השונים, המגזר המוניציפלי והמגזר העסקי.

3. **מועצת האקלים** – הקמת גוף מקצועי במימון המדינה שייעץ לממשלות ישראל בכל הקשור להפסקת פליטות גזי חממה מישראל ובדומה ל-Committee on Climate Change הקיימת באנגליה.

הרובד המעשי

שחרור חסמים, עידוד פתרונות ומתן כלים בידי סוכני שינוי לקידום הפקת החשמל מאנרגיות מתחדשות.

4. **מיצוי פוטנציאל הייצור הסולארי** – קביעת תקני בנייה אשר יעודדו ואף יחייבו ייצור אנרגיה במבנים חדשים ויגדילו למקסימום הקמת מערכות PV בשטח בנוי. אסדרת השימוש הדואלי (התקנת מערכות PV בנוסף לשימוש העיקרי של השטח ו/או המבנה), בכל השטחים המופרים המאפשרים זאת. יצירת כלים להנגשת מידע לציבור על התקנת מערכות PV ומנגנונים למימון.

5. **אגירה** – סיוע בשילוב מערכות אגירה ברשת החשמל על ידי עידוד הקמת מתקני אגירת חשמל כחלק אינטגרלי מכל מתקן PV חדש שיוקם. קביעת מודל עסקי אשר יעודד התקנת מערכות אגירה במתקני PV קיימים. קידום אגירה ביתית ובמבנים מסחריים (Behind the meter), ושילוב יכולות האגירה של רכבים חשמליים כאמצעי אגירה ברשת החשמל.

6. **בהיבט הכלכלי והחברתי** – בחינה צופה פני עתיד של כל היבטי ייצור החשמל מתוך שאיפה ליצור משק אנרגיה מבוזר והוגן, על בסיס ראייה חברתית של נגישות לחשמל זול, כזכות בסיסית בחברה מתקדמת.

7. **פיתוח תעשיית אנרגיות מתחדשות בישראל** – השקעה ממשלתית במחקר, פיתוח ועידוד חדשנות בתחום האנרגיות המתחדשות ופיתוח יכולות טכנולוגיות ויכולות ייצור בתחום.

8. **ביטול התמיכות העקיפות למשק הגז** – השתת מלוא העלויות המושקעות בפיתוח משק הגז בישראל והגנתו על עלויות הגז, והימנעות מהשקעות עתידיות ברשת הולכת הגז.

הרקע לתוכנית NZO 2050

“מדינת ישראל עומדת להפוך למדינה הצפופה במערב. האם נחנק בעתיד מהזיהום שאנו מייצרים? מהזיהום הנפלט יום-יום ושעה-שעה מעשרות תחנות הכוח לייצור חשמל, ממיליוני המכוניות בכבישים וברחובות, ומהמפעלים ובתי-החרושת? האם כתוצאה מהתפתחויות חיוביות לכאורה, כמו גידול דמוגרפי, צמיחה כלכלית, ועליה ברמת החיים – יהפכו חיינו בארץ הזאת לגיהנום? האם בעוד עשרים שנה נאלץ לחיות בבתנו מאחורי פילטרים ומסנני אוויר וללבוש על פנינו ברחובותינו מסכות נייר כמו בביגיין?”

**“הצלת ישראל מאנרגיה מזהמת”
שר האנרגיה יובל שטייניץ**

מילים אלו, שקיבלו מימד אירוני בעקבות משבר הקורונה, פותחות את מסמך המדיניות של משרד האנרגיה הקרוי “יעדי משק האנרגיה לשנת 2030”.² שר האנרגיה מוסיף ומצהיר בהקדמה למסמך, כי צו השעה הוא “הצלת ישראל מאנרגיה מזהמת”. השר מדגיש את ההערכה כי בישראל מתים בכל שנה כ-2,200 איש ואישה בגלל זיהום האוויר, וכי ניתן למנוע, ולמצער לצמצם, תמותה זו.³

דא עקא, שהתוכנית שבאה בעקבות הצהרות אלו, רחוקה מאוד מלהשיג את היעדים החשובים שהיא מציבה.

התוכנית של משרד האנרגיה הגדירה כמטרה עיקרית את סגירת יחידות ייצור החשמל הפחמיות, כאשר את מקומן יתפסו יחידות ייצור חשמל בגז. בסוף שנת 2019 השר הצהיר על כוונתו להעלות את היעד לייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות לכ-25% עד 30%.⁴ לאחר הליך היועצות עם רשות החשמל פורסמה בחודש יולי 2020 החלטת השר לקביעת יעד לאנרגיות מתחדשות של 30% בשנת 2030.⁵

אנחנו מברכים על השינוי החיובי בהעלאת היעד לאנרגיות מתחדשות לשנת 2030 מ-17% ל-30%. זהו צעד חשוב מאוד להכוונת המשק בכיוון הנכון, אך עדיין התכנון של

2 [יעדי משק האנרגיה לשנת 2030: מסמך מדיניות](#), משרד האנרגיה, מרץ 2019.

3 [THE RISING COST OF AMBIENT AIR POLLUTION IN THE 21ST CENTURY](#), Nils Axel Braathen, OECD Environment Directorate, March 2017.

4 [דו"ח בריאות וסביבה בישראל 2017](#), משרד הבריאות, הקרן לבריאות וסביבה, 2017.

5 [הפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק](#), החלטת ממשלה 542, 20.09.2015. [שר האנרגיה שטייניץ יוזם: היעד החדש לייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות לשנת 2030 יהיה 25-30%](#), דוברות משרד האנרגיה, 17.11.2019.

6 [עקרונות מדיניות: הגדלת יעדי ייצור חשמל באנרגיות מתחדשות](#), שר האנרגיה יובל שטייניץ, 29 ביולי 2020.

משרד האנרגיה הינו לבסס את משק האנרגיה על דלקים פוסיליים (מאובנים), אשר ישמשו לייצור 70% מהחשמל תוך המשך פליטת גזי חממה וזיהום אוויר. מצאנו אפוא, כי ישראל טרם השכיחה ליצור תוכנית מקיפה להתמודדות עם נושא ייצור החשמל באופן שאינו מזיק לסביבה ולאדם. משרדי הממשלה ומקבלי החלטות קושרים את העתיד האנרגטי של ישראל למאגרי הגז שהתגלו במימיה הכלכליים של ישראל. זהו כיוון מוטעה שאין בכוחו לסייע בהתמודדות עם משבר האקלים העולמי.

משבר האקלים

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 החיים של הילדים והנכדים שלנו בעשורים שיבואו. בידי הממשלות והתעשייה להאט את שינויי האקלים הקיצוניים, אשר את תוצאותיהם הראשונות אנו רואים כבר כיום בעליית טמפרטורות וגלי חום, המסת הקרחונים בקטבים, עליית מפלס המים, הצפות, שיטפונות, בצורות והתחזקות תדירות ועוצמת אירועי קיצון.⁶ כל אלו צפויים לגרום למחסור חמור במים ומזון, הגירות פליטים המוניות,⁷ התפרצות מגיפות, מלחמות, ירידה באיכות חיי בני האדם ואובדן עצום במגוון הביולוגי. מדינת ישראל צפויה לסבול מהשלכות משבר האקלים באופן חריף יחסית, בשל מיקומה הגיאוגרפי ואקלימה היבש יחסית מלכתחילה.⁸

לפי הפאנל הבין-ממשלתי של האו"ם בנושא שינויי האקלים (ה-IPCC), הסכנות המתוארות לעיל עתידות להתרחש אם הטמפרטורה הממוצעת בעולם תעלה ב-1.5°C בהשוואה לטמפרטורות טרום העידן התעשייתי.⁹ על מנת למנוע את עליית הטמפרטורה מעבר למעלה וחצי, יצטרכו מדינות העולם לקצץ את פליטות גזי החממה ב-50% עד לשנת 2030 וב-100% עד 2050. חלק ניכר ממדינות העולם המערבי אימצו יעדי הפחתה

6 ראו בין רבים באתר ייעודי של סוכנות החלל האמריקאית העוקב אחר שינויי האקלים (נדלה 8 באוקטובר): [The Effects of Climate Change](#), NASA ראו גם:

Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

7 02.05.2016, Max Planck Gesellschaft, [Climate-exodus expected in the Middle East and North Africa](#) [How the Middle East is suffering on the front lines of climate change](#), Douglas Broom, World Economic Forum, 05.04.2019

9 Inter-governmental Panel on [Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems](#) 9 Climate Change (IPCC), 2018

של בין 80%-100 מסך הפליטות הנוכחי עד 2050. ערים גדולות ותאגידים בינלאומיים אימצו אף הם יעדי ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות.¹⁰ אולם השפעות שנוי האקלים מלמדות על הצורך לבצע הורדה מהירה יותר של פליטות גזי החממה בעולם. יש לקוות שהמודעות הגוברת לסוגיית האקלים תניע את ממשלות העולם ומקבלי החלטות במגזר העסקי ואת החברה האזרחית להתמודד עם האתגר הזה בכל החומרה הנדרשת.

משבר האקלים וישראל

ישראל צריכה, ואף מחוייבת לכך מתוקף החתימה על הסכם פריז, להשתתף במאמץ הבינלאומי למניעת התוצאות ההרסניות של משבר האקלים.¹¹ ככל שהעולם מתקדם בניסיון למתן את ההשפעות של משבר האקלים, תהיה זו שגיאה מדינית, סביבתית וככלכלית עבור ישראל להישאר מאחור, גם אם ההשפעה הישירה של ישראל הקטנה על האקלים הגלובלי זניחה יחסית. בנוסף, ישנם היבטים אזוריים של משבר האקלים שנושאים בחובם השפעות קשות על ישראל (בעיקר תופעת המדבור ועליית הטמפרטורה הממוצעת). כמו כן, ישנה חשיבות עליונה בצמצום זיהום האוויר, על מנת להפחית את מספרי התמותה והתחלואה.

לא מיותר לציין גם את האפשרויות הנפתחות בפני המשק הישראלי לנוכח ההזדמנות להשתלב ואף להוביל בתחומי החדשנות, המחקר והפיתוח בעולם האנרגיה והחשמל העתידי. ישראל מתגאה לא פעם, ובצדק, בהיותה אומת הסטארט-אפ, והיא יכולה לפעול לפיתוח של תעשיית היי-טק אשר תפעל בתחומים אלו ותשתלב בתעשיית האנרגיה החדשה בעולם.

ממשלת ישראל התחייבה להיערך לשינוי האקלים ולהפחית בפליטת גזי החממה בהחלטות ממשלה 474 (2009)¹² ו-1504 (2010).¹³ באפריל 2016 אישרה ממשלת ישראל מחדש את התוכנית הלאומית להפחתת פליטת גזי חממה ולהתייעלות אנרגטית.¹⁴ התוכנית נועדה לקדם את השגת היעד הלאומי להפחתת פליטת גזי חממה, עליו

10 לדוגמה: 87 תאגידים רב-לאומיים שלקחו על עצמם יעדים סביבתיים, [הודעה לעיתונות](#), IPCC, ספטמבר 2019

11 [אשרור הסכם פריז בדבר התמודדות בינלאומית עם שינוי אקלים](#), החלטת ממשלה 2041 מיום 14 בנובמבר 2016

12 [היערכות ישראל לשינוי אקלים - היערכות ומוכנות לשינוי אקלים והפחתת פליטות גזי חממה](#), החלטת ממשלה 474, מיום 25 ביוני 2009.

13 [גיבוש תוכנית לאומית להפחתת פליטות גזי חממה](#), החלטת ממשלה 1504, מיום 14 במרץ 2010.

14 [תוכנית לאומית ליישום היעדים להפחתת פליטות גזי חממה ולהתייעלות אנרגטית](#), החלטת ממשלה 1403, מיום 10 באפריל 2016.

התחייבה מדינת ישראל בוועידת האקלים בפריז בדצמבר 2015, הכולל את העלאת השימוש באנרגיות מתחדשות להיקף של 17% מצריכת החשמל המשקית בשנת 2030.¹⁵ בדצמבר 2019, הכריז שר האנרגיה בנאומו בוועידת מדריד, על כוונתו להעלות את היעד ל-30%-25%.¹⁶ בהמשך לכך השר פנה אל רשות החשמל בבקשה להיוועצות בנושא. רשות החשמל פרסמה ב-18 ביוני 2020 טיוטה להתייחסות הציבור, הכוללת ניתוח טכני וכלכלי מפורט והמלצה על העלאת היעד ל-30% בשנת 2030.¹⁷ ב-29 ביולי 2020 פרסם שר האנרגיה את החלטתו על העלאת היעד של שימוש באנרגיות מתחדשות ל-30%, כאמור.

המשרד להגנת הסביבה מעריך שהפוטנציאל הקיים באנרגיה סולארית גבוה יותר, זאת על סמך עבודה מקיפה שביצע אשר ניתחה את הפוטנציאל לייצור חשמל מאנרגיה סולארית בישראל. ממצאי העבודה עולה שבשנת 2030 יהיה פוטנציאל לייצור של 43% מצרכי החשמל של ישראל מאנרגיה סולארית, ובשנת 2050 הפוטנציאל יגיע עד ל-81% (העמקה בנושא תפורסם במסגרת מסמך "תכנית NZO - פוטנציאל ייצור החשמל ממקורות מתחדשים"), כל זאת בניצול השטח הבנוי בלבד.¹⁸

הממשלה קושרת את עתידה האנרגטי של מדינת ישראל למאגרי הגז שהתגלו במימיה. זו שגיאה קשה

גז אינו "דלק נקי"

כפי שתואר לעיל, ממשלת ישראל מבססת את מדיניותה הסביבתית והאנרגטית על ההבטחה הגלומה במעבר מדלקים מזהמים ל"גז טבעי". זו אסטרטגיה שגויה ונבהיר מדוע.

גילויים של מאגרי גז במים הכלכליים של ישראל הינו התפתחות חיובית ברמה הכלכלית והגיאופוליטית. אולם יש לשים לב כי "גז טבעי", המונח בו נעשה שימוש לצורך קידום השימוש במאגרי הגז, אינו יותר "טבעי" מאשר דלקים פוסיליים אחרים. בתהליך ניקוי הגז נפלטות לסביבה כמויות גדולות של מתאן ופחמן דו-חמצני, פליטות

¹⁵ [ועידת האקלים בפריז הסתיימה באימוץ הסכם אקלים עולמי חדש](#), הודעת המשרד להגנת הסביבה, דצמבר 2015.

¹⁶ [דברי שר האנרגיה שטייניץ בוועידת האקלים במדריד](#), דוברות משרד האנרגיה, דצמבר 2019.

¹⁷ [טיוטה להתייחסות הציבור – הגדלת יעדי ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות ל 30% בשנת 2030](#), רשות החשמל, 18 ביוני 2020.

¹⁸ יצוין כי ישנו פער בין האופן שבו הוערך הביקוש העתידי לחשמל במסמך שהוכן בעבור המשרד להגנת הסביבה ובעבודה זו. הפער נובע מההנחה שונקטה בעבודה זו של הגדלת הביקוש לחשמל אשר תבצע מ"חישמו" התחבורה והתעשייה.

התורמות להתחממות הגלובלית. המתאן הנפלט בתהליך הפיכת הגז לדלק הניתן לשימוש בתעשיית האנרגיה תורם לאפקט החממה פי 84 יותר מאשר פחמן דו-חמצני בכמות דומה לאורך 20 שנה.¹⁹ לכן, על אף שהפקת חשמל מגז פולטת פחות פחמן דו-חמצני בהשוואה להפקתו מפחם, הפליטה של המתאן במהלך תהליך ההפקה מעלה באופן משמעותי את תרומתו להתחממות הגלובלית.

פליטת המתאן קשה יותר למעקב מפליטת פחמן דו-חמצני, אך מחקר עדכני של מכון EDF מצא כי שיעורה בארצות הברית גבוה ב-60% ממה שהעריכה הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה עד כה.²⁰

בנוסף לכך בעת הפקת הגז נפלטת חומרים נדיפים מזיקים (כגון בנזן), אשר יוצרים זיהום אוויר הגורם לעלייה בתחלואה ולתמותה.

מדינת ישראל צפויה לסבול מהשלכות משבר האקלים באופן חריף יחסית, בשל מיקומה הגיאוגרפי ואקלימה היבש יחסית מלכתחילה

לגז כדלק יש יתרון לעומת פחם. בעת ייצור חשמל באמצעות גז נפלטת פחות חומרים מזיקים לסביבה ולאדם, לעומת ייצור חשמל בפחם. עם זאת, בהתבוננות כוללת על טביעת הרגל הסביבתית של הגז, אשר לוקחת בחשבון את תהליך הפקתו והולכתו, יתרון זה נשחק ויתכן שאף אובד. הדימוי החיובי המופרז לגז כ"דלק נקי", אשר נוצר בישראל, מנציח את התלות של ישראל בו לעשורים הבאים, תוך התעלמות מההשלכות השליליות של "התמכרות" זו. התוצאה היא המשך הסבסוד הכלכלי הניתן לדלקים פוסיכיים, על ידי מימון הקמת קווי הולכה ואי הפנמת עלויות זיהום האוויר ופליטת גזי החממה לתוך עלות השימוש בגז.

יש לראות בגז כ"דלק מעבר" לטובת המעבר מאנרגיה פוסיכית לאנרגיה מתחדשת. השיפורים הטכנולוגיים וירידת המחירים המתמשכת של מערכות ה-PV ומערכות אגירת חשמל, מציבים את העולם בעמדת טובה לביצוע המעבר הזה.

ממסקנות עבודה זו עולה כי הפוטנציאל להפקת אנרגיה סולארית בישראל מאפשר

[Methane: The other important greenhouse gas](#), Environmental Defense Fund 19 לדיון והשוואה בין פחמן דו-חמצני ומתאן, ראו גם:

[Understanding Global Warming Potential](#), United States Environmental Protection Agency

[Major studies reveal 60% more methane emissions](#), Mark Brownstein, Steven Hamburg, Ramón 20 Alvarez, Environmental Defense Fund ,2019

להסתמך עליה כמקור אנרגיה מרכזי וזאת בעלויות כלל משקיות נמוכות יותר בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל". על מנת לאפשר מיצוי פוטנציאל זה, יש לשנות את ההחלטות אשר מייצרות הסתמכות עתידית של משק האנרגיה על גז, החלטות שיהפכו לנטל על הצרכנים בשנים הקרובות.

ישראל, כסטרט-אפ נייטן, עשויה להוביל את המאמץ העולמי לפיתוח תעשיית האנרגיה הנקייה

בעולם – השינוי כבר כאן

מספר מדינות כבר הכריזו על כוונתן לייצר את כלל החשמל במדינה מאנרגיות מתחדשות עד שנת 2050 ובהן דנמרק, אנגליה, ספרד ופורטוגל. שבדיה מחויבת ליעד זה כבר בשנת 2040,²¹ ואילו מדינה מתועשת במיוחד כמו גרמניה מחויבת ל-65% אנרגיות מתחדשות עד שנת 2030 ו-80% בשנת 2050.²² בתוך ארצות-הברית ישנן מדינות אשר הגדירו יעדים פנים מדינתיים כמו 100% ב-2045 במדינת קליפורניה, המהווה לבדה את הכלכלה החמישית בגודלה בעולם.²³

חלק מהמדינות המתועשות בעולם מצליחות כבר היום להשיג יעדים גבוהים במעבר לאנרגיות מתחדשות. באיחוד האירופי כולו אנרגיות מתחדשות היוו 18.9% מסך האנרגיה הנצרכת בשנת 2018, בדרך ליעד של 20% בשנת 2020.²⁴ כאשר ביחס למשק החשמל באיחוד 30.7% מהייצור הגיע מאנרגיות מתחדשות ב-2018.²⁵

כאשר בוחנים את המצב כיום, כלומר איזה שיעור מהאנרגיה מיוצר באמצעות מקורות מתחדשים, בולטות בראש הטבלה דנמרק (76%) וגרמניה (40%). ישראל נמצאת הרחק מאחור (עם 2.8% בשנת 2018, וצפי להגיע ליעד של 10% באמצע שנת 2021).²⁶

[RENEWABLE POWER TARGETS FOR SHARE OF ELECTRICITY GENERATION](#), GLOBAL STATUS REPORT, 21 .REN21, 2019.

22 ש.מ.

Senate, [SB-100 California Renewables Portfolio Standard Program: emissions of greenhouse gases](#) 23 .Bill No. 100

24 כך על פי נתונים של יחידת הסטטיסטיקה של הניצבות האירופית, יורוסטאט. ראו (נתונים נדלו במרץ 2020):

[Share of energy from renewable sources](#), Eurostat

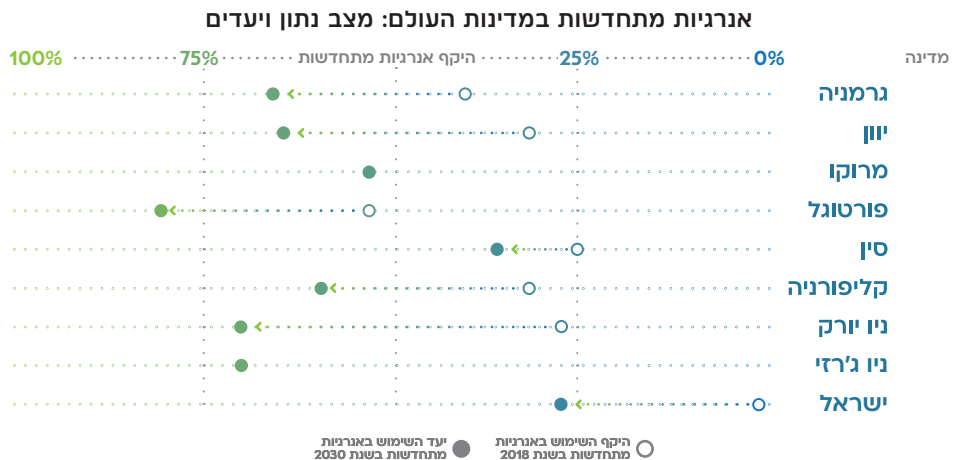
25 ש.מ.

26 [מאזן האנרגיה של ישראל 2018](#), הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, ינואר 2020.

טבלה 1: יעדים של מדינות בעולם לייצור חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשת

מדינה	יעד אנרגיות מתחדשות – מייצור חשמל	היעד שנת	היקף השימוש באנ' מתחדשות 2018-ב
גרמניה	55-60%	2030	38%
יון	63.5%	2030	32%
מרוקו	52%	2030	
פורטוגל	80%	2030	52%
צרפת	40%	2030	20%
סין	35%	2030	26.4
ארה"ב - קליפורניה	60%	2030	31.36%
ארה"ב - ניו יורק	70%	2030	29%
ארה"ב - ניו גרז'י	50%	2030	
ארה"ב - הוואי	100%	2045	36.45%

מקור הנתונים – נתוני המדינות מבוססים על Global Status Report לשנת 2019 של מכון REN21. נתוני המדינות בארצות הברית לקוחים מפרסומים רשמיים של המדינות.



קליפורניה, הכלכלה ה-5 בגודלה בעולם, מתכוונת לייצר 100% מהחשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות עד שנת 2045

היעד של עבודה זו, וצורת העבודה

תוכנית NZO מכוונת לכך שישראל תעבור לייצור חשמל ממקורות מתחדשים. האתגר הוא משמעותי: הפקת החשמל הנדרש לחברה וכלכלה מפותחת, תוך שמירה על הביטחון האנרגטי והפחתת הפליטות המזיקות לרמה מינימלית.

יעד כה שאפתני אינו יכול להישאר בגדר "קריאת כיוון", כאמירה בעלמא. צוות NZO לקח על עצמו להציג תוכנית עבודה, הכוללת את המכלול הנדרש על מנת להפוך את היעד המוצג מעלה למציאות, עד לשנת 2050.

במסגרת עבודה זו חישבנו את הביקוש העתידי לחשמל לכל שנה עד שנת 2050, והמענה לו באמצעות מודלים ממוחשבים.²⁷ אל מול הביקוש המשתנה ברמה שעתית הורצו בהתאמה אלפי תרחישים של מענה לביקוש, שהורכבו מתמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל. המודלים שיקללו והציגו את העלות הכוללת למשק בכל אחד מאלפי התרחישים הללו.

במודלים שהורצו הונח שימוש עתידי אך ורק בטכנולוגיות שנמצאות בשימוש מסחרי כבר עתה, ללא הסתמכות על "פריצות דרך" מדעיות ומסחריות אשר עשויות להתרחש. עם זאת הנחנו את המשכם של שני תהליכים חיוניים שמתרחשים בעשורים האחרונים: 1. שיפור מתמיד ביעילות המערכות הקיימות (עליית ההספק של מערכות PV לדוגמה, ונצילות סוללות ליתיום-יון כדוגמה אחרת, אשר נמצאים בשיפור מתמיד) 2. ירידת מחירים עקבית ומתמשכת בעלויות של מערכות אלו.

שתי הנחות אלו נשענות על קרקע מחקרית יציבה ושולבו במודלים ובעבודה זו באופן שמרני וזהיר. כמו כן התבססנו בעבודה זו על מחקרים בינלאומיים של מוסדות מחקר מוכרים ובעיקר על מחקרים ופרסומים אשר בוצעו על ידי:

- מכון המחקר הלאומי של ארה"ב לאנרגיות מתחדשות | National - NREL Renewable Energy Laboratory
- קבוצת מחקר אירופאית בראשותו של פרופ' Christian Breyer²⁸
- BNEF – Bloomberg NEF - מרכז המחקר של קבוצת בלומברג בתחום האנרגיה

²⁷ הביקוש הצפוי לחשמל חושב תוך שקלול הגידול הצפוי בצריכת האנרגיה, הסבת משק התחבורה מדלקים לחשמל, הסבת התעשייה לחשמל והתייעלות כוללת בצריכת האנרגיה. הרחבה בנושא אופן חישוב הביקוש – בפרק ב'. התפלגות הביקוש על פני שעות היממה ותקופות השנה נעשתה על בסיס נתוני מנהל המערכת בחברת החשמל לשנת 2018.

²⁸ פרופ' ברייר הוא מומחה לתחזיות אנרגיה ולאנרגיות מתחדשות. כפרטים על מחקריו, ראו כאן: <https://research.lut.fi/converis/portal/Person/50148>

המידע במחקרים אלו כולל תחזיות לשיפורים טכנולוגיים ושינויים חזויים בעלויות של הטכנולוגיות השונות, ובכלל זה תחזית לשינויים במחירים עד לשנת 2050. התוצאות שהתקבלו מהמודלים הממוחשבים אפשרו לנו לאתר נקודת "שיווי משקל" חדשה: נקודה שבה ייצור חשמל ממקורות מתחדשים נותן מענה מלא, או כמעט מלא, לביקוש לחשמל ובעלויות נמוכות יותר.

יש לראות בגז כ"דלק מעבר" לטובת המעבר מאנרגיה פוסילית לאנרגיה מתחדשת

על בסיס התוצאות הכלכליות שהתקבלו מהמודלים ניתן היה לאתר את התרחישים שעלותם נמוכה בהשוואה לתרחיש "העסקים כרגיל". כך ניתן היה לאתר את התרחיש האופטימלי, זה שמשלב הפחתה מקסימלית של פליטות מזיקות לסביבה ולאדם תוך ייצור החשמל הנדרש לישראל, ואיננו מחייב השקעות נוספות בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל". תרחיש זה, לו אנו קוראים תרחיש NZO 2050, יוצג להלן. בעבודה זו נבחן גם הפוטנציאל הקיים בישראל לייצור חשמל ממקורות מתחדשים. כלומר האם התרחיש האופטימלי הוא גם ריאלי. סקירת הפוטנציאל הקיים בישראל מראה כי התשובה לשאלה זו היא חיובית, בהינתן שורה ארוכה של צעדים, אותם תרגמנו להמלצות מדיניות.

שאלת המחקר

מהו השימוש האופטימלי במקורות האנרגיה לייצור חשמל בישראל בשנים 2021 עד 2050, בהתחשב בשלושה פרמטרים: הראשון – מענה לביקוש לחשמל; השני – צמצום פליטות מזיקות לסביבה ולאדם; והשלישי – עלות כלכלית אשר איננה עולה על הצפוי בתרחיש עסקים כרגיל.

על מנת לענות על שאלה זו ייבחנו בפרק א' מקורות האנרגיה לייצור חשמל העומדים לרשותנו.

בפרק ב' יוערך הביקוש לחשמל בישראל, באופן שנתי ובאופן שעתי, בשנים 2021 עד 2050.

בפרק ג' יתואר האופן בו נבחנו אלפי תמהילים שונים של מקורות אנרגיה לייצור חשמל, להם קראנו תרחישים. כל תרחיש נבחן על פי עמידתו בשלושת הפרמטרים שצוינו בשאלת המחקר: המענה לביקוש, ההשלכות הסביבתיות והעלות הכלכלית. בפרק ד' נציג את התרחיש האופטימלי שעלה בעבודה זו. התרחיש ישווה לתרחיש "עסקים כרגיל" (BAU – Business As Usual), כלומר התרחיש שמתאר את המשך המדיניות הממשלתית הנוכחית.

פרק א'

מקורות האנרגיה לייצור חשמל

רקע על מקורות האנרגיה הזמינים

מקורות האנרגיה הזמינים בישראל באמצעותם ניתן לתת מענה לביקוש לחשמל, ואשר קיבלו ביטוי במודל של NZO, הם: אנרגיה פוסילית, אנרגיה סולארית ואנרגית רוח, בשילוב עם אגירת אנרגיה.

אנרגיה פוסילית

ייצור חשמל ממקורות אנרגיה פוסילית נעשה בישראל בתחנות כוח המונעות בעיקר על ידי גז ופחם. מדיניות משרד האנרגיה היא הפסקת השימוש במזוט ובסולר בתחנות הכוח, ובעתיד הפסקת השימוש בפחם. לכן, לצורך עבודה זו, הנחנו כי כל החשמל המבוקש בתקופת המחקר (2021-2050) אשר לא ייוצר באמצעות אנרגיות מתחדשות, ייוצר בתחנות כוח המונעות בגז.

לתחנות כוח פוסיליות ישנם אילוצים תפעוליים המשפיעים על ניהול הייצור ברשת. לדוגמא, תחנות פחמיות חייבות לפעול בהספק מינימלי של כ-50% על מנת לשמר את כושר הייצור (אילוץ אשר נשאר בתוקף גם לאחר הסבת התחנות הפחמיות לגז). אילוץ שכזה נקרא Must-Run, בעוד שישנן תחנות כוח בעלות גמישות תפעולית אשר ניתן להתניע אותן בהתראה קצרה לשימוש בשעות השיא (תחנות כאלו נקראות תחנות פיקריות, מלשון Peak - שיא, אך הנצילות שלהן נמוכה וייצור החשמל בהן יקר יותר). לצורך עבודה זו הנחנו אילוץ Must-Run המשקפים את אילוץ תחנות הכוח הפחמיות היום ובעתיד (לאחר הסבתן לגז) תוך התחשבות במגוון תרחישים, עם דגש על תרחיש אשר פורסם ע"י רשות החשמל.²⁹ בנוסף, לתחנות הכוח הפחמיות ישנם אילוץ הפעלה בתחנות קוגנרציה ותחנות מיקרוגנרציה. במודל הנחנו אילוץ Must-Run שיוורד באופן הדרגתי, החל מ-6410MW ב-2020, 2640MW ב-2039 ועד ל-0 ב-2050.

ישנו אילוץ Must-Run נוסף במשק, והוא אילוץ רגולטורי הנובע מההסכמים עם יצרני החשמל הפרטיים (תחנות כוח גזיות). במסגרת ההסדרה שנקבעה עם היצרנים

²⁹ בפרסום של רשות החשמל מה-10 באוגוסט 2020, [הנדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030](#), פורסם גם קובץ אקסל אשר מפרט את תחזית ייצור האנרגיה מפחם. לפי תחזית זו חושב ההספק הממוצע הנדרש לשנה והתייחסו אליו כ-must run.

הפרטיים המדינה התחייבה לרכוש מהם חשמל בשעות הפסגה והגבע, גם אם קיים אמצעי ייצור אחר שהינו זול יותר וזמין לייצר באותה שעה. מבנה התעריף עדיין לא הותאם לייצור האנרגיה המתחדשת ולכן גם בשעות בהן קיים ייצור סולארי, עשויות להיות שעות פסגה וגבע בהן תחויב המדינה, בשל ההסכמים הקיימים, לרכוש מיצרני החשמל הפרטיים חשמל בעלות גבוהה יותר. כתוצאה מכך עשוי להתקיים עודף ייצור בשעות אלו. לצורך עבודה זו הנחנו כי מבנה התעריף ו/או ההסדרה של היצרנים הפרטיים יעודכנו בעתיד, כך שיצרנים אלו לא ייצרו בשעות בהן קיים ייצור סולארי.

בעשורים האחרונים מערכות PV השתפרו ביעילותן בעשרות אחוזים, במקביל לירידה חדה במחירן

אנרגיה סולארית

אנרגיה שמקורה בשמש. האנרגיה הסולארית מומרת לחשמל באמצעים שונים, המרכזי שבהם הוא פאנלים של תאים פוטו-וולטאיים, או מערכות PV. קרינת השמש על מערכות ה-PV נאמדת לפי מדד של שעות שמש אפקטיביות, כלומר משך הזמן שבו יש מספיק קרינת שמש לצורך ייצור חשמל. בישראל יש בממוצע כ-1,700 שעות שמש אפקטיביות בשנה, כך על בסיס דו"ח מצב משק החשמל בישראל לשנת 2018.³⁰ מתקנים בעלי יכולת עקיבה אחר קרינת השמש עשויים להגיע לכ-2200-2000 שעות שמש אפקטיביות בשנה.

ישנן שתי טכניקות מרכזיות להפקת חשמל מאנרגיה סולארית: מערכות פוטו-וולטאיות ומערכות תרמו-סולאריות.

מערכות פוטו-וולטאיות, 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.

הטכניקה השנייה להפיק חשמל מאנרגיה סולארית נקראת תרמו-סולארית, והיא מבוססת על הפקת חום מקרינת השמש ושימוש בחום לשם ייצור חשמל, לדוגמה באמצעות קיטור. השיפורים הטכנולוגיים וירידת המחירים בתחום מערכות PV הביאו לכך שטכנולוגיה זו יעילה יותר, ואף צורכת פחות שטח. בעבודה זו הנחנו כי לא יוקמו מערכות תרמו-

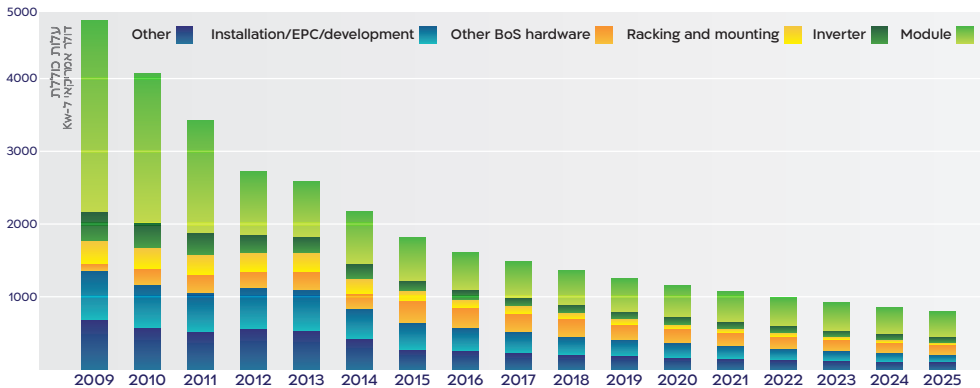
30 לפי [דוח מצב משק החשמל לשנת 2018](#), רשות החשמל. יש לציין שב-2019 נתון זה עודכן ל-1677 שעות, ומאחר והשינוי קטן מ-1.5%, החלטנו לדחות עדכון זה במודל שלנו לעתיד. אחרים משתמשים בנתון מפולח של 1,750 שעות לשדה קרקעי ו-1,700 שעות למתקן גג קטן, למשל: התועלת הנוספת ממתקנים סולאריים על גגות, אלכסנדר קליינר עמית מחקר, משרד האנרגיה, מרכז מילקן לחדשנות, מכון ירושלים למחקרי מדיניות, יולי 2017.

סולאריות נוספות מעבר למתקנים הקיימים ופועלים ב"אשלים".
 כמות החשמל שניתן להפיק ממערכת PV תלויה בהספק של המערכת ובקרינת השמש על המערכת.

ישנה עלייה מתמשכת ועקבית בהספק של מערכות PV. עד לשנת 2019 היה מקובל להניח כי 10 דונמים של מערכות PV מהווים הספק מותקן של 1 MW. אולם בשנה האחרונה, על בסיס השיפור שחל בהספקי המערכות הסולאריות היחס השתנה ל- 1:8, כלומר נדרש שטח של 8 דונם לייצור הספק של 1 MW. בעבודה זו הונח המשך המגמה של שיפור ביעילות מערכות ה-PV, אשר יביא לשיפור של 15% בנצילות עד לשנת 2030 ושיפור נוסף בנצילות של 25% בשנים 2030 עד 2050.³¹

במקביל לשיפור בנצילות של מערכות PV חלה במהלך העשור האחרון, 2010-2019, ירידה של כ-85% במחיריהן. הגידול בהיקפי הייצור של תאים סולאריים מביא עימו שיפור מתמיד בטכנולוגיות הייצור המביא לירידת המחירים המתמשכת בתחום. כתוצאה משינויים אלו טכנולוגית ה-PV הפכה להיות הטכנולוגיה השלטת בעולם למערכות אנרגיה סולארית.³²

תרשים 1 - ירידת המחיר של מערכות PV



31 NREL מפרסמים בכל שנה שנתון משווה של נתונים טכניים, Annual Technology Baseline, או ATB. הנתונים הטכניים של מערכות ה-PV בעבודה זו מתבססים על הפרסום העדכני משנת 2019 ועל שיחות עם אנשי מקצוע בתחום בישראל.

/Annual Technology Baseline, NREL, 2019 <https://atb.nrel.gov/electricity/2019>

32 [Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelized cost of electricity](#), Eero Vartiainen, Gaetan Masson, Christian Breyer, David Moser, Eduardo Roman Medina, July 2019, Wiley – Progress in Photovoltaics

בתרשים מוצג המחיר ל-1 kW הספק סולארי מותקן, בהתקנות קרקעיות, לאורך השנים. בשנת 2010 המחיר היה כ-4,000\$ ותוך 5 שנים חלה ירידת מחירים של מעל ל-50% והמחיר עמד על פחות מ-2,000\$. התרשים לקוח ממחקר אשר בוצע בשנת 2015 ולפיכך הנתונים בתרשים משנת 2015 ואילך הינם תחזית מחירים ולא מחירים בפועל.³³ ירידת המחירים אשר התרחשה מאז היתה מהירה יותר מהתחזיות והמחיר ל-1 kW הספק סולארי מותקן, בהתקנות קרקעיות, בשנת 2020 נמוך מ-1,000\$, לעומת התחזית בשנת 2015 למחיר של כ-1,200\$.

אנרגיית רוח

בעזרת טורבינות רוח ניתן להמיר את האנרגיה הקינטית של הרוח לאנרגיה חשמלית. אנרגיית רוח מהווה מקור אנרגיה משמעותי בעולם לייצור אנרגיה מתחדשת אך בישראל המחסור בשטחים פתוחים המרוחקים מיישובים ובהם רוח בעוצמה המתאימה, משפיע על הפוטנציאל הכולל של אזורים רלוונטיים. בנוסף, ההשפעות על בעלי הכנף ומגבלות של מערכת הביטחון מאפשרות שימוש בטורבינות רוח באופן מצומצם יחסית למדינות אחרות בעולם. מסיבות אלו הוקצה בעבודה זו מקום מועט יחסית לאנרגיית רוח.

לצורך עבודה זו הונח כי עד 2030 יוקמו טורבינות רוח בהספק של 750MW ועד 2050 הספק הייצור מרוח יגדל ל-1,500 MW. כמו כן הנחנו ש-1kW הספק רוח מייצר בממוצע 3,014 kWh בשנה.³⁴

אנרגיה המופקת מפסולת

בפסולת ביתית ותעשייתית אגורה אנרגיה רבה אותה ניתן לנצל לייצור חשמל. חשמל הנוצר מתהליך גזיפיקציה של פסולת, המופקת כתוצר לוואי של הפעילות האנושית, עשוי לשחק תפקיד בהשלמת המענה לביקוש לחשמל והפחתת ההסתמכות על אנרגיה פוסילית.

בעבודה זו התמקדנו באנרגיה הסולארית, אשר תהווה את מקור האנרגיה המתחדשת העיקרי בעתיד הנראה לעין. הפקת חשמל מפסולת נמצאת בחיתוליה בישראל. בתחילת שנת 2020 פורסם קול קורא ע"י המשרד להגנת הסביבה, להקמת תחנות ראשונות להפקת אנרגיה מפסולת, אך השרה להגנת הסביבה החליטה על הקפאת

33 דו"ח של סוכנות האנרגיה המתחדשת הבין לאומית, משנת 2016 לניתוח השנניים בתחום האנרגיה - The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025

34 על בסיס מסמך הגדלת ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות ב-2030 של רשות החשמל מה-10 באוגוסט 2020.

התוכנית עד לבחינה מחדש של מדיניות הפסולת במדינה.³⁵ כיוון שכמות החשמל אשר ניתן לייצר מפסולת באמצעות המתקנים הקיימים והמתוכננים נמוכה יחסית ומסתכמת להערכתנו בכ-2% מהביקוש לחשמל בישראל, בחרנו שלא לכלול אותה בתחשיבים שלנו.

אתגר הזמינות של אנרגיה מתחדשת

אתגר מרכזי, בעל חשיבות עליונה, בניהול רשת החשמל הוא התאמת ייצור החשמל במדויק לביקוש. התאמה זו נדרשת גם בהספק הייצור (נמדד בוואט) וגם בתדר הייצור (נמדד בהרץ, מאחר והחשמל מיוצר בזרם חילופין). אי התאמה בהספק או בתדר תוביל לאי אספקת חשמל שעלותה למשק גבוהה מאוד.

קושי נוסף בהתאמת הייצור לביקוש טמון ביכולת התגובה המהירה לשינויים. נדרשת גמישות להעלאה והורדת הספק הייצור באופן מהיר דיו, בהתאם לשינוי בביקוש. כל זאת, כאשר עד לאחרונה לא ניתן היה לאגור חשמל אשר יוצר בעודף (תחום אגירת החשמל נהיה ישים רק בשנים האחרונות ולא מהווה עדיין חלק מניהול הרשת).³⁶

ההתאמה בין הייצור לביקוש כוללת מורכבות כפולה ומכופלת בכל הנוגע לייצור חשמל באמצעות מקורות אנרגיה מתחדשים. בעוד שתכנון היקף הייצור בתחנות כוח קונבנציונליות, המונעות בדלקים פוסיליים ומאפשרות שליטה מלאה, הינו אתגר מוכר ומערכות ניהול רשת החשמל ערוכות להתמודד עימו, התאמת הייצור לשינויים התכופים בהספק ממקורות אנרגיה מתחדשת היא מורכבת יותר. התנדודתיות של מקורות אנרגיה מתחדשים היא אחד מהמאפיינים האינהרנטיים שלהם.³⁷

כך לדוגמה, אנרגיה סולארית מגיעה מהשמש ביום, אך לא בלילה; בימי הקיץ יש יותר שעות שמש מאשר בחורף וניתן להפיק יותר אנרגיה סולארית; בחורף יתכנו ימים מעוננים בהם חלה ירידה משמעותית בתפוקת המערכות הסולאריות. זוהי רק התנדודתיות הסדירה, הניתנת לצפייה מראש, פחות או יותר. תתכן גם תנדודתיות פתאומית, עננות פתאומית בצהרי יום אביבי ושמי, או מקרים בהם הרוח המניעה טורבינות לייצור חשמל שוככת לפתע.

35 [נילה גמליאל בולמת את תכנית המשפרות של קודמה בתפקיד](#), שני אשכנזי, נלובר, 1 ביוני 2020.

36 זהו אתגר משמעותי ביותר שמרבית הציבור כלל אינו מודע לו. כל עוד אין יכולת אגירה בהיקף נרחב (וכך היה במרבית 140 השנים האחרונות, בהן הפך החשמל לחלק אינטגרלי של החיים במדינה מפותחת) יש צורך לייצר חשמל בהתאמה ובדיוק רב יחסית לביקוש. האתגרים העולים מכך קשורים בין היתר בתחזוקה השוטפת (אם יש תקלה, חייבים להגיב מהר) ובאספקה השוטפת (דרך היענות מהירה של יחידות ייצור לביקוש פתאומי בשעות שפל, לדוגמה).

37 למעשה, מדובר בשני היבטים שונים של תנדודתיות: פעולה לסירוגין (Intermittent) וחוסר נשלטות (Uncontrolability).

הפתרון: אגירה של אנרגיה וחשמל

לאתגרים אלו יש פתרון מרכזי אשר נמצא בתנופה בעשורים האחרונים, והוא אגירה של אנרגיה ו/או חשמל.³⁸ עד כה, כאמור מעלה, חשמל היה נצרך בדרך כלל עם ייצורו, כמעט באופן מיידי. כעת, מתקני אגירת אנרגיה וחשמל מאפשרים התמודדות שונה עם אתגר זה. אגירת חשמל היא אתגר מורכב טכנית, אולם בשנים האחרונות חלה התקדמות משמעותית בנושא זה. לא רק שטכניקות האגירה הופכות יעילות יותר, ישנה גם ירידה מתמשכת ועקבית במחיר של פתרונות האגירה, מגמה הצפויה להימשך.³⁹

עד לאחרונה, חשמל היה נצרך כמעט באופן מיידי. כעת, מתקני אגירת חשמל פותחים אפשרויות חדשות לניצול מקורות אנרגיה

אגירת אנרגיה נותנת מענה לאתגרים בניהול רשת החשמל בתחומים של ייצוב תדר ומתח ותוספת גמישות לשינויים בביקוש. בעבודה זו כללנו כחלק ממקורות האנרגיה לייצור חשמל את השימוש באגירת אנרגיה כמענה לביקוש בשעות מחסור. מתקני אגירה מספקים גם פתרונות לאתגרים נוספים בניהול רשת החשמל, והם משמשים כאמצעי לייצוב הרשת וכתחליף לתחנות פיקריות.⁴⁰

38 בעניין חשיבות ההתקדמות בפיתוח של טכנולוגיית הסוללות במעבר לאנרגיות מתחדשות ראו: [Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification](#), Charlie Bloch, James Newcomb, Samhita Shieldar, Madeline Tyson, 2019, Rocky Mountain Institute

39 בעניין מגמות המחירים בטכניקות האגירה ראו בעבודה זו בהובלת פרופ' ברייאר מפינלנד, Impact of wighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity, Eero Vartiainen, Gaetan Masson, Christian Breyer, David Moser, Eduardo Roman Medina, July 2019, Wiley – Progress in Photovoltaics

וכן עבודה נוספת מטעם המעבדה הלאומית האמריקאית לאנרגיות מתחדשות: [Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage](#), Wesley Cole and A. Will Frazier, June 2019, NREL

40 תחנות פיקריות - הינן תחנות לייצור חשמל הפועלות על גז ומאופיינות בגמישות גבוהה להפעלה מהירה במטרה לתת מענה לשעות העומס, ומכאן שמן – Peak, התחנות הפיקריות הינן בעלות נצילות אנרגטית מוכה.

פרק ב'

הביקוש לחשמל 2021-2050

בבואנו לבחון את אופן ייצור החשמל בראיה לטווח הבינוני והארוך עלינו לשאול תחילה שאלה פשוטה: כמה חשמל יידרש, כלומר מה יהיה הביקוש השנתי בהסתכלות של 30 שנים קדימה. תכנון לטווח זמן כה ארוך הינו, באופן מובנה ומובן, נעדר ודאות, אך הוא חיוני בתחום אשר בו תהליכי ההקמה של אמצעי הייצור וההולכה נמשכים 10-5 שנים. הביקוש לחשמל הוא מושג רב-מימדי. הביקוש השנתי הינו הביקוש הכולל לחשמל על פני כל השנה. אולם ישנה חשיבות להתפלגות הביקוש, כיוון שזה אינו נותר קבוע במהלך כל שעות היממה, וישנם הבדלים בין העונות וכו'. בשעות הלילה, לדוגמה, הביקוש לחשמל נמוך מאשר בשעות היום, ובימים חמים או קרים במיוחד הביקוש היומי לחשמל גבוה יותר. לכן, מודל לחיזוי הביקוש יהיה מדויק יותר ככל שהביקוש החזוי יפולח ברזולוציה גבוהה יותר. המודל שפותח ב-NZO מחושב ברזולוציה שעתית.

הערכת הביקוש השנתי לחשמל

נקודת המוצא היא הצריכה השנתית כעת. על פי נתוני מנהל מערכת החשמל ברשות החשמל צריכת החשמל בשנת 2018 הייתה כ-69.6 TWh סה"כ.⁴¹ דו"ח מצב משק החשמל לשנת 2019, אשר פורסם בחודש יוני 2020, מראה שסך הביקוש לחשמל בשנת 2019 עמד של 72.5 TWh.⁴² הגידול השנתי ב-2019 עלה על התחזית ועמד על 4.1% וממוצע הגידול ב-5 השנים האחרונות עמד על 3.4%.

41 [לוחות החייבים בפרסום על ידי חח"י לפי חובת הדיווח](#), רשות החשמל, 4 ביולי 2019.

42 דו"חות מצב משק החשמל | רשות החשמל בקובץ בסיס הנתונים לשנת 2019

בחצי הראשון של שנת 2020 חלה ירידה בביקוש לחשמל בעולם כתוצאה ממגפת הקורונה. הצפי בישראל ובעולם הינו שבשנת 2020, לראשונה אחרי שנים רבות, תחול ירידה בביקוש לחשמל, אשר נובעת מהקטנת הפעילות הכלכלית במשק כתוצאה ממשבר הקורונה. עם זאת, יש מקום להניח כי הביקוש לחשמל בישראל ובעולם "יתאושש" מהקורונה וישוב לרמתו טרם המשבר.

הביקוש לחשמל צומח בהתאם לגידול באוכלוסייה והעליה ברמת החיים. ניתוח של בנק ישראל לגידול הצפוי בביקוש לחשמל התבסס על פרמטרים אלו, ועל בסיס תחזיות גידול האוכלוסייה ורמת החיים קבע הערכה ממוצעת לגידול שנתי צפוי של 2.8% בביקוש לחשמל.⁴³

דו"ח רשות החשמל אשר בחן את היתכנות היעד של 30% אנרגיות מתחדשות בשנת 2030, התבסס על תחזית גידול שנתי בביקוש של 2.8% בממוצע שנתי, לאורך התקופה 2020 עד 2030 וגידול בקצב של 3% בשנים 2031 עד 2040. תחזית ביקוש זו כללה את ההשפעה על הביקוש לחשמל כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים. בנוסף לפרמטרים אלו ישנם גורמים נוספים אשר צפויים להשפיע בעתיד על הביקוש לחשמל, ובראשם:

א. מעבר משימוש בדלקים למערכות מבוססות חשמל, בדגש על תחבורה ותעשייה. המעבר לתחבורה חשמלית צפוי להתרחש בשנים הקרובות לאור הכדאיות הכלכלית הצפויה והתועלת האקלימית מהקטנת הפליטות, בפרט אם יצור החשמל יבוצע באמצעות אנרגיות מתחדשות.

השפעת מעבר התחבורה לחשמל חושבה על בסיס היקף הנסועה הכוללת, תוך שקלול הנחות להתייעלות בתחבורה ומעבר לתחבורה חשמלית. סה"כ היקף הביקוש לחשמל ממגזר התחבורה צפוי להגיע ל 22 TWh בשנת 2050. המעבר של התעשייה לחשמל צפוי להגדיל את הביקוש ב 12 TWh בשנת 2050.

ב. התייעלות – בעולם וגם בישראל מבוצעים תהליכים רבים להתייעלות אנרגטית במגזרים השונים, כלומר קיום רמת הפעילות הקיימת באמצעות אנרגיה מועטה יותר. חישוב הביקוש שבוצע מניח התייעלות בכל אחד מהמגזרים השונים - תעשייה, תחבורה, מסחר ומגורים.

היעד הכולל אשר נקבע בתכנית NZO להתייעלות אנרגטית עומד על 25% בשנת 2050, ובהתאם לכך הביקוש הופחת באופן יחסי לאורך השנים 2021-2050 ובשנת 2050 ההתייעלות הפחיתה את הביקוש הצפוי ב 42.66 TWh.

43 תחזית ארוכת טווח לביקוש לחשמל במשק הישראלי, ליאור גאלי, בנק ישראל – חטיבת המחקר, דצמבר 2017.

טבלה 2: ביקוש צפוי לחשמל

שנה	רשות החשמל [TWh]	תוכנית NZO [TWh]
2020	73.9	74.5
2025	84.82	85.6
2030	97.26	97.4
2035	112.75	111.5
2040	130.7	126.2
2045		143.6
2050		162

הטבלה מציגה את נתוני הביקוש לחשמל כפי שהוערך על ידי רשות החשמל ואת נתוני הביקוש כפי שהוערכו בתכנית NZO.

הערה: הניתוח של רשות החשמל לבחינת הגדלת היעד של אנרגיות מתחדשות התייחס לשנים 2020-2040.

הערכת הביקוש השעתי לחשמל

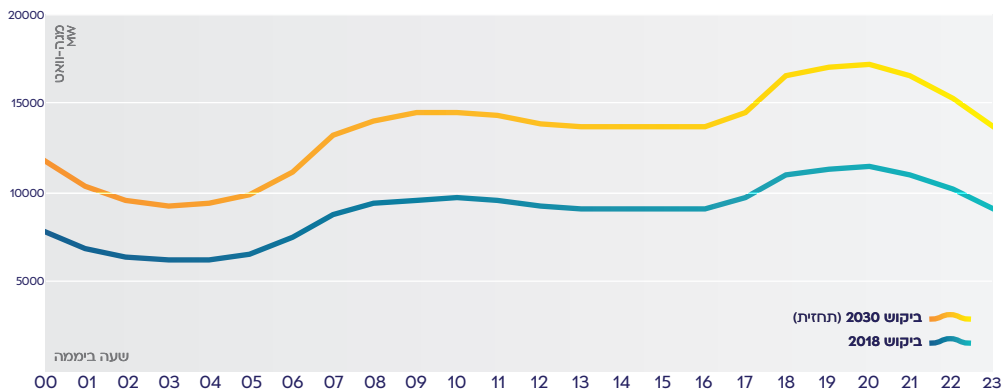
ישנה חשיבות, כאמור, להתפלגות הביקוש לחשמל על פני שעות היממה. לשם הערכת הביקוש השעתי, בכל שנה לאורך תקופת החישוב של המודל, לקחנו את הביקוש השעתי לחשמל במהלך כל שנת 2018 והנחנו אותו כבסיס לתחזית באופן הבא:⁴⁴ לכל שנה בין 2020 ל-2050 חושב היחס בין הביקוש השנתי הצפוי לביקוש שהיה בשנת 2018. עבור 2030 יחס זה הוא 1.4 (97.4 TWh, הביקוש השנתי הצפוי ב-2030, חלקי 69.5 TWh, הביקוש השנתי ב-2018).

לכל שעה בשנה בין 2020 ל-2050 (ישנן 8,760 שעות בשנה), חושב הביקוש באמצעות הכפלת הביקוש בשעה המקבילה ב-2018 ביחס הגידול לאותה שנה. לדוגמא, עבור השעה ה-36 ב-2030 (12 בצהריים, 2 בינואר, 2030), נלקח הערך של השעה ה-36 ב-2018 והוכפל ב-1.4.

הביקוש לחשמל שונה בין עונות השנה, כאשר בחורף שיא הביקוש הינו בשעות הערב, ובקיץ שיאי הביקוש הם בשעות הצהריים, כאשר עומס החום בשיאו. להלן שתי דוגמאות.

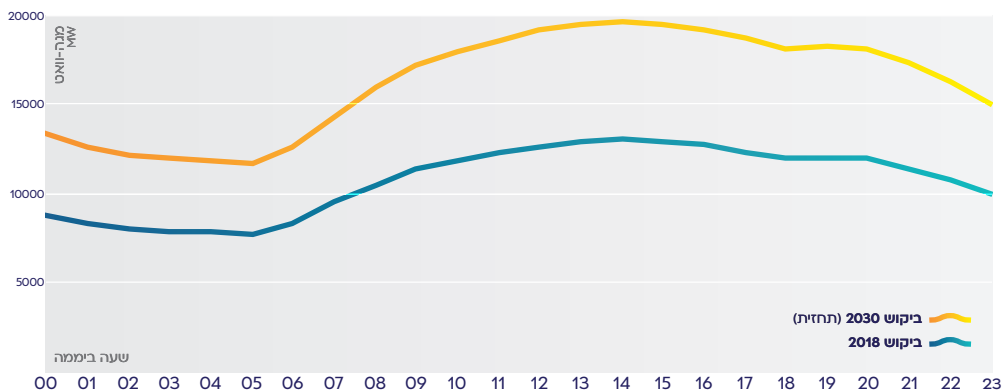
44 [לוחות החייבים בפרסום על ידי חח"י לפי חובת הדיווח](#), רשות החשמל, 4 ביולי 2019.

תרשים מס' 2 - ביקוש שעתי ביום חורף



יום חורפי טיפוסי, ה-29 לינואר, ב-2018 וב-2030. אפשר לראות את שיא הביקוש בין 19:00 ל-20:00, ואת האופן בו הוערך הביקוש ב-2030 (גידול לינארי אחיד)

תרשים מס' 3 - ביקוש שעתי ביום קיץ



יום קיצי טיפוסי, ה-25 ליולי, ב-2018 וב-2030. אפשר לראות את שיא הביקוש בין 14:00 ל-15:00, ואת דעיכתו האיטית עם ירידת הטמפרטורה בערב.

הביקוש השעתי מושפע גם ממדיניות תעריפים אשר מסייעת להסטת ביקוש משעות העומס לשעות השפל (בעזרת תעריף תעו"ז). התאמה זו קשורה גם לשיטת ייצור החשמל הפוסילי. ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות יבטל את הכדאיות לתמרץ העברת ביקוש לשעות הלילה, ואף צפויה להיווצר העדפה להסטת ביקוש לשעות שיא הייצור, אשר יהיו באמצע היום.

שינויים אלו בביקוש צפויים להקטין את הצורך באגירה, אך בשלב זה קשה להעריכם ולכן לא נכללו בעבודה זו.

פרק ג'

תמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל

המודל לבחינת תמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל

מקורות האנרגיה לייצור חשמל והערכת הביקוש לחשמל בשנים 2021-2050 שימשו בעבודה זו כנתוני הבסיס לבחינת תרחישי ייצור חשמל ומענה לביקוש בתקופה הנדונה. הנתונים הוכנסו למודל ממוחשב אשר "הריץ" אלפי תרחישים שונים. תרחיש הוא תמהיל מקורות אנרגיה לייצור חשמל אשר מושווה לתחזית הביקוש לחשמל. לכל מקור אנרגיה לייצור חשמל אשר הוכנס למודל – פוסילי, מתחדש או אגירת חשמל – ישנה השלכה סביבתית (כמות פליטות מזיקות לסביבה עבור 1 kWh) ועלות כלכלית (שקלים ל-1 kWh). כך ניתן היה להעריך כל תרחיש שיצר המודל לפי המשמעות הסביבתית שלו והעלות הכלכלית.

בחינת המענה לביקוש והשלכה הסביבתית

המודל הממוחשב "הריץ", כאמור, אלפי תרחישים שונים, וכך נבחן המענה לביקוש הצפוי בכל שנה ושנה, כאשר הביקוש גדל מ-74 TWh בשנת 2020 ועד ל-162 TWh בשנת 2050 (ראו פרק ב'). אופן בניית התרחישים מוסבר בטבלה מטה.

טבלה 3: מאפייני מקורות הייצור וטווח הערכים שנבדק במודל

מקור	תיאור	טווח ערכים
הספק ייצור סולארי	הערכים של ההספק הסולארי המותקן בכל שנה חושבו כאחוז מההספק הנדרש לייצור הביקוש השנתי לחשמל באותה שנה. לדוגמא, בשנה שבה הביקוש הצפוי הוא 97 TWh, ערך של 50% זה 48.5 TWh, וכדי לייצר 48.5 TWh בפאנלים סולאריים, נדרש להתקין 28.5 GW של הספק סולארי (48.5 TWh / 1,700 שעות שמש אפקטיביות). ניתן (ונראה בהמשך שאף נדרש) לייצר יותר אנרגיית שמש (יותר מ-100%) מסך האנרגיה הנדרשת, זאת במחיר של השלכת חשמל "לפח" בימים אשר יש בהם שעות שמש רבות.	לכל שנה, נבחנו ערכים מ-0% ועד 200%, בקפיצות של 10%.

עד MW 0 MW 3,000		הספק טורבינות רוח
עד MW 0 MW 6,410	על בסיס המצב הקיים וההתחייבויות הקיימות ליצרני החשמל, הערכנו את היקף ה Must-Run הצפוי בכל שנה, מ 2021 ועד ל 2050.	הספק - Must-Run
בין 0 GWh GWh 400-7	ברוב המקומות במודל השתמשנו בנתון קיבולת אגירת אנרגיה, מתוך הנחה שהספק הסוללות המקסימלי הוא 1/4 מהקיבולת, קרי הספק מקסימלי ל-4 שעות. ראשית נבחן טווח ערכים רחב כדי לבחון הגעה ל-100% אנרגיה מתחדשת, ולאחר מכן הטווח מוקד על מנת להגיע ל-95% אנרגיה מתחדשת בעלות תחרותית.	קיבולת אגירה בסוללות

יש לציין שלא בכל שנה נבחן מלוא טווח הערכים, אלא הערכים צומצמו לטווחים ריאליים ונחוצים לכל שנה. הספק פוסיכי - עבור כל תמהיל הושלם הפער בין הביקוש הצפוי לייצור החשמל מאנרגיה סולארית, רוח והספק Must Run על ידי ייצור חשמל בגז. ההספק הפוסיכי הכולל בכל תמהיל כולל את הספק ה-Must Run וההספק הנוסף הנדרש להשלמת הביקוש.

המודל הממוחשב "הריץ" אלפי תרחישים שונים, וכך נבחן המענה לביקוש הצפוי בכל שנה ושנה

אופן חישוב עלויות ייצור החשמל

מרבית העלות בהפקת חשמל משריפת דלקים נובעת מעלות הדלקים. לעומת זאת, מרבית העלות בהפקת חשמל מהשמש ומהרוח נובעת מההקמה של טורבינות הרוח או הפאנלים הסולאריים. לכן כדי להשוות את עלויות ייצור החשמל בין תשתיות ייצור שונות במהותן נעזרנו באמת מידה שנקראת עלות מפולסת לייצור החשמל, או באנגלית Levelized Cost of Electricity – LCOE. אמת מידה זו מחברת את כלל מרכיבי העלות לכל יחידת ייצור, על פני משך חיי יחידת הייצור, ומחלקת אותה בכמות האנרגיה (נמדד ב-kWh) שיחידת הייצור תייצר לאורך חייה. כך מושגת אמת מידה אחידה: שקל ל-kWh.

טבלה 4: המשתנים המרכזיים בחישוב העלות אשר נכללו במודל הכלכלי

ההשקעה הראשונית לצורך הקמת יחידת ייצור חשמל, בין אם זו תחנת כוח ובין אם זו התקנה של מערכת PV.	CAPEX -Expenditure	עלות הקמה [שקל ל-KW]
עלות התחזוקה והתפעול של יחידת הייצור (של המתקן, ללא קשר לייצור האנרגיה).	OPEX Operational Expenditure	עלות תפעולית קבועה [שקל ל-KW לשנה]
עלות התחזוקה והתפעול הנדרשת להפקת אנרגיה.	Variable OPEX	עלות תפעולית משתנה [שקל ל-KWh]
עלות הדלקים המשמשים לייצור החשמל. מרכיב עלות זה רלוונטי רק לאנרגיה הפוסילית.	Fuels	דלקים [שקל ל-KWh]
לצורך חישוב עלות ההקמה השנתית היא מחולקת על פני משך החיים של יחידת הייצור. בדרך כלל מדובר ב-20 עד 30 שנים.	Life Span	משך חיים [שנים]
הריבית הנהוגה במשק, להחזר כספי משקיעים בפרויקט תשתיות חשמל, מחושבת כממוצע משוקלל בין הריבית של ההון המוסדי לבין הריבית של ההון הפרטי.	WACC - Weighted Average Cost of Capital	עלות ההון [%]
הכוונה לעלויות שאינן כלולות ישירות בייצור אלא מושתות על הסביבה, הציבור ו/או הממשלה. במקרה של האנרגיות הפוסיליות הכוונה ל"עלותה" של פליטת זיהום האוויר וגזי החממה.	Externalities	עלויות חיצוניות [שקל ל-KWh]

אופן החישוב לכל שנה ולכל מקור ייצור נעשה ע"י סכימת המרכיבים הבאים:

- עלויות הקמה להספק מותקן חדש (תשלום שנתי, מחושב לפי כמות הספק מוכפל ב-CAPEX לאותה שנה, ובפריסה לתשלומים לפי ריבית ה-WACC)⁴⁵
- עלויות הקמה להספק מותקן ישן (תשלומים שנתיים מצטברים של כלל ההספק שכבר הותקן)
- עלות תחזוקה קבועה לכלל ההספק המותקן
- עלות תחזוקה משתנה X כמות האנרגיה שיוצרה
- עלות דלק X כמות האנרגיה הפוסילית שיוצרה
- עלויות חיצוניות X מקדם פליטות לכל כימיקל X כמות האנרגיה הפוסילית שיוצרה

ככל מרכיבי העלויות מתעדכנים משנה לשנה ע"פ תחזית שהרכבנו ממקורות מהימנים, עליהם נפרט בסעיף הבא.

שיפורים טכנולוגיים הפכו את האנרגיות המתחדשות לבחירה הנכונה לא רק משיקולי סביבה ואקלים אלא גם בשל היותן מקור האנרגיה הזול ביותר היום בעולם

תחזית מרכיבי העלות להפקת חשמל ממקורות שונים

עלויות הפקת אנרגיה מהשמש ומהרוח ירדו באופן חד בעשור האחרון. מחירי מערכות PV ירדו במהלך תקופה זו בכ-85%⁴⁶. שיפורים טכנולוגיים, יחד עם התייעלות בייצור כתוצאה מגידול בביקוש, הפכו את האנרגיות המתחדשות לבחירה הנכונה לא רק משיקולי סביבה ואקלים אלא גם בשל היותן מקור האנרגיה הזול ביותר היום בעולם.⁴⁷ ב-5 השנים האחרונות, 2015-2019, מרבית יכולת ייצור האנרגיה אשר הוקמה בעולם היתה מאנרגיות מתחדשות. בשנת 2019 72% ממקורות האנרגיה החדשים שהוקמו היו מאנרגיות מתחדשות.⁴⁸

הביקוש הגבוה בעולם לאנרגיה מתחדשת והתחרות בתחום מובילים את החדשנות הטכנולוגית והשיפורים בייצור, אשר יובילו בתורם לירידת מחירים נוספת בתחום מערכות ה-PV. המחירים צפויים לרדת במהירות רבה בתחום האגירה⁴⁹ אשר מושך השקעות גדולות ברחבי העולם, על מנת לספק את הביקוש המתעצם לאגירה ברכבים חשמליים⁵⁰ וברשתות האנרגיה.⁵¹ תמורות אלו בעולם האנרגיה הן אלו שנתנו לנו ביטחון לצאת לדרך לפרויקט NZO ולבחון את כלל העלויות הצפויות למשק החשמל.

לכל מקור ייצור אנרגיה שכללנו במודל, ולכל מרכיב עלות אשר פורט לעיל, בוצעה הערכה של התפתחות העלות לשנים 2020-2050. הערכת העלות והתפתחותה העתידית התבססה על נתונים עדכניים של רשות החשמל, פרסומים של חברת Bloomberg ושם מרכז המחקר האמריקאי בתחום האנרגיות המתחדשות - NREL ועל מחקרים אקדמיים בתחום כלכלת אנרגיה המבוצעים על ידי קבוצת חוקרים

46 ראו הערות שוליים 32, 33 ו-40.

47 שם.

48 ראו הערת שוליים 2.

49 [New Energy Outlook 2019 \(NEO\)](#), Bloomberg Nef, June 2019

50 [Recharging economies: The EV-battery manufacturing outlook for Europe](#), James Eddy, Alexander Pfeiffer, and Jasper van de Staaij, Mckinsey, June 2019

51 ראו הערת שוליים 50.

בראשות הפרופסור כריסטיאן ברייאר.⁵²

יש לציין כי מדובר בתחזיות לטווח ארוך ומטבע הדברים הן משקפות את המידע העומד לרשותנו כעת, ברור לנו שהמחירים, כמו גם הביקוש בפועל במהלך השנים, עלולים להיות שונים מהתחזיות, לטוב ולרע.

בנוסף למקורות המידע הבינלאומיים בוצעה בדיקה של העלויות להקמת מערכות PV בשוק המקומי, על בסיס הצעות מחיר אשר התקבלו מספקים ויזמים בתחום. המחירים נבדקו בהתאם לסוגי התקנה שונים – לגנות קטנים (בתים פרטיים), גנות מסחריים והתקנות קרקעיות. עבור התקנות מעל סככות, אשר בהן נדרשת הקמת קונסטרוקציה, נבדקו מחירים בפועל להקמת קונסטרוקציה. העלות עבור התקנות אלו כללה את עלות הקונסטרוקציה ועלות מערכת ה-PV גם יחד.

ממצאים מדגמיים ומסקנות מהמודל האנליטי

המודל הממוחשב והמספר הרב של התרחישים מאפשרים לנו לבחון את השאלה האם ניתן לתת מענה לביקוש באמצעות אנרגיות מתחדשות ואגירת חשמל? התשובה היא כן.

כדי לבסס תשובה זו, נסתכל על האופן בו תמהילים שונים של מקורות לייצור חשמל (המכונים תרחישים) נתנו מענה למספר מתארים של ביקוש, כפי שמראה המודל הממוחשב. לשם המחשה נתבונן על המתארים הבאים:

- יום אביבי ב-2024 עם תמהיל המאפשר הגעה ל-30% מאנרגיה מתחדשת
- יום חורפי עם מינימום שמש ב-2030 עם תמהיל המאפשר הגעה ל-50% מאנרגיה מתחדשת
- יום קיצי בו הביקוש הוא מקסימלי ב-2050 עם תמהיל המאפשר 95% אנרגיה מתחדשת
- יום חורפי עם מינימום שמש ב-2050 עם תמהיל המאפשר 95% אנרגיה מתחדשת

על מנת להתחיל ולהתרגל לקריאת הפלט של המודל, ניקח לדוגמה יום אביבי ממוצע בשנת 2024.⁵³ הביקוש לחשמל יהיה גדול בכ-15% מהביקוש כיום, וביממה בה נתבונן הביקוש יסתכם ל-0.161 TWh. להלן הערכים בתמהיל שחושב.

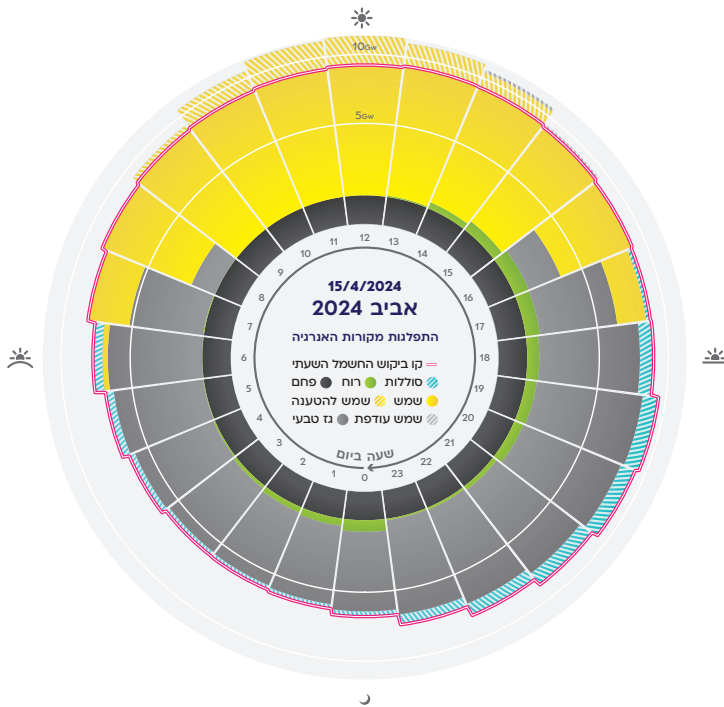
52 ראו הערת שוליים 33.

53 התפלגות הביקוש על שעות היממה ביממה שמוצגת כאן מבוססת על התפלגות הביקוש ב-15 באפריל 2018 לפי נתוני מנהל מערכת החשמל. גם התפלגות כוח הייצור הסולארי על שעות היממה מבוססת על נתוני אותה יממה ומאותו מקור.

שנה	2024	אגירה	MW / 3,000 12,000 MWh
ביקוש שנתי	TWh 82.3	Must-Run	MW 1,150
הספק סולארי	MW 15,000	הספק גז	MW 11,000
הספק רוח	MW 500	היקף מתחדשות	30%

וכך נראית התפלגות הביקוש והייצור לפי מקור ושעה:

תרשים 4- התפלגות הייצור ביום אביב מייצג



אפשר לראות בתרשים המעגלי יממה שלמה שמתחילה בחצות, בתחתית המעגל, ומתקדמת עם כיוון השעון. הקו הורוד הכפול מייצג את הביקוש בכל שעה ביממה. העמודות שיוצאות ממרכז המעגל כלפי חוץ מייצגות את אמצעי ייצור האנרגיה בכל שעה. מאחר וזה הוא יום אביב מעט קריר, שיא הביקוש לחשמל הוא בשעות הערב (הקו הורוד הכפול הוא הכי רחוק מהמרכז בשעה 19). המעגל השחור הפנימי מייצג את הייצור הפוסילי שלא ניתן לכבות (ה-must run). השכבה הירוקה, הצמודה למעגל

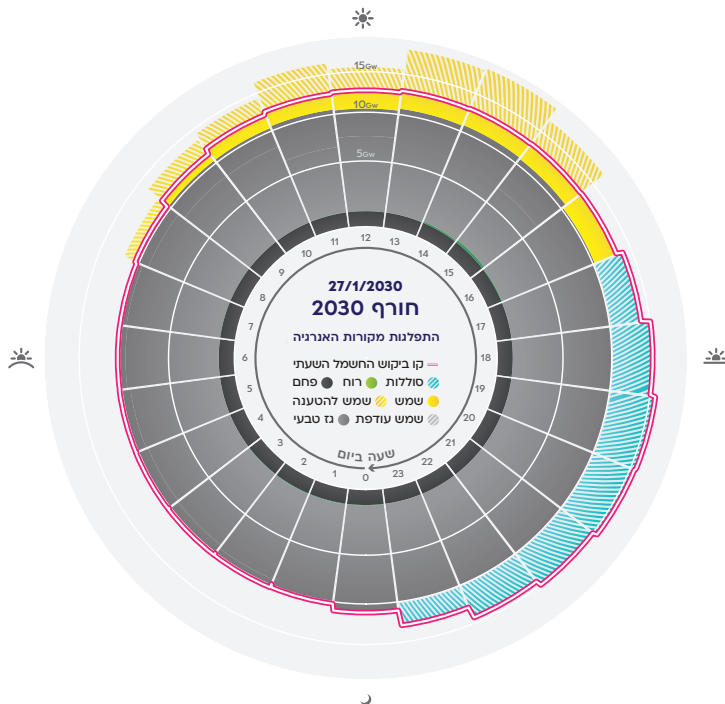
השחור, היא ייצור אנרגיה בטורבינות רוח. הייצור הסולארי עולה החל מ-6 בבוקר, דרך השיא ב-12 בצהריים, ודועך לאפס ב-18 בערב. כשהשמש אינה זורחת, הייצור הפוסילי הגמיש תופס את מרבית השטח (בצבע אפור). האגירה באה לידי ביטוח בצבעים מפוספסים. בשעות הצהריים, בשיא הייצור הסולארי, האנרגיה העודפת טוענת את אמצעי האגירה. בשעות הערב ובכל שעות הלילה, אפשר לראות שימוש באנרגיה האגורה בצבע תכלת מפוספס.

יום חורפי עם מיני שמש ב-2030 עם תמהיל המאפשר הגעה ל-50% מאנר' מתחדשת

התרשים הבא אותו נבחן מראה את היום בו יש הכי מעט שמש בשנה, בתמהיל שמאפשר הגעה ל-50% אנרגיה מתחדשת. להלן הערכים של תמהיל זה:

שנה	2030	אגירה	/ MW 10,000 MWh 40,000
ביקוש שנתי	TWh 97.3	Must-Run	0
הספק סולארי	MW 30,000	הספק גז	MW 12,100
הספק רוח	MW 750	היקף מתחדשות	50%

תרשים 5 - התפלגות הביקוש ביום חורף ממוצע



תרשים 5 מעניין מכמה סיבות. היום הספציפי שנבחר הוא אחד מכמה ימים בשנה ממוצעת, בין דצמבר לפברואר, בהם יש מעט שעות שמש אפקטיביות ולכן מעט חשמל המיוצר מאנרגיה סולארית. זאת, למרות שמדובר בתרחיש שבו במהלך כל השנה הנבדקת, 2030, 50% מהחשמל הנצרך ייוצרו באמצעות אנרגיה סולארית. המסקנה היא כי בעתיד הנראה לעין נידרש לייצור חשמל מגז כגיבוי לימים חורפיים, אך השימוש בו בפועל במהלך השנה כולה ילך ויפחת. נרחיב על נקודה זו בהמשך. נקודה נוספת עליה ניתן לעמוד באמצעות תרשים 5 היא כי שיא הביקוש ביום חורפי הוא ב-19:00 בערב, כאשר אין שמש. במהלך היממה הייצור הסולארי מועט, כך שלא ניתן לאגור חשמל באמצעותו. המודל הממוחשב "השלים" את טעינת הסוללות באמצעות ייצור עודף בתחנות הגזיות בשעות שפל הביקוש (בין 2:00 ל-8:00 בבוקר). כך, באמצעות אגירת החשמל, נמנע הצורך מהפעלה מקסימלית של תחנות הכוח הפוסיביות בשעות השיא.

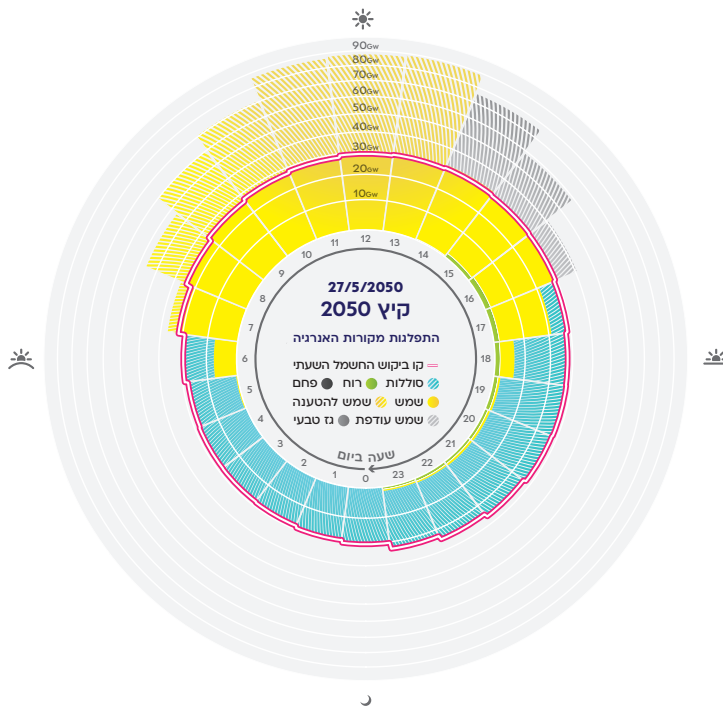
יום קיצי ב-2050 בו הביקוש הוא מקס' עם תמהיל המאפשר 95% אנרגיה מתחדשת

אלו הערכים בתרחיש של 95% אנרגיה מתחדשת ב-2050:

2050	שנה
TWh 162	ביקוש שנתי
MW 112,000	הספק סולארי
MW 1,500	הספק רוח
MWh 330,000 / MW 82,500	אגירה
0	Must-Run
MW 18,000	הספק גז
95%	היקף מתחדשות

כך נראית התפלגות הביקוש והייצור לפי מקור ושעה ביום בו הביקוש הוא הכי גבוה:

תרשים 6 - התפלגות הייצור בקיץ ב-2050



בתרשים 6 ניתן לראות כי שיא הביקוש ב-15:00 הוא 30,000 MWh והוא נשאר מעל 25,000 MWh עד 23:00. לעומת זאת שיא הייצור הסולארי ב-14:00 הוא 88,500 MWh וסך הייצור הסולארי באותו יום הוא 670,000 MWh.

משמעות הנתונים הללו היא כי ישנו חשמל עודף רב אותו ניתן לאגור. ביום הספציפי המומחש בתרשים 6 החשמל העודף רב כ"כ, שיכולת האגירה (כפי שהונחה בתרחיש זה) תמוצה. בהתאם לכך, חלק מהחשמל המיוצר בעודף "יושלך", כלומר ייפרק מבלי שנעשה בו שימוש ומבלי להיאגר.

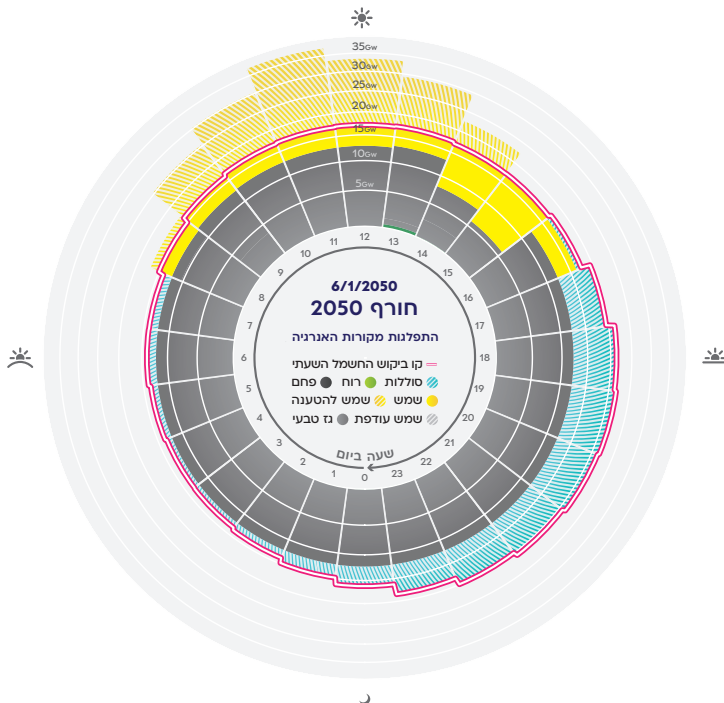
גישה זו עלולה להשמע בזבזנית ולכוון לעבר האפשרות של הקטנת יכולת הייצור הסולארית, אך יכולת ייצור סולארית בעודף משמעותי חשובה על מנת שניתן יהיה להקטין את ייצור החשמל הפוסילי לאורך כל השנה. כפי שניתן לראות בתרשים 6, באותו יום קיץ ב-2050 לא יעשה שימוש בחשמל שיוצר ממקורות פוסיליים כלל.

יום חורפי ב-2050, עם מינימום שמש ותמהיל המאפשר 95% אנרגיה מתחדשת

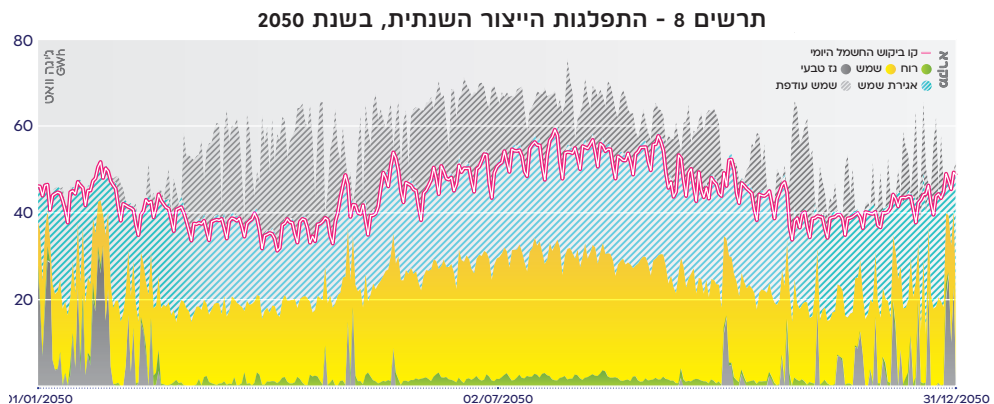
אחת ההתנגדויות העיקריות להיקף גבוה של אנרגיה מתחדשת הוא חוסר היכולת לתת מענה לביקוש בחורף, כאשר אין שמש. ביום עם הכי מעט שמש בשנה, הייצור הסולארי נופל ל-17% מכושר הייצור הסולארי הכולל, ונותן מענה ל-30% מהביקוש באותו יום. את שארית האנרגיה (70%) נדרש לייצר באמצעות גז. ביום כזה, גם בסוללות נעשה שימוש מינימאלי, בעיקר כדי ל"גלח" את פסגת שיא הביקוש, ולהוריד את הצורך בכושר ייצור פוסיכי למינימום ההכרחי. תמהיל מקורות הייצור שבו השתמשנו כדי להדגים את היום החורפי הינו זהה לתמהיל מהתרשים הקודם:

שנה	2050	אגירה	/ MW 82,500 MWh 330,000
ביקוש שנתי	TWh 162	Must-Run	0
הספק סולארי	MW 112,000	הספק גז	MW 18,000
הספק רוח	MW 1,500	היקף מתחדשות	95%

תרשים 7 - התפלגות הייצור ביום חורף, עם הכי מעט שמש בשנה, ב-2050



אפשר לראות שגם באמצעות GW 112 הספק מותקן של אנרגיה סולארית, בשילוב עם 82.5 GW הספק של אגירה לא ניתן יהיה לייצר יותר מ-30% מהחשמל המבוקש ביום כזה. עם זאת חשוב להבין שהמשמעות של 95% אנרגיה מתחדשת היא שנתית ולא יומית, ונקודת קיצון כמו זו היא רק חלק מהממוצע השנתי. התרשים הבא מראה את התפלגות הייצור לפי מקור לאורך כל שנת 2050 בתרחיש זה, ברזולוציה יומית:



תרחיש "עסקים כרגיל" - BAU

כפי שנראה בפרק ד' המודל הממוחשב מאפשר לחלץ את התרחיש האופטימלי, אותו אנו מכנים תרחיש NZO. השוואת התועלת של תרחיש NZO בוצעה כנגד תרחיש "עסקים כרגיל" - BAU.

תרחיש עסקים כרגיל מייצג את המדיניות התקפה של הממשלה בתחום האנרגיה, כפי שהודיע עליה שר האנרגיה באוגוסט 2020, הכוללת יעד ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות של 30% בשנת 2030. לצורך עבודה זו הנחנו כי בתרחיש BAU שיעור האנרגיות המתחדשות ישמר בהיקף של 30% מהביקוש עד לשנת 2050.⁵⁴ ההשוואה בין התרחישים מאפשרת לעמוד על ההיבט הסביבתי – כמות הפליטות המזיקות לסביבה ולאדם בכל תרחיש, ועל ההיבט הכלכלי – העלות לייצור kWh.

54 זאת בהתאם למדיניות הרשמית של הממשלה נכון לעתה, כפי שתוארה בפרק הרקע בעבודה זו.

פרק ד'

ממצאי המחקר והתרחיש האופטימלי

תהליך איתור התרחיש האופטימלי

המודל הממוחשב שהורץ במסגרת מחקר זה איפשר בחינה של אלפי תרחישים שונים למענה על הביקוש לחשמל עד לשנת 2050 (ראו פרק ג'). כפי שתואר מעלה, התרחישים נבדלו זה מזה באופן שבו ניתן מענה לביקוש – עם שיעורים שונים של אנרגיה פוסילית, אנרגיה סולארית, אנרגיית רוח ויכולות אגירת חשמל שונות. על בסיס הפלט שהתקבל מכל תרחיש שהורץ במודל אפשר היה להעריך את משמעותיותו: ראשית, האם בתרחיש ניתן מענה לביקוש לחשמל לאורך כל שנות הבדיקה? שנית, ניתן היה להעריך את היקף הפליטות המזיקות לסביבה ולאדם בתרחיש הנתון, וכן את העלות הכוללת שלו.

ניתוח הפלט שהתקבל מהמודלים האנליטיים והכלכליים הוביל למסקנה חד-משמעית: ניתן להשיג את היעד של ייצור חשמל עם קרוב לאפס פליטות מזיקות לסביבה ולאדם בתהליך. המפתח לכך הוא ייצור של חשמל באמצעות אנרגיה סולארית בעודף על הביקוש, בשעות בהן זה מתאפשר, ואגירת החשמל לשימוש בשעות בהן לא ניתן לייצר חשמל מאנרגיה סולארית, תוך שילוב של ייצור חשמל באמצעות אנרגיית רוח. בימים בהם יש עננות רבה ומעט תפוקה סולארית נדרש לעשות שימוש בתחנות כוח פוסיליות לשם מתן מענה מלא לביקוש לחשמל.

המפתח הוא ייצור חשמל סולארי בעודף על הביקוש, בשעות בהן זה מתאפשר, ואגירת החשמל לשימוש בשעות בהן לא ניתן לייצר חשמל סולארי

ממסקנה כללית זו ניתן היה להתקדם לתהליך מדוקדק יותר של איתור התרחיש האופטימלי. ה"אופטימום" הוגדר ככזה ששיגי את התוצאה הגבוהה מבחינת החיסכון בפליטות המזיקות לסביבה ולאדם, ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל" (BAU), ובעלות כוללת למשק אשר אינה עולה על העלות הצפויה בתרחיש BAU.

איתור התרחיש האופטימלי מבחינה סביבתית

לצורך הערכת הפליטות בתרחישים השונים נעשה שימוש במדד CO₂eq המשקלל

את הפליטות של גזי החממה השונים, ובנוסף לכך נלקחו בחשבון הפליטות של גזים הגורמים לזיהום האוויר. הפליטות הצפויות חושבו בכל תרחיש, על בסיס היקף ייצור החשמל הצפוי בגז בכל שנה.

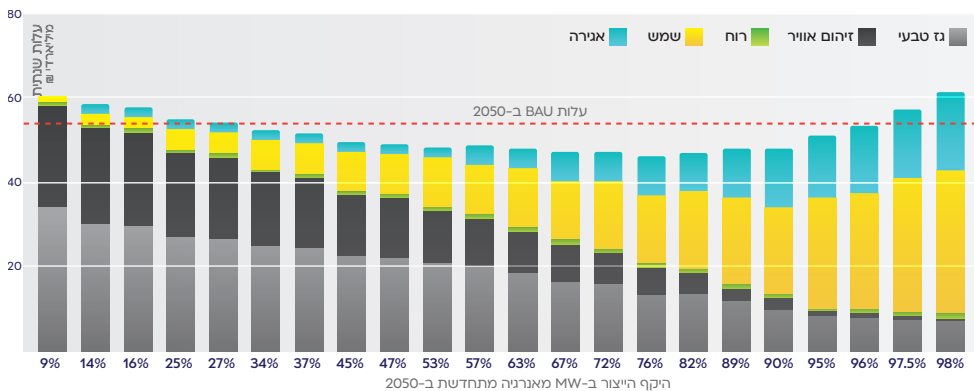
הפליטות מזיהום אויר וגזי חממה שוקלנו במודל הכלכלי על בסיס ערכים המשקפים את הנזקים הסביבתיים הנגרמים מהם, עלויות אלו מוצגות במודל הכלכלי כ- עלויות חיצוניות.

תהליך איתור התרחיש האופטימלי מבחינה כלכלית

על בסיס הפלט שהתקבל מהמודלים הכלכליים בחרנו את התרחיש אשר מאפשר את ההפחתה המכסימלית בפליטות גזי חממה וזיהום אויר, בעלות הנמוכה מהעלות בתרחיש "עסקים כרגיל". בחינת העלות בוצעה בהתייחס לעלות הכוללת הצפויה לאורך כל התקופה אשר בדקנו, השנים 2021-2050.

מניתוח תוצאות המחקר אפשר לראות שניתן לספק את האנרגיה הדרושה למדינה ממגוון גדול מאוד של תמהילי ייצור שונים, המודל מראה שאין הבדלים משמעותיים מבחינת העלות השנתית (לשנת 2050) בתרחישים בהם 50% עד 90% מהחשמל מיוצר ממקורות מתחדשים. כלומר בעלות דומה ניתן להקטין באופן משמעותי את פליטות גזי החממה וזיהום האוויר.

תרשים 9: עלות שנתית כוללת כתלות בהספק הסולארי המותקן



התרשים מציג את העלות לייצור חשמל בשנת 2050 בתרחישים שונים על פי החלק של האנרגיות המתחדשות מכלל הייצור, עבור כל מתווה של % אנרגיות מתחדשות

מוצגת העלות של התרחיש הזול ביותר. ניתן לראות מהתרחשים את הגידול החד בעלות השנתית כאשר חלקם של האנרגיות המתחדשות עולה מעל ל 95%. בתרחיש של ייצור 96% מהאנרגיה ממקורות מתחדשים העלות בשנת 2050 דומה לעלות בתרחיש BAU, אך בבחינת העלות לכל אורך התקופה, מתברר שתרחיש זה יקר באופן משמעותי מתרחיש NZO.

תרחיש NZO, התרחיש האופטימלי - סביבתי וכלכלי

נקודת האופטימום הכלכלי הינה בהתקנה של הספק סולארי המאפשר לייצר 50% עד 90% מהאנרגיה ממקורות מתחדשים, כאשר השוני בעלויות בין התרחישים השונים הינו נמוך ואינו עולה על כ-2% מהעלות. בבחירת מתווה ההתקדמות לקחנו היבטים אלו בחשבון: בחירת התרחיש הזול ביותר לא תגשים את מטרת העל של הפחתת גזי החממה לאפס (או קרוב ככל הניתן לכך), בעוד שבחירת התרחיש "הנקי" ביותר עלולה להיות לא ישימה בגלל עלותו הכלכלית הגבוהה של התרחיש. לאחר שאותרו מספר תרחישים בעלי תוצאות חיוביות בפרמטרים הסביבתיים ובפרמטרים הכלכליים, בחרנו בתרחיש NZO 2050 - עד שנת 2050 יותקנו בישראל 115 GW הספק של מערכות PV, 1.5 GW רוח ו-320 GWh של קיבולת אגירת חשמל.

בתרחיש NZO - 95% מהאנרגיה בישראל יופקו ממקורות מתחדשים!

להלן היקף ההספק המותקן אשר ידרש להגיע אליו במהלך התקופה:

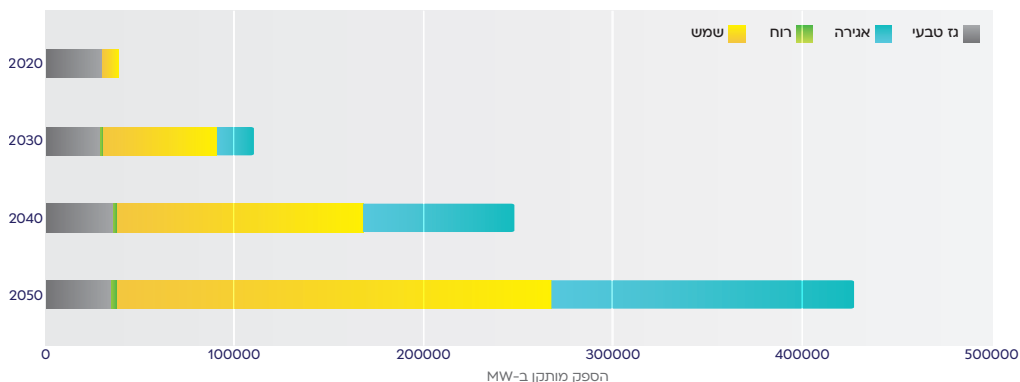
טבלה 5 - הספק מותקן לאורך התקופה ב-MW

שנה	סולאר	רוח	אגירה	גז
2020	4000	80	0	15,228
2030	30000	730	10,000	14,581
2040	65000	1115	40,000	17,881
2050	115000	1500	80,000	17,489

הערה: נתוני האגירה הינם עבור אגירה של 4 שעות

ניתן לראות שההספק המותקן בגז נשאר ברמתו הנוכחית עד לשנת 2030, וגדל לאחר מכן עד לשנת 2040. מאידך השימוש בגז יפחת באופן משמעותי, והייצור הפוסילי ישמש רק כמענה לייצור החשמל בימי חורף אשר בהם תחול ירידה בתפוקה הסולארית.

תרשים 10: התפתחות ההספק המותקן



התרחיש האופטימלי הוא כי עד שנת 2050 יותקנו בישראל מערכות PV בהספק של 115 GW, וכ-320 GWh של קיבולת אגירת חשמל

ההיבט הסביבתי

אימוץ תרחיש NZO יביא להפחתת פליטות מזיקות לסביבה בהיקף של 47% בשנת 2030 ו-93% בשנת 2050 – בהשוואה לפליטות הצפויות במתווה "עסקים כרגיל". נתונים אלו מתייחסים לפליטות מזיקות בתהליך ייצור חשמל ואינם כוללים את כל הפליטות המזיקות המתקיימות בתהליך ההפקה וההולכה של הגז.

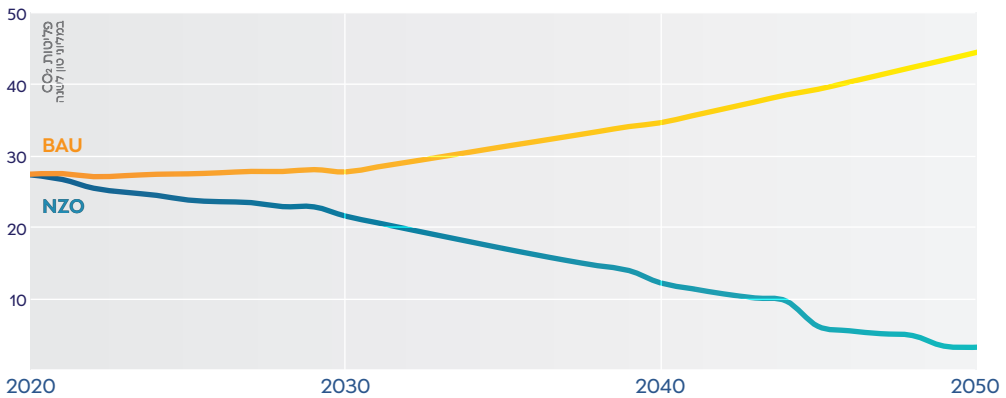
הפחתה דרסטית של מעל ל-90% בפליטת גזי חממה תהווה התקדמות משמעותית של מדינת ישראל אל היעד של כלכלה דלת פחמן, אך עדיין לא תביא את המדינה אל היעד של ה-IPCC - משק מאופס פליטות גזי חממה בשנת 2050. הגעה ליעד חשוב זה מחייבת ביצוע של מהלכים נוספים אשר יתנו מענה לצורך לעבור למשק נטול פליטות מזיקות לסביבה.

התרשים הבא מציג את הפליטות המזיקות לסביבה בתרחיש NZO מול תרחיש BAU

(עסקים כרגיל). הנתונים מוצגים במליוני טון פליטה חזויה של CO₂e (כלומר מדד המשקלל לתוכו את סך הפליטות השונות, כמוסבר לעיל), בחתך של כל עשר שנים, מ-2020 ועד 2050.

ניתן לראות את הירידה בפליטות גזי החממה עם המעבר לאנרגיות מתחדשות ונקיות בתוכנית NZO, אשר מביאה לצמצום של כ-90% בפליטות מזיקות משנת 2020 ל-2050 תוך כדי עליה של 240% בהיקף ייצור החשמל.

תרשים 11 - השוואת פליטת גזי חממה מייצור חשמל



בהשוואה בין תוכנית NZO ל BAU - הצמצום הוא של כ-93% בפליטת גזי החממה מייצור החשמל בשנת 2050.

הירידה בפליטת גזי חממה בתרחיש BAU בין השנים 2020 ל-2030 נובעת ברובה המכריע מהפסקת השימוש בפחם והסבת תחנות הכוח הפחמיות הקיימות לגז. בזכות הגדלת השימוש באנרגיות מתחדשות ל-30% ב-2030, היקף השימוש בדלקים פוסיליים נשאר ברמה הדומה ל-2020 למרות הגידול בביקוש לחשמל.

הנתונים אשר הוצגו לעיל הינם עבור פליטת גזי חממה מייצור חשמל בלבד ואינם כוללים את הפליטה בהפקת הגז הטבעי ובמערכת הולכת הגז. מדידה והכללה של נתוני פליטות המתאן לאורך כל תהליך הפקת והולכת הגז הטבעי, יחשפו את מלוא הנזק אשר נגרם מייצור החשמל בגז.

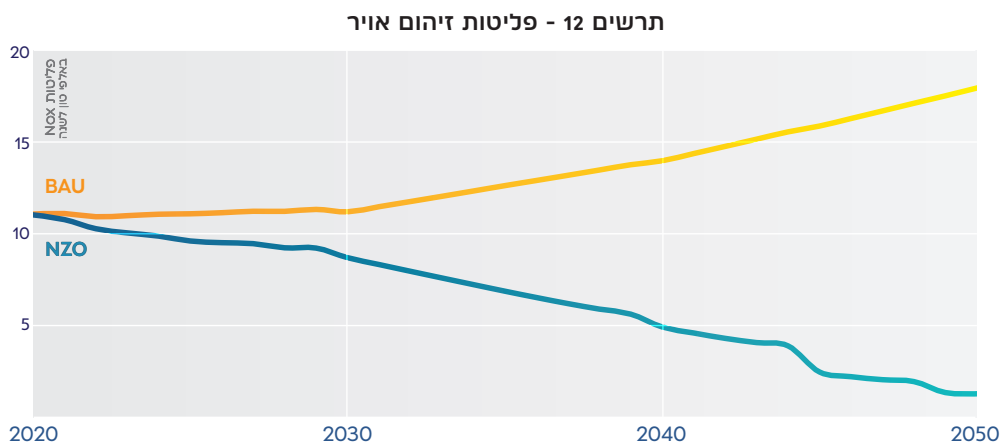
מחקרים אשר התפרסמו בעולם בשנים האחרונות מצביעים על כך שפליטת מתאן בתהליכי ההפקה וההולכה של הגז הינה משמעותית ביותר. ניתן לקרוא בהרחבה על הנושא במאמר שפורסם על ידי ארגון אדם טבע ודין ביוני 2020.⁵⁵

55 פליטת מתאן ממאגרי הגז תמר ולוויתן, אדם טבע ודין, יוני 2020.

זיהום אויר

תרחיש NZO צפוי להביא לירידה משמעותית לא רק בפליטות של גזי חממה אלא גם בהיקף הפליטות המהוות זיהום אוויר, כלומר מזיקות לאדם ולטבע, מבלי לתרום בהכרח להתחממות הגלובלית. בהשוואה לתרחיש BAU, פליטות זיהום האוויר השנתית צפויה להיות נמוכה בכ-92%, בשנת 2050.

ניתן לראות בתרשים את השינוי בפליטת זיהום האוויר מסוג NOx (נתרן חמצני). בתרחיש BAU פליטת ה-NOx גדלה במקביל לגידול בסך ייצור החשמל, לעומת זאת בתרחיש NZO חלה ירידה בפליטת NOx למרות הגידול בייצור החשמל כתוצאה מהמעבר לייצור ממקורות מתחדשים והקטנת ייצור החשמל ממקורות פוסיליים.



ההיבט הכלכלי

העלות המהוונת המצטברת לייצור החשמל בשנים 2021 ועד לשנת 2050, מסתכמות ב-696 מיליארד ₪ בתרחיש NZO, ו-698 מיליארד ₪ בתרחיש BAU.

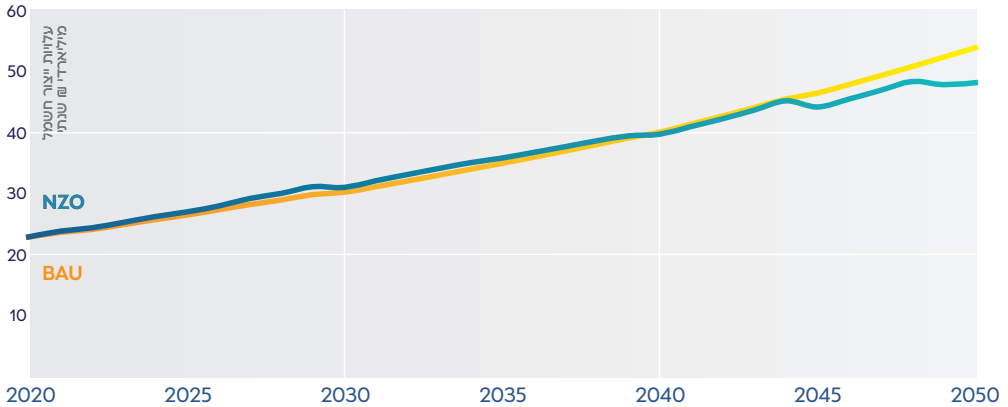
על פי המודל ניתן לראות כי העלות הכוללת לייצור החשמל בתרחיש NZO – זהה – במרבית פרק הזמן הנבחן – לעלות בתרחיש "עסקים כרגיל".

תרחיש NZO עדיף כלכלית בשנים 2041-2050 כתוצאה מירידת העלויות הצפויה של אנרגיות מתחדשות ועלייה בתמחור של העלויות החצוניות. לפיכך ניתן להניח שתרחיש NZO יהיה עדיף כלכלית גם למעבר לשנת 2050.

יצוין כי הערכת העלות של התרחישים השונים כפי שעובדו במודל עברה בקרה מקצועית חיצונית של פירמת רואי החשבון הבינלאומית דלוויט (Deloitte). הבקרה נערכה על הנחות העבודה ועל המודל, ואישרה את תקפות המודל ושלמות העבודה.

המודל מבוסס על הערכות מחירים ומחקרי שוק של גופים בינלאומיים מוכרים. המחירים להקמת מערכות PV חושבו על פי המחירים בפועל בשוק הישראלי בשנת 2020, הערכת העלויות לשנים 2021 עד 2050 מבוססת על מחקרי שוק של מכוני מחקר בינלאומיים.

תרשים 13 - השוואת עלויות ייצור חשמל בשנים 2021-2050



תוכנית NZO מבוססת על טכנולוגיות קיימות והנחות שמרניות ביחס לשיפורים טכנולוגיים ולירידת המחירים הצפויה. בעשור האחרון ההתקדמות בעולם בתחום האנרגיות המתחדשות היתה מהירה מאוד, עם גידול חד בביקוש, ובמקביל לכך חלה ירידה חדה במחירים והוצגו פיתוחים טכנולוגיים אשר הביאו לשיפור בנצילות של מערכות האנרגיה הסולארית ומערכות האגירה. כתוצאה מתהליכים אלו ירידת המחירים בפועל הקדימה את התחזיות של גופי המחקר בעולם.

במקביל למגמת ירידת מחירי האנרגיה המתחדשת, עולה מגמה הקוראת להערכה מחודשת של העלות החיצונית של גזי חממה, ובככל זה קריאה להפנמתם בצורת מס פחמן⁵⁶. העלות האקלימית, או העלות החיצונית של גזי חממה, היא נושא שאינו פשוט להערכה: האם צריך להשוות את עלות ה-CO2 לגודל הנזק המוערך בעקבות משבר האקלים, ואם כן איך מחשבים את עלות הנזק? או אולי נכון להשוות את העלות לפליטת CO2 לעלות של תפיסה וקיבוע של אותה פליטה? בעבודתנו הסתמכנו על עבודת המשרד להגנת הסביבה, שהמלצתו דומה אך מעט נמוכה מהמלצת הבנק העולמי והאו"ם.⁵⁷

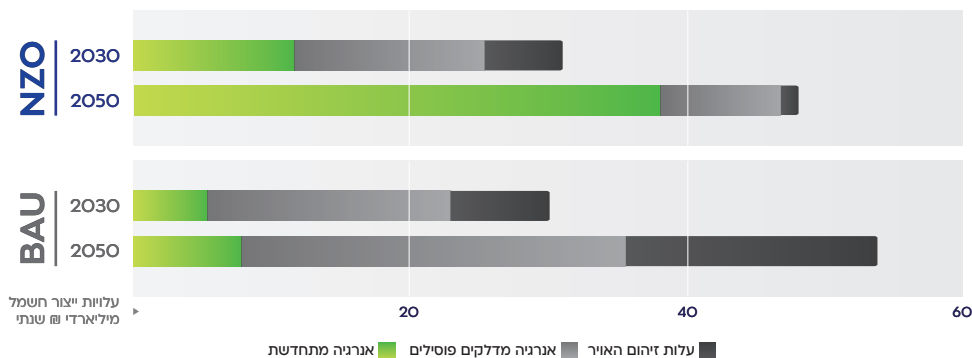
56 להרחבה על מס פחמן, התועלות והשיקולים ביישומו ראו את אתר האינטרנט של ארגון הקרני Carbon Pricing Leadership Coalition, בקישור: [Understanding carbon pricing](#).

57 [How to Mitigate Climate Change](#), World Bank, October 2019 57

עלויות ייצור החשמל

התרשים מטה מציג את העלות השנתית, במיליארדי ₪ לשנה, לייצור חשמל בשנים 2030 ו-2050 בתרחיש NZO ובתרחיש BAU, תוך פירוט חלוקת העלות לסעיפים השונים.

תרשים 14 - עלות שנתית לייצור חשמל, בחלוקה למרכיבי העלות



טבלה 6: עלויות ייצור חשמל הצפויות בשנים 2030 ו-2050 במיליארדי ש"ח לשנה

סה"כ	עלות זיהום האויר	אנרגיה מדלקים פוסיליים	אנרגיה מתחדשת		
30.73	5.44	13.67	11.62	NZO	2030
29.92	7.00	17.43	5.49	BAU	
47.99	1.28	8.66	38.05	NZO	2050
54.04	18.11	28.01	7.91	BAU	

עלות ל-kWh

העלות לייצור kWh בתרחיש NZO צפויה לעמוד על 31 אג' ב-2030 ולרדת ל-30 אג' בשנת 2050. עלויות אלו כוללות את כל העלויות להקמה ותפעול, כולל עלויות האגירה והעלויות החיצוניות.

על פי דו"ח מרכז המידע של הכנסת אשר ניתח את מבנה עלויות משק החשמל בישראל, העלות לייצור kWh בשנת 2019 עמדה על 29.09 אנורות.⁵⁸ עלות זו איננה כוללת את העלויות החיצוניות.

58 תיאור וניתוח מבנה תעריף החשמל לשנת 2019, נעם בוטוש ועמי צדיק, מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 2 ביוני 2019.

בתרחיש BAU העלות ל-KWh תהיה 30 אג' ל-KWh בשנת 2030, ותעלה ל-33 אג' ל-KWh בשנת 2050.

לשם השוואה של העלות ל-KWh על פי תוכנית NZO, לעלות הנוכחית לייצור KWh (כפי שחושבה על ידי מרכז המידע של הכנסת), יש לחשב את העלות ל-KWh לכל העלויות החיצוניות. בחישוב זה העלות בתכנית NZO הינה 26 א"ג ל-KWh ב-2030 ו-29 אגורות ל-KWh בשנת 2050.

העלות ל-KWh שהוצגה לעיל הינה עלות הייצור בלבד, אשר היוותה 64% מסך העלויות לייצור חשמל בשנת 2019. מרכיבי עלות נוספים הינם עלות ההולכה, החלוקה וניהול הרשת.

ניתוח רגישות

הניתוח הכלכלי מבוסס על תחזיות והערכות לטווח זמן של 30 שנה, תקופה אשר במהלכה יתרחשו ודאי שינויים רבים בטכנולוגיות ובעלויות הצפויות. לצורך בקרה ביצענו ניתוחי רגישות עבור מספר משתנים אשר שינוי בהם עשוי להשפיע באופן מהותי על העלויות ועל הניתוח הכלכלי שבוצע.

ניתוח הרגישות כלל התייחסות למשתנים הבאים:

- מחיר הגז
- עלות ההון - השקעה בהקמת מערכות אנרגיה חדשות דורשת הון רב, אשר מגיע בחלקו מהון עצמי של משקיעים ובחלקו ממימון חיצוני.
- עלויות אנרגיות מתחדשות - קצב ירידת המחירים של מערכות PV ופתרונות אגירה.
- עלויות חיצוניות של גזי חממה

ניתוח הרגישות בחן את השפעת השינוי בכל אחד מהמשתנים על העלות הכוללת של תסריט NZO בהשוואה לתסריט BAU, ואת ההשפעה על הכדאיות הכוללת של התוכנית המוצעת.

ירידת מחירי אנרגיה מתחדשת

העלויות של מערכות PV ואגירת אנרגיה נמצאות במגמת ירידה מהירה, אשר מתרחשת בפועל בקצב מהיר יותר מהתחזיות של מכוני המחקר המובילים בעולם בתחום. המגמה של ירידת העלויות מונעת על ידי הביקוש העולמי שגדל וצפוי להמשיך ולגדול בקצב מהיר אף יותר.

בתחום האגירה ניתן להניח שתחול ירידת המחירים מהירה, בעקבות פתרונות אגירה

בטכנולוגיות חדשות ושיפורים בטכנולוגיות הקיימות⁵⁹. בחנו את ההשפעה הצפויה של ירידת מחירים מהירה יותר של עלויות האנרגיה הסולארית על העלות של תרחיש NZO ותרחיש ה BAU.

העלויות המוצגות במיליארדי \$, ובערכים מהוונים לשנים 2021 עד 2050:

טבלה 7: עלויות אנרגיות מתחדשות, במיליארדי ש"ח

קצב ירידת עלויות אנרגיות מתחדשות	תרחיש NZO	תרחיש BAU	חסכון בתרחיש NZO
תרחיש הבסיס	696	698	2
אגירה בלבד - בקצב מהיר ב-25% מהתחזית	680	697	17
PV ואגירה בקצב מהיר ב-25% מהתחזית	646	686	40
PV ואגירה – בקצב איטי מהצפוי ב-10%	717	703	-14

השפעת ריבית ההיוון

תסריט הבסיס אשר לפיו בוצע החישוב הניח עלות הון משוקללת – WACC של 5% לשנה (WACC – Weighted Average Cost of Capital).

הריביות הנמוכות אשר קיימות בשנים האחרונות מביאות לכך שעלות ההון בעולם נמוכה והסיכון הנמוך בהשקעה באנרגיות מתחדשות מאפשר לקבל מימון זול באופן יחסי. מסיבות אלו ניתן היה אף לבסס את הניתוח על WACC בטווח של 3%-4%, כפי שנעשה על ידי רשות החשמל בניתוחים שפורסמו לאחרונה (מענה ליעד מתחדשות של 30% ודו"ח הפחם).

להלן השפעת שנויים אפשריים בעלות ההון על העלות הכוללת של ייצור החשמל:

59 תכנית NZO חישהבתסריט הבסיס הורדת מחירים של אגירה ב 51% עד לשנת 2030, כאשר ישנן חברות בשוק הצופות להגיע ליעד זה עד לשנת 2025 ואף לפני, לדוגמה - חברת Tesla הכריזה בספטמבר 2020 על דור חדש של בטריות לרכבים חשמליים, המיועד לשיווק מסחרי ב-2023 ויביא שיפור ביצועים והורדת עלויות ב-56%. ראו: <https://www.dnvgi.com/feature/tesla-battery-day-energy-transition.html>

טבלה 8: השפעת עלות ההון על העלות הכוללת של תרחישי משק האנרגיה, במיליארדי ש"ח

החסכון בתרחיש NZO	תרחיש BAU	תרחיש NZO	עלות ההון - WACC
2	698	696	תרחיש הבסיס – 5%
16	679	663	4%
-13	719	732	6%

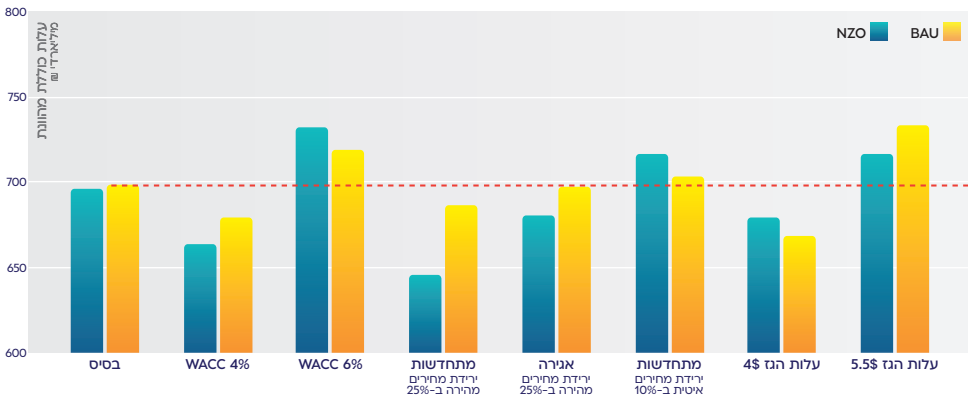
השפעת מחיר הגז

תסריט הבסיס אשר לפיו בוצע החישוב הניח עלות גז של 4.7\$ ל-MMBTU. מחיר זהה למחירו במודלים האחרונים שפרסמה רשות החשמל. בפועל עלות הגז המשוקללת בשנת 2019 עמדה על 5.57\$ ל-MMBTU. מחישוב על פי עלות זו ניתן לראות שמימוש תרחיש NZO יביא לחסכון למשק האנרגיה בישראל של 16 מיליארד ש"ח.

טבלה 9: השפעת מחיר הגז על העלות הכוללת של תרחישי משק האנרגיה, במיליארדי ש"ח

חסכון בתרחיש NZO	תרחיש BAU	תרחיש NZO	מחיר הגז - \$ / MMBTU
2	698	696	תרחיש הבסיס – 4.7
16	732	716	לפי המחיר הממוצע כיום 5.5\$ ל-MMBTU
-11	668	679	ירידת מחיר הגז 4\$

תרשים 15: ניתוח רגישות למודל הכלכלי



עלויות חיצוניות

תרחיש הבסיס הניח ערכים לעלויות החיצוניות על פי הספר הירוק⁶⁰ אשר פורסם על ידי המשרד להגנת הסביבה. עבור גזי חממה הערכים אשר נקבעו בספר הירוק הינם 140 ₪ לטון CO₂eq בשנת 2020, והצמדה בערכים שנתיים של בין 1.6% ל-2.1% בשנים 2020 עד 2050.

בנק ישראל פרסם לאחרונה המלצה להחלת מס פחמן בישראל, תוך התבססות על מחקרים שבוצעו בנושא ובעיקר על עבודה שבוצעה על ידי הבנק העולמי.⁶¹ הערך שנקבע על ידי בנק ישראל הינו 75\$ לטון CO₂eq.

בחישוב על פי ערך זה עבור עלויות חיצוניות של גזי חממה, העלות של תרחיש NZO נמוכה ב-53 מיליארד ₪ מתרחיש BAU.

הספר הירוק של המשרד להגנת הסביבה הסתמך בנושא עלויות זיהום האוויר על ההמלצות של מכון המחקר האירופאי CE DELFT, אך עבור גזי חממה הוחלט להסתמך על מודל של ה-EPA. ההמלצה של CE Delft לתמחור גזי חממה הינה על שימוש בערכים של 92 יורו לטון בשנת 2030, עם הצמדה שנתית של 3.5% ועליית תעריפים עד ל-190 יורו בשנת 2050.

שילוב של החלת מס פחמן בעולם והאצת קצב ירידת העלויות בתחום האנרגיות המתחדשות מומחש בתרחיש הכולל מס פחמן לפי 75\$ לטון וירידת מחירים מהירה של אנרגיות מתחדשות (בקצב הגבוה ב-25% מהתחזיות). בשילוב של שני תנאים אלו תרחיש NZO יחסוך למשק 92 מיליארד ₪.

עלויות נוספות למקטע הייצור

מעבר להערכת מרכיבי העלות השונים במקטע ייצור החשמל, בחנו במסגרת העבודה את השפעת התוכנית על שני רכיבים משמעותיים נוספים במשק החשמל. הראשון הוא ההשקעה הנוספת הנדרשת ברשת ההולכה. הבחינה התייחסה לעלויות הנוספות אשר ידרשו במטרה לתת מענה לצורך לחבר מתקני ייצור חשמל מבזרים לרשת, ואיננה מתיימרת לבחון את כלל ההשקעות אשר ידרשו ברשת ההולכה. בתרחיש BAU צפויה השקעה עודפת ברשת ההולכה בסך של כ-20 מיליארד ₪, בעוד שבתרחיש NZO צפויה השקעה עודפת של כ-61 מיליארד ₪.

הרכיב השני הוא עלות הביטחון האנרגטי. הניתוח בוצע עבור שנת הייחוס 2035 שהינה

60 הספר הירוק, המשרד להגנת הסביבה, 7/2020 - https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/green_book_external_costs_air_pollutants_greenhouse_gases

61 בנק ישראל: המאבק העולמי בהתחממות הגלובלית והשלכותיו על ישראל. דוברות בנק ישראל, 10 ביוני 2020. <https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/10-6-2020.aspx>

שנת האמצע לתקופה אשר בחנו, ובהתאם לאופן החישוב של רשות החשמל במענה להגדלת היעד ל-30%.

ההוצאה בתרחיש BAU לצורכי ביטחון אנרגטי היא 34.5 מיליארד ₪ על פני התקופה הנבדקת, לעומת כ-11.2 מיליארד ₪ בלבד בתרחיש NZO. מכאן שההיסכון בתרחיש NZO הוא כ-23.3 מיליארד ₪, נוסף על ההיסכון במקטע ייצור החשמל.

עלויות חיצוניות נוספות

הניתוח הכלכלי שלעיל עסק בעלויות הישירות של ייצור החשמל בעשורים לבוא. אולם חשוב לציין כי ישנן הוצאות נוספות אשר מדינת ישראל מוציאה בתמיכה במשק הגז, כגון הגנה על אסדות הגז, השקעה בהקמת צנרת הולכת הגז, סיוע למימון הקמת מערכות קוגנרציה במפעלים ועוד. במקביל להוצאות הנוספות ישנן למדינה הכנסות ממיסוי משק הגז והדלקים וצפי להכנסות נוספות מ"מס ששינסקי" על הגז. כאמור, תוכנית NZO לא כללה היבטים אלו בניתוח הכלכלי שלעיל. ההערכות שהובאו מבוססות על מרכיבי העלות שמצוינים על ידי רשות החשמל ומשרד האנרגיה בניתוחיהם הכלכליים.

עם זאת חשוב לעמוד על סוגיית "מס הפחמן" אשר צוברת תאוצה בעולם. ניתן לזהות מגמה עולמית הקוראת לתמחור פחמן, וחיוב הגורם האחראי לפליטת הפחמן לשאת בעלויות של הנזקים הסביבתיים הנגרמים מפליטתו.

מובילי דעה ומדענים מצדדים בהטלת מס פחמן ככלי לצמצום פליטות, ע"י מימוש העיקרון של "זיהמת - שילמת" והשפעה דרכו על התנהגות המנזר התעשייתי והעסקי. הבנק העולמי, ארגון ה-OECD וגופים בינלאומיים נוספים תומכים בצעדים שכאלו וממליצים על הטלת "מס פחמן".⁶²

בישראל, המשרד להגנת הסביבה⁶³ ובנק ישראל⁶⁴ פירסמו בחודש יוני 2020 ניירות עמדה בנושא הממליצים על הטלת "מס פחמן".

היה ומדיניות שכזו, אשר תטייל "מס פחמן" על מוצרים שונים, תקודם בעולם, בעוד במצב שבו משק האנרגיה בישראל יהיה מבוסס על דלקים פוסיליים, המשמעות תהיה ייקור של הייצוא הישראלי ופגיעה בכלכלה ובתעסוקה במשק. מעבר לאנרגיות מתחדשות והקטנת פליטת גזי החממה יקטינו את הסיכון לפגיעה בכלכלה הישראלית כתוצאה מהטלת "מס פחמן" בעולם.

⁶² ראו הערת שוליים 58.

⁶³ על רקע משבר האקלים: המשרד להגנת הסביבה בוחן מנגנונים לתמחור פליטות פחמן. דוברות המשרד להגנת הסביבה, 10 ביוני 2020.

⁶⁴ https://www.gov.il/he/departments/news/carbon_emission_pricing

⁶⁴ ראו לעיל, דוברות בנק ישראל, 10 ביוני 2020.

אחרית דבר

עבודה זו הוקדשה למקטע הייצור במשק החשמל, ולבחינה עמוקה ומקיפה של השאלה האם יתכן מצב עתידי בו כל החשמל הנצרך בישראל, או כמעט כולו, ייוצר ממקורות מתחדשים.

באמצעות מודל ממוחשב הראינו כי ניתן יהיה לתת מענה ליותר מ-50% מהביקוש הצפוי לחשמל בשנת 2030, ולכ-95% מהביקוש ב-2050 מאנרגיה סולארית. זאת אם תשכיל ישראל להתקין כ-115 GW של מערכות PV, ולהקים מערכות לאגירת חשמל בקיבולת של כ-320 GWh. את שארית הביקוש (5%) ניתן יהיה לספק מאנרגיה פוסילית מזהמת, גז, אשר תתן מענה לביקוש לחשמל בימים בשנה בהם התפוקה הסולארית תהיה נמוכה מהביקוש.

יתכן אף שניתן יהיה לתת מענה לשארית הביקוש ממקורות מתחדשים אחרים, כוכל הפקת אנרגיה מפסולת, ועל ידי פתרונות טכנולוגיים אחרים אשר עשויים להבשיל בבוא הזמן. תכנית NZO בחנה את השימויות על בסיס שימוש בטכנולוגיות קיימות, אך בהחלט מומלץ ואף רצוי יהיה, לבחון את התכנית מחדש כל מספר שנים ולהתאימה להתפתחויות הטכנולוגיות בתחום.

דומה שבימינו הכל יסכימו על החשיבות של הפחתת הפליטות הפחמניות והאחרות התורמות לאפקט החממה, וגם על הצורך הדוחק בהפחתת זיהום האוויר. אולם עד כה סבל הדיון הציבורי בישראל בנושאים אלה ממעין "תקרת זכוכית", אשר הגבילה את מרחב האפשרויות הנדון; ניתן לקרוא ל"תקרת הזכוכית" הזו – שאלת ההיתכנות. כלומר, הכל מסכימים על הצורך להפחית את הפליטות המזיקות לסביבה ולאדם לאפס, "לו היה הדבר אפשרי". ולו היה הדבר אפשרי, הייתה לכך השפעה ניכרת יותר על תוכניות העבודה הקיימות במשק האנרגיה, כך נטען עד כה. ניתן היה להעמיד יעדים גבוהים יותר להיקף החשמל המיוצר ממקורות מתחדשים, וניתן היה להימנע מקשירת עתידה האנרגטי של ישראל לדלק פוסילי מזהם כגז, לו רק היה זה אפשרי. זו בדיוק הנקודה שבה עבודה זו, ופרויקט NZO בכלל, מבקשים להשתלב בשיח: הדבר אפשרי. ניתן להגיע למצב שבו החשמל הנצרך בישראל, רובו ככולו, ייוצר ממקורות מתחדשים, כך אנו מראים בעבודה זו. ניתן לתת מענה למעלה מ-50% מהחשמל הנצרך באמצעות מקורות מתחדשים כבר ב-2030, ועד 95% ב-2050.

המעבר לייצור חשמל באופן כמעט מלא מאנרגיות מתחדשות כדאי ממספר בחינות. התועלות הסביבתיות והבריאותיות שלו, קרי ייצור חשמל באופן שאינו מזיק לסביבה

ולאדם, הן אולי הבולטות ביותר; אך כפי שהראינו בעבודה זו, מימוש תוכנית NZO 2050 צפוי גם להביא לחיסכון משקי כולל של מיליארדי שקלים.

לכך יש להוסיף תועלות נוספות של עצמאות אנרגטית וביטחון אנרגטי. לא קשה לדמיין את היתרונות שעשויים לצמוח לישראל מכך בשדה המדיני, בשיתוף הפעולה האזורי, במובנים ביטחוניים וגם בשדה הפנים ישראלי, בהיבטים חברתיים שונים.

לשיטתנו, הנחת עבודה זו – כי הדבר אפשרי – צריכה לחולל שינוי משמעותי בשיח הציבורי בישראל כמו גם בעשייתם של מקבלי החלטות ומנהיגים במגזר הציבורי, העסקי, החברתי ובעולם האקדמי. שכן מרגע שהגשמת חזון אפס הפליטות בייצור החשמל הפכה לאפשרית, ניתנת למימוש, ישנה חובה מוסרית, כלפי הדור הנוכחי וכלפי הדורות הבאים, להקדיש את המאמצים הנדרשים להגשמת חזון זה.

ככתוב (דברים ל', י"ב-י"ד): "לא בְּשָׂמִים, היא: לֵאמֹר, מִי יַעֲלֶה-לָנוּ הַשְּׂמִימָה וְיִקְחָהּ לָנוּ, וְיִשְׁמַעֲנוּ אֹתָהּ, וְנַעֲשֶׂנָה. וְלֹא-מֵעֵבֶר לַיָּם, היא: לֵאמֹר, מִי יַעֲבֹר-לָנוּ אֶל-עֵבֶר הַיָּם וְיִקְחָהּ לָנוּ, וְיִשְׁמַעֲנוּ אֹתָהּ, וְנַעֲשֶׂנָה. כִּי-קָרוֹב אֵלֶיךָ הַדָּבָר, מֵאֵד: בְּפִיךָ וּבִלְבָבְךָ, לַעֲשׂוֹתוֹ".

מעטים זוכרים כי בנימין זאב הרצל הקדיש מספר עמודים בספרו הנבואי "אלטנוילנד" לסוגיית האנרגיה. בין היתר מתאר הרצל את האופן שבו ירתמו תושבי האוטופיה העתידנית בארץ ישראל את כוחות הטבע לטובת החברה, תוך מזעור הפגיעה בטבע. הפתרון הטכני שהרצל הציע (ניצול הבדלי הגובה בין הים התיכון לים המלח לצורך יצירת חשמל הידרו-אלקטרי) אולי אינו ישים, אך העיקרון אותו הניח רלוונטי מתמיד. לא ניתן לדמיין את המשך החזון הצינוני ללא התמודדות עם המשבר האקלימי המאיים על מדינת ישראל. לא ניתן יהיה להתמודד עם המשבר האקלימי העולמי ללא מתן מענה לייצור החשמל הנדרש לחברה מתקדמת ובלא פגיעה בסביבה ובאדם.

ניתן לתת מענה למעלה מ-50% מהחשמל הנצרך באמצעות מקורות מתחדשים כבר ב-2030, ועד 95% ב-2050

עבודה זו התמקדה כאמור במקטע הייצור של החשמל. אולם משק החשמל והאנרגיה כולל מקטעים נוספים – מקטע ההולכה, מקטע החלוקה ומקטע האספקה. שינוי האופן בו מיוצר החשמל משמעותו שינוי גם בהולכה ובאספקה לצרכנים. עולות כאן שאלות רבות הנוגעות לרשת החשמל, ואופן החיבור לרשת כצרכן חשמל וכיצרן. שאלות אלו קשורות גם לאופן שבו תבוצע ההתייעלות האנרגטית, לרבות המעבר של תחבורה, תעשייה ומשקי בית משימוש בדלקים לשימוש בחשמל.

יש צורך להתייחס גם לאופן שבו מעוצב השימוש בחשמל, פריסת הביקוש לחשמל על פני כלל שעות היממה והממשק בין ייצור חשמל לצריכתו. חשוב לזכור כי האופן שבו אנו מייצרים וצורכים חשמל לא מורכב רק מדלקים, טורבינות ומוצרים חשמליים ביתיים; "חשמל" הוא גם סבך של תפיסות תרבותיות, אינטרסים, מודלים עסקיים, מבנים חברתיים, תקנות וחוקים.

המעבר למשק אנרגיה המבוסס כמעט במלואו על אנרגיה סולארית ומקורות מתחדשים נוספים אפשרי בזכות ההתקדמות שחלה בפתרונות לאגירת חשמל ואנרגיה. כך ניתן לספק חשמל שמקורו מהשמש גם בשעות הלילה. משק החשמל והאנרגיה הישראלי יושפע מאוד מפתרונות האגירה שיפותחו בישראל.

נושאים אלה נחקרים, מעובדים ונדונים על ידי חברי הצוות של NZO 2050, והמסקנות יובאו בפרסומים עתידיים של הפרויקט. לצד המחקר ועיבודו, מתבצעים בהובלת "מרכז השל לקיימות" גם מספר ניסיונות מעשיים, "פיילוטים" של קידום המעבר לאנרגיות מתחדשות ברשויות מקומיות. גם המסקנות העולות מהתנסויות מעשיות אלו, אשר ניתן ללמוד מהן רבות על האפשרויות הגלומות במשק חשמל מבוזר, יובאו בפרסומים עתידיים של הפרויקט.

הזמן להחלטה על האופן בו יראה עתידנו הוא ההווה. ההחלטות שמתקבלות כיום במשק האנרגיה והחשמל עלולות להנציח הישענות על דלקים פוסיליים

אם נבקש להותיר רושם מרכזי אחד על הקורא והקוראת של דפים אלו, הרי שזהו המסר: הזמן להחלטה על האופן בו יראה עתידנו הוא ההווה. ההחלטות שמתקבלות כיום במשק האנרגיה והחשמל נעשות על בסיס הנחות יסוד שונות מאלו המבוטאות בעבודה זו, ועלולות להנציח הישענות על דלקים פוסיליים. החזון שהוצג מעלה, בדבר אפשרות ייצור 95% מהחשמל הנצרך בישראל ממקורות מתחדשים, הוא אפשרי, בתנאי שמקבלי החלטות יפעלו לטובתו כאן ועכשיו.

נספחים

נספח א' – אגירה של אנרגיה וחשמל

לאתגרים המתלווים לניסיון לקיים אספקת חשמל יציבה ועקבית המבוססת על אנרגיה מתחדשת יש מענה מרכזי אשר נמצא בתנופה מחקרית ומסחרית בעשורים האחרונים, והוא אגירה של אנרגיה וחשמל בהיקפים נרחבים.⁶⁵ עד לעת האחרונה, חשמל היה נצרך בדרך כלל עם ייצורו, כמעט באופן מיידי. כעת, מתקני אגירת אנרגיה וחשמל מאפשרים התמודדות שונה עם כוח טבע זה.

אגירת חשמל היא אתגר מורכב טכנית, אולם בשנים האחרונות חלה התקדמות משמעותית בנושא זה. לא רק שטכניקות האגירה הופכות יעילות יותר, ישנה גם ירידה מתמשכת ועקבית במחיר האגירה, אשר צפויה להימשך.⁶⁶ אף שלאגירת אנרגיה מספר תועלות לרשת החשמל, דוגמת ייצוב תדר ומתח, בעבודה זו נתמקד בתועלת של אספקת חשמל בלבד, כמענה לביקוש בשעות חוסר.

יש לציין שבעת הטעינה והפריקה של האנרגיה החשמלית קיים אובדן אנרגיה. חלק מהאנרגיה אובד בעת הטעינה, חלק בעת הפריקה וחלק בזמן האחסון. היחס בין החשמל הנפרק לחשמל הנטען נקרא "יחס נצילות" ויעילות טכניקות האגירה השונות נאמדת בין היתר על פי יחס זה.

שתי טכניקות האגירה המרכזיות כיום בעולם הן: (1) אגירה שאובה (2) סוללות נטענות. קיימות טכנולוגיות נוספות לאגירת אנרגיה ובעולם מבוצעות השקעות גדולות בתחום לפיתוח פתרונות אגירה מתקדמים תוך הורדת העלות ומתן פתרון להיבטים סביבתיים בתחום.

אגירת אנרגיה הינה מרכיב קריטי בשנוי המתרחש בעולם בתחום האנרגיה וצוות NZO יקדיש עבודה יעודית לנושא זה.

⁶⁵ בעניין חשיבות ההתקדמות בטכנולוגיית הסוללות במעבר האפשרי לאנרגיות מתחדשות ראו: Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification, Charlie Bloch, James Newcomb, Samhita Shieldar, Madeline Tyson, 2019, Rocky Mountain Institute
/https://rmi.org/insight/breakthrough-batteries

⁶⁶ בעניין נגממות המחירים בטכניקות האגירה ראו בעבודה זו בהובלת פרופ' ברייאר מפינלנד, Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelized cost of electricity, Eero Vartiainen, Gaetan Masson, Christian Breyer, David Moser, Eduardo Roman Medina, July 2019, Wiley – Progress in Photovoltaics
וכן עבודה נוספת מטעם המעבדה הלאומית האמריקאית לאנרגיות מתחדשות:
Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage, Wesley Cole and A. Will Frazier, June 2019, NREL
https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222.pdf

להלן תאור קצר על 2 פתרונות האגירה המרכזיים כיום בעולם:

אגירה שאובה

בטכניקה זו משתמשים בחשמל בשעות העודף על מנת לשאוב מים ממאגר נמוך למאגר גבוה ממנו באמצעות משאבה. כאשר יש צורך בהפקת חשמל, בשעות המחסור, מפילים את המים חזרה למאגר הנמוך. תנועת המים מפעילה גנרטור המייצר חשמל. זו היא הטכניקה הנפוצה כיום לאגירת חשמל בארץ ובעולם, אולם חסרונותיה בולטים: יעילות אנרגטית נמוכה יחסית, תלות בתנאים טופוגרפיים ספציפיים, נזקים סביבתיים משמעותיים, צריכה משמעותית של מים, תהליך הקמה מורכב וארוך והשקעה ניכרת במתקני תשתית.

מאידיך יש לשיטה זו גם יתרונות: כמות האנרגיה הנאגרת היא גדולה מאוד, אורך החיים של מתקן אגירה הוא ארוך (לעיתים עד 40 שנים), ולכן העלות נמוכה יחסית לכל קילו-וואט/שעה שנאגר.

סוללות

הסוללות הפופולריות ביותר כיום עשויות ליתיום וניתן לטעון אותן בחשמל שוב ושוב, "ולאחסן" אותו בהן עד לשימוש בו. טלפונים סלולריים, מחשבים ניידים, כלי רכב ועוד עושים שימוש בסוללות ליתיום-יון. לסוללות ליתיום-יון מספר תכונות שהפכו אותן לפתרון המועדף כיום בעולם, בין היתר צפיפות אנרגיה גבוהה יחסית וסילומיות (יכולת פעולה במגוון סדרי גודל) המתאימה לאגירה ביתית, שכונתית, רשתית או צמודה למתקני ייצור. השימוש בסוללות ליתיום-יון דורש תשתיות מינימליות בלבד וניתן להתקין אותן במהירות ובפשטות.

עלות סוללות ליתיום-יון נמצאת במגמת ירידה עקבית שצפויה להימשך.⁶⁷ בעבודה זו הנחנו הנחות זהירות ושמרניות לגבי העתיד ובכלל זה לגבי קצב הירידה במחירי הסוללות והשיפור ביעילות הסוללות.

עם זאת, ניתן להצביע על מספר חסרונות לסוללות ליתיום-יון: המחיר עדיין גבוה, חומרי הגלם לייצור הינם בעלי "טביעת רגל" סביבתית וחברתית משמעותית, אורך חיים קצר יחסית (כיום 15 שנה ומשנת 2030 - 20 שנה, לעומת מערכות PV שאורך חייהן 25 עד 30 שנים, ואגירה שאובה שעשויה להגיע ל-40 שנים כאמור), פריקה עמוקה וטעינה מהירה עלולים לקצר את אורך חיי הסוללה, וגם התרחשו תקלות שגרמו לשריפה. לאחרונה ניכרת תנופה של מחקר ופיתוח בתחום טכנולוגיות סוללות עדיפות ופתרונות

אגירת אנרגיה נוספים. חלק מטכנולוגיות אלו כבר הגיעו לכדי שימוש מסחרי ראשוני, ועשויות לתת מענה לחלק מהבעיות שיש לסוללות ליתיום-יון.

אגירה יומית ואגירה עונתית

האגירה עשויה לשמש להעברת אנרגיה מזמנים בהם יש לנו עודף אנרגיה סולארית לזמנים בהם יש לנו חוסר באנרגיה סולארית. בהקשר זה יש להבחין בין שני סוגים של אגירה: (1) אגירה יומית, כזו המעבירה אנרגיה עודפת מהיום לכילה (2) אגירה עונתית, המעבירה אנרגיה עודפת מהקיץ או האביב לחורף. המודל וההמלצות מתייחסים לאגירה יומית בלבד.

נספח ב' – מילון מושגים, יחידות מידה וקיצורים

אגירה שאובה

טכנולוגיה לאגירת חשמל באמצעות מים תוך שימוש בהפרשי גבהים בין שני מאגרי מים. הרעיון הוא לשאוב את המים באמצעות חשמל בשעות שבהן מיוצר חשמל בעודף על פני הביקוש, ולהזרים את המים בחזרה מטה לצורך ייצור כאשר ישנו ביקוש הגבוה מכושר הייצור. בדרכם מטה המים מניעים טורבינות המייצרות חשמל.

אנרגיה חשמלית

האנרגיה המשמשת לרוב הפעילויות היומיומיות (למעט תחבורה ותעשייה). האנרגיה נמדדת ביחידות של קילו-וואט-שעה, או kWh. כמויות אנרגיה גדולות נמדדות במגה-וואט-שעה (אלפי kWh) וג'יגה-וואט-שעה (אלפי מגה-וואט-שעה).

אנרגיה סולארית

קרינת השמש, המשמשת לייצור חשמל בטכנולוגיה ישירה באמצעות לוחות פוטו-וולטאים, או באופן עקיף באמצעות חום בתחנות כוח תרמו-סולאריות כדוגמת מגדל השמש באשלים.

אנרגיה פוסילית

אנרגיה שמקורה בדלקי מאובנים דוגמת: פחם, נפט, פצלי שמן וגז. אנרגיה מסוג זה היא אנרגיה מתכלה, כאשר תהליכי ההפקה והשימוש של הדלקים המאובנים גורמים לזיהום אוויר ותורמים לאפקט החממה.

אנרגית פסולת

שיטת ניצול האנרגיה הנמצאת בפסולת ומכונה גם "השבת אנרגיה מפסולת". שיטה זו חוסכת בצורך להטמין פסולת, כך שרק שיירי התהליך שלא ניתנים למחזור נשלחים להטמנה, ומספקת אנרגיה המאפשרת להחליף מקורות אנרגיה מזהמים. המרת פסולת לאנרגיה התבססה בעבר על שריפה של הפסולת, אך כיום ישנן שיטות יעילות ונקיות יותר והן: ייצור גז מתאן, באמצעות עיכול על ידי חיידקים של פסולת עירונית רטובה, או "גזיפיקציה", המיועדת לגזם חקלאי ועירוני כחומר גלם, בה מופק גז מפירוק הגזם בתא מחומם לטמפרטורה גבוהה ללא חמצן.

אנרגית רוח

שיטת ייצור חשמל המבוססת על ניצול הרוח הקיימת בטבע לסיבוב להבי טורבינה, אשר מפיקה חשמל. בעולם הרוח מהווה מקור מרכזי לאנרגיה מתחדשת, אך בישראל הרוח יחסית חלשה, ובמדינה הצפופה קשה למצוא אתרים מרוחקים מספיק ממקומות יישוב. שתי הסיבות יחד גורמות לכך שפוטנציאל ייצור החשמל מרוח בישראל הינו נמוך יחסית.

הספק מותקן

מונח המתאר את כושר ייצור החשמל של יחידת ייצור, המחושב כמכפלה של המתח בזרם. 1 וואט מתאר צריכת אנרגיה חשמלית במתח של 1 וולט בזרם של 1 אמפר. תחנת כוח בהספק של 100 מגה-וואט, פירושו תחנה שמסוגלת לספק לכל היותר 100 מגה-וואט של חשמל. יש להבחין בין ההספק המותקן, המהווה את יכולת הייצור, לבין ייצור האנרגיה בפועל. תחנת כוח גזית בהספק של 100 מגה-וואט מסוגלת לפעול בשנה כ-85% מהזמן (נדרשות עצירות לשם תחזוקה), או כ-7,500 שעות בשנה, ולכן לייצר 750,000 מגה-וואט-שעה או 750 ג'יגה-וואט-שעה בשנה. תחנת כוח סולארית בהספק דומה פועלת כ-20% מהזמן בממוצע, או כ-1,700 שעות בשנה ולכן תייצר בפועל 170 ג'יגה-וואט-שעה בשנה בלבד.

מקורות מתחדשים לאנרגיה

מקורות אנרגיה דוגמת: רוח, זרימת מים, תנועת גלים, קרינת השמש, פליטת חום מליבת כדור הארץ. מקורות אלו מתאפיינים בכך שהם נוצרים בטבע, ללא תלות בהתערבות האדם, והשימוש בהם אינו מזהם, אינו תורם לאפקט החממה ואיננו אוזל. קיימים מקורות אנרגיה מתחדשים למחצה, כמו דלקים המופקים מצמחים והפקת אנרגיה מפסולת. למרות היותם מתחדשים, הם תלויים במעורבות האדם והם כן גורמים לזיהום אוויר ופליטת גזי חממה.

סוללות

שיטת לאגירת אנרגיה חשמלית בזרם ישר (DC). כל סוללה מכילה "תאים חשמליים", כאשר השיטה הנפוצה כיום הוא היא שימוש בתא אלקטרו-כימי, שבו החשמל מופק כתוצאה מתהליך כימי. קיימים סוגים רבים של הרכבים אפשריים לתהליך הכימי, כאשר התהליכים הנפוצים ביותר כיום מבוססים על תנועה של יוני ליתיום (Lithium Ion) בין שתי אלקטרודות.

שעות שמש אפקטיביות

מספר שעות השמש ה"מלאות" בהן פנל סולרי מפיק חשמל בשנה. מכיוון שבימים שונים ובשעות שונות אור השמש מגיע בזוויות שונות, תפוקת החשמל מהפאנלים משתנה לאורך השנה. שעות השמש האפקטיביות מחושבות על ידי סיכום האנרגיה השנתית המיוצרת על ידי פאנל סולארי במקום גיאוגרפי מסוים. התוצאה מחולקת בייצור החשמל שהיה מתקבל מהפאנל בשעת עבודה בהספק מלא (חשיפה מלאה לשמש בזווית מתאימה), ומתקבל מספר השעות של עבודה בהספק מלא. כך למשל, למרות שסך שעות האור באזור תל אביב עומד על כ-3,000 שעות בשנה, הרי ששעות השמש האפקטיביות יהיו בערך 1,700.

תחנות כוח במחזור משולב (מחז"מ)

שיטת הפקת חשמל מגז המתאפיינת ביעילות גבוהה יחסית וזמני התנעה והשבתה ארוכים יחסית. שיטה זו מותאמת לייצור חשמל בהספק קבוע המכונה גם "עומס בסיס" ולא להספק משתנה במהירות או בשעות שיא הביקוש.

תחנות כוח פיקריות או תחנות במחזור פתוח

שיטת הפקת חשמל מגז המתאפיינת ביעילות נמוכה יחסית וזמני התנעה והשבתה קצרים יחסית. שיטה זו לא מותאמת לייצור חשמל בהספק קבוע המכונה גם "עומס בסיס", והשימוש בה מותאם להספק משתנה, ובמענה לביקוש השיא.

מערכות PV

מערכות פוטו-וולטאיות, אשר ממירות אנרגיה סולארית ישירות לחשמל, בדרך כלל על ידי שימוש בלוחות מבוססי סיליקון, אשר ממיר את אור השמש למתח חשמלי. יעילות של פאנלים סולאריים מסחריים נעה בשנת 2020 בין 19% ל-22%. הטכנולוגיות הנפוצות כיום מוגבלות ליעילות תיאורטית מקסימלית של כ-30%. בתנאי מעבדה הושגה כבר כיום (2020) יעילות של 44% באמצעות שילוב טכניקות של ריכוז אור, פנלים דו צדדיים ושימוש בחומרים שונים בצורות מיוחדות.

אנרגיה תרמו-סולארית

שיטת ייצור חשמל המבוססת על המרת אנרגיית האור שמפיצה השמש לאנרגיית חום, שבאמצעותה מייצרים קיטור. הקיטור מניע טורבינה המסובבת גנרטור שמייצר את החשמל. שיטה זו יעילה פחות ממערכת PV רגילה, אך מאפשרת פיזור של ייצור החשמל לאורך יותר שעות ביממה בזכות אגירת חום.

תרחיש "עסקים כרגיל"

תחזית לצריכת סך האנרגיה במשק בהסתמך על מגמות הגידול הקיימות, החלטות המדיניות שכבר התקבלו ושימור המצב הרגולטורי והתמריצים הכלכליים הקיימים כיום. נהוג להשוות תוכניות להתייעלות אנרגטית, המרת דלקים לחשמל ותמהיל שונה של מקורות האנרגיה להפקת חשמל לתרחיש זה, לבדיקת סך האנרגיה הכולל, סך האנרגיה בשיטה מסוימת או לבחינת ההשפעה הכלכלית הצפויה של שינוי רגולטורי או כלכלי.

NREL

ראשי התיבות של National Renewable Energy Laboratory, מוסד המחקר שנמצא בארצות הברית והינו הגדול מסוגו בעולם לאנרגיות מתחדשות. המוסד מתוקצב ע"י הממשל הפדרלי וגם על ידי גורמים פרטיים בתעשיית האנרגיה בפרויקטים ספציפיים.

יחידות מידה

הספק חשמלי נאמד ב-וואט (WATT). יחידות המידה המקובלות קילו וואט - kW, מגה (מיליון) וואט - MW, ג'יגה (מיליארד) וואט - GW, וטרה (טריליון) וואט - TW. כמות אנרגיה חשמלית נאמדת בהספק כפול יחידת זמן, דוגמת קילו-וואט שעה (kWh) - מגה-וואט שעה - MWh, ג'יגה-וואט שעה - GWh, או טרה-וואט שעה - TWh.

נספח ג' - החברים והחברות בצוות NZO 2050

ויקטור וייס - מנכ"ל לשעבר של מרכז השל לקיימות, הקים וניהל את פרויקט NZO, בעברו מנהל תחום איכות הסביבה בצה"ל, גיאוגרף, איש חינוך, מרצה בכיר לקיימות ושינויי אקלים.

אביבה שמש - בעלת ניסיון בניהול מוצר, שיווק ופיתוח עסקי בחברות טכנולוגיה בינלאומיות; ניהלה פרויקטים בתחום מדיניות אקלים במרכז השל לקיימות, כותבת על אקלים וניאופוליטיקה בפורום לחשיבה אזורית ודוקטורנטית בבית הספר לממשל באוניברסיטה הטכנית של מינכן.

עו"ד אורלי אהרוני - יועצת ומרצה בתחומי רגולציה וקיימות, חוקרת Sustainable Finance, רגולציה פיננסית להתמודדות עם משבר האקלים, בעלת ניסיון של מעל 25 שנים במשפט ציבורי, אזרחי ומסחרי, לשעבר בכירה בפרקליטות האזרחית והיועצת המשפטית לרשות הטבע והגנים.

אלון סגל - מהנדס תעשייה וניהול, בעלים של חברת ייעוץ המתמחה בניהול פרויקטים, תכנון ובקרה והנדסת תעשייה וניהול, פועל במסגרת תוכנית NZO למעבר משק האנרגיה בישראל לאנרגיות מתחדשות ומסייע למרכז השל בפרויקטים נוספים בתחום.

אמנון פורטוגלי - חוקר אנרגיה, תאגידים, וניאוליברליזם, בוגר הנדסה כימית בטכניון ובוגר תואר שני במנהל עסקים MBA בירושלים (בלי תואר), בעל כ-20 שנות ניסיון בתחומים שונים של הנדסה כימית כולל ניהול תעשייתי, בעל כ-20 שנות ניסיון בהון סיכון ובבנקאות השקעות, יזם ומרצה, היה מנטור בפרויקט וורטון-רקאנטי באוניברסיטת ת"א, מרצה מהחוץ באוניברסיטת חיפה ובבית הספר לניהול וכלכלה במכללה האקדמית תל אביב -יפו, היה שותף יזם בפרויקט חוות הרוח בתל-עסניה.

ארז פרי - דוקטורנט באוניברסיטת תל אביב, עוסק בתכנון, מיפוי ומדיניות של אנרגיות מתחדשות בראייה כלכלית וסביבתית.

ד"ר בעז קידר - מנהל מחלקת תכנון בר קיימא ואנרגיה בעיריית תל אביב - יפו, מתכנן עירוני, מומחה בתחומי התייעלות אנרגטית ובנייה ירוקה, בעברו היה שותף במשרד אדריכלים המתמחה במבני ציבור וחינוך וכן עמית - מבצע (trade ally).

בר וייס - עוסק בחדשנות וייזום פרויקטים בתחום האנרגיה הסולארית, חוקר את התחום האגריו-וולטאי (דו-שימוש בקרקע לחקלאות ו-PV) במסגרת תואר שני בלימודי סביבה באוניברסיטת ת"א.

אינג' גיל שועה - מהנדס חשמל מוסמך, עבד כ-10 שנים בייזום, תכנון, ויישום של פרויקטי אנרגיה בתעשייה בארץ ובמדינות מתפתחות, מומחה לאנרגיה מתחדשת, הולכה, מיגון ברקים והארקות, חבר הנהלה בעמותות ואירגונים חברתיים סביבתיים, הקים את משרד SGE לתכנון יעוץ ומתן שירותי פיתוח הנדסיים לפרויקטי תשתית ושילוב של כדאיות כלכלית לשילוב כלי אימפקט חברתי סביבתי.

דנה אפרתי פיליפ - דוקטורנטית באוניברסיטת בן גוריון בחוג לגיאוגרפיה ותכנון סביבתי, עוסקת במחקר של מדיניות מערכות מזון, אנרגיה ומים מקיימות, לשעבר יועצת פרלמנטרית בכנסת בנושאי סביבה, אקלים ואנרגיות מתחדשות.

יוסף ישראל אברמוביץ - כונה על ידי ה-CNN בשם "אחד מ-6 החלוצים הירוקים המובילים בעולם", "איש השנה" בוועידת אנרגיה ועסקים הישראלית, זכה באות הגלובוס הירוק בכנסת, חלוץ אנרגיה ירוקה בארץ ובאפריקה, נשוי +5 @KaptainSunshine.

יוקי גיל - תעשיין, מייסד חברת שורש שזכתה השנה בקול קורא חלוץ והדגמה של משרד האנרגיה לניתוק מפעל מרשת החשמל הארצית תוך שימוש במערכות אנרגיה מתחדשת ואגירה, זוכה פרס הגלובוס הירוק לשנת 2011, יזם פרויקט NZO וחבר בצוות ההיגוי של הפרויקט.

יעקב גלאזויס - מתכנת ומבצע פרויקטים בתחום אוטומציה תעשייתית לאורך שנים, בעלים של חברת גלים תוכנה ומערכות לתעשייה, חוקר וכותב במגוון תחומי מדיניות, תושב השומרון וסב לנכדים.

יערה בן נחום - רכזת אנרגיות מתחדשות במרכז השל, בהכשרתה פסיכולוגית ארגונית עם ניסיון בהטמעת תהליכי חדשנות ויצירתיות, מתמחה בהורדת רעיונות גבוהים לשינוי ירוק בשטח.

מוטי שגב - לאחר שירות ממושך בצה"ל וכבוגר תוכנית העמיתים של מרכז השל, הצטרף לצוות על מנת לבנות אלטרנטיבה המאפשרת חיים מתקדמים תוך צמצום פליטות כמתחייב מהמאבק במשבר האקלים.

ניר גורדון - מנכ"ל אסקו מרכז לייזום עסקי אימפקט ויעוץ לחדשנות עסקית חברתית, מומחה בתחומים של ייזום והקמה של סולארי, התייעלות אנרגטית, וניהול ביקושי חשמל, בעל תואר ראשון בפיסיקה ומדעי המחשב.

עינת דטנר - פועלת בתחומי הסביבה והקהילה ב-15 השנים האחרונות, בעלת ניסיון בניהול, הנחיית וליווי קהילות, ארגון ויזמות, פעילה בתנועה הסביבתית.

רן רביב - מנהל תחום קיימות מקומית במרכז השל, חוקר ופעיל בתחומים של הקשר בין צדק חלוקתי להתמודדות עם משבר האקלים.

רם עמר - יזם עם רקע בסטארטאפים, ביג דאטא וסייבר, בצבא ובהיי טק, בשנה האחרונה פועל בתחום האקלים לשינוי התודעה הציבורית והקמת מיזם עסקי.

ד"ר שחר דולב - ממקימי הפורום הישראלי לאנרגיה, בעל תואר ראשון בהנדסה אווירונאוטית ושלישי במכניקת הקוונטים, עוסק מעל 15 שנים בתחום טכנולוגיות אנרגיה ומדיניות, כיום ביחידת המדען הראשי במשרד האנרגיה.

ד"ר שרון סורוקר - מנהל פרויקט NZO, ד"ר ומרצה במנהל עסקים, בעברו יועץ במשרד האוצר, רשות החברות הממשלתיות, יועץ אסטרטגי ומנכ"ל חברה לפתרונות אנרגיה לבתים חכמים.

נספח ד' – תודות

המסמך נכתב כעבודת צוות של חברי פרויקט NZO והוא מהווה סיכום ביניים של פעילות צוות NZO עד סוף 2020. חברי צוות NZO, רובם אנשי מקצוע מתנדבים, הצטרפו לעבודת הפרויקט מתוך תחושת שליחות ודאגה אמיתית לדורות הבאים ועבדו ביחד במקצועיות רבה ובסינרגיה, כדי לגרום לתכנית זו לקרום עור וגידים.

במהלך הכנת עבודה זו קיימנו פגישות עם גורמים רבים העוסקים בתחום האנרגיה בישראל ובהם נציגי משרד האנרגיה, המשרד להגנת הסביבה, משרד האוצר, רשות החשמל, מינהל התכנון, רמ"י, משרד החקלאות וגורמים נוספים. אנחנו רוצים להודות לכולם על הזמן שהקדישו לנושא ועל השיתוף בידע.

בבניית המודל נעזרנו בעבודה שהוכנה על ידי המשרד להגנת הסביבה במסגרת תוכנית ישראל 2050 והועברה לצוות NZO. אנחנו מודים על כך לד"ר גיל פרואקטור, מנהל תחום אנרגיה ואיכות סביבה במשרד להגנת הסביבה. אנו מודים לנציגי חברת אקוטרירדרס, אברי שכטר ורון קומר אשר סייעו לנו ושיתפו אותנו בידע שלהם בתחום. כמו כן נעזרנו רבות במחקר שבוצע על ידי המשרד להגנת הסביבה למיפוי הפוטנציאל הסולארי בשטח הבנוי אשר פורסם ב-1/2020.

משרד האנרגיה העניק לנו "דלת פתוחה" ושיתוף בידע ובתוכניות של המשרד, ובכלל זה פגישה עם שר האנרגיה, מנכ"ל המשרד ומנהלי אגפים במשרד להצגת תוכנית NZO. בנוסף לכך הידע שנצבר במרכז השל במסגרת הפרוייקט לקידום התקנת מערכות PV ברשויות המקומיות סייע לנו בהבנת החסמים להתקנת מערכות PV במרחב הבנוי. תודה לצוות האגף לאנרגיה מקיימת, ברשות אוריאל בבצ'יק, אשר אחראים על פרויקט זה.

את עבודת הצוות ליוותה ועדה ציבורית של אנשים שהקדישו מזמנם כדי לעבור על התוכנית ולזייץ לנו. העצות וחשיפת התחומים אשר היתה חסרה בהם התייחסות, סייעו לשפר את התוכנית במידה רבה, ואנחנו מודים להם על כך. למותר לציין שאין להם אחריות על התוצר הסופי.

בקרה מקצועית ותיקוף של המודל ביצענו בעזרתה של ד"ר נורית גל, אשר הידע הרב שלה בתחום סייע לנו מאוד לדייק את ההמלצות שלנו במסגרת מחקר זה. חברת דלוייט (Deloitte) שביצעה בקרה מקצועית חיצונית להנחות היסוד ולמודל הכלכלי ותיקפה את המודל ושלמות העבודה.

בכתבת המסמך ועריכתו סייעו לנו יניב כרמל וארז רביב אשר השכילו לנסח את הסוגיות המורכבות של האנרגיה באופן בהיר וקל להבנה.

תודה מיוחדת לאנשים שבלעדיהם הפרויקט לא היה מתגשם:

תודה ליוקי גיל, איש החזון, הלב הפועם והמנוע מאחורי הקמת הפרויקט ועיצובו, על התרומות הנדיבות שהפכו את הרעיון לפרויקט חי ומתפעל, על גיוס המשאבים והמתנדבים, ועל הצבת הרף הגבוה ביותר לתוצרים.

תודה לד"ר שחר דולב, המוח מאחורי התכנית שתכנן ועיצב את המודל הראשוני והידע הרב שלו בתחום האנרגיה היווה את הבסיס לתכנית.

תודה לרם עמר, שעצר את חייו כדי לצלול לתוך פרויקט NZO ומיד הפך למוביל ועבד עם הצוות בנעימות ולבביות, בנה את המודל הסופי שעליו העבודה מתבססת, ואם כל זה לא מספיק, תרומותיו הנדיבות איפשרו את הפעילות השוטפת של הפרויקט.

תודה למוטי שגב, יעקב גלאוזיס ואמנון פורטוגלי שהביאו את מגוון הדעות, האיזונים והבלמים ואת המחקר הרלוונטי על הנעשה בעולם בתחום, ולאורלי אהרוני שהביאה פתרונות בתחום החסמים והרגולציה, נושא שבלעדיו לא ניתן לחולל שינוי עמוק ברמה הלאומית.

תודה לאלון סגל, שהקדיש לילות כימים לכתיבת המסמך, לחידוד כל הפרטים הקטנים של המחקר, לדאגה העיקשת לסיים ולהוציא לאור מסמך זה, וליצירת תחושת שותפות אמיתית.

תודה ליוסף אברמוביץ מחלוצי השמש בישראל ואיש חזון על התגייסותו לפרוייקט ותרומתו רבת השנים לקידום אנרגיה מתחדשת בארץ ובעולם.

תודה גם לדורית בנט ואביטל נוסינוב מאילת-איילות אשר אירחו אותנו ואירגנו לנו סיור לימודי מרתק, ולכלל בעלי התפקידים באילת ובקיבוצים השונים עמם נפגשנו.

תודה לאיתן פרנס, שהקים ומוביל את איגוד חברות אנרגיה ירוקה בישראל שסייע לנו ושיתף אותנו בידע וההכרות שלו בתחום.

תודה לדנה אפרתי פיליפ וד"ר שרון סורוקר שניהלו את הצוות בשלבי השונים של הפרויקט.

ותודה חמה לויקטור וייס שהוביל את הצוות בתשוקה גדולה עם ראייה אסטרטגית במשך כהונתו כמנכ"ל מרכז השל.



תכנית לאומית לאנרגיה מתחדשת