

פרק ז'

ביטחון אנרגטי, תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה¹

- בוועידת האקלים, שהתקיימה לקראת סוף שנת 2021 בגלזגו, סקוטלנד, הושגו הסכמות בין-לאומיות בעניין הפחתת פליטות גזי החממה, ורוב המדינות, כולל ישראל, הציגו יעדים לאומיים להפחתה ניכרת של הפליטות בטווחים הבינוניים והארוך. ספק אם ההסכמות שהושגו בוועידה מספיקות כדי להעלות את העולם על מסלול של אפס פליטות נטו או להגבלת ההתחממות הגלובלית ליעד שנקבע בהסכם פריז 2015.²
- בעוד שמדינות מפותחות רבות עדיין בונות, מפתחות ומתכננות תחנות כוח פחמיות לחשמל, שהוא מקור אנרגיה מזהם במיוחד, ישראל צפויה לסיים את השימוש בפחם עם סגירת תחנת הכוח הפחמית האחרונה שלה בשנת 2026.
- סימולציות שערכנו ביחס לפליטות הכרוכות בייצור חשמל מלמדות שישראל תתקשה לעמוד ביעדי האקלים שהציבה לעצמה. זאת במסגרת תרחישים המבוססים על הטכנולוגיות הקיימות. הפער בין יעדי הפחתת הפליטות ליכולת להשיגם בטכנולוגיות הקיימות אינו אופייני רק לישראל. לפיכך ייתכן שההתייחסות הבין-לאומית להתקדמות ישראלית איטית מכפי שנקבע לעבר היעדים לא תהיה מחמירה.
- הרחבה ניכרת של משקל האנרגיה הסולרית באספקת החשמל בישראל תחייב השקעה באמצעים לאגירת אנרגיה, וכן החזקה של תחנות כוח המבוססות על גז טבעי, שתוכלנה לענות על הביקוש במקרה של אירועי מזג אוויר קיצוניים.
- הפחתה מואצת של יכולת ייצור החשמל המבוסס על דלקים מאובנים בהעדר חלופות יציבות עלולה לפגוע בביטחון האנרגטי של ישראל, כפי שהמחישו אירועי השנים האחרונות באירופה.
- לנוכח ההתפתחויות בוועידת גלזגו, המשליכות על קצב ההפחתה של פליטות גזי החממה, עלו הסיכונים להמשך ההתחממות הגלובלית, ולכן גבר הצורך להיערך להסתגלות (אדפטציה) למצב החדש. הסיכון הרלוונטי ביותר לישראל הוא למערכות הכלכלה והבריאות. אמנם לפי דוחות ה-IPCC סיכון זה לאזורנו נמוך ביחס למדינות אחרות, אך העלייה בסיכון הכללי צפויה להשפיע גם עלינו.

¹ על הערות, הצעות ושיחות שתרמו לכתיבת הפרק תודות לפרופ' ליאור אלבו (המחלקה לכימיה, אוניברסיטת בר אילן), חגית בן חמו (משרד האנרגיה), שחר דולב (משרד האנרגיה), גיל הורביץ (משרד המודיעין), ד"ר שלמה ולד (לשעבר המדען הראשי במשרד האנרגיה), יואב זקס (המטה לביטחון לאומי), ליאור חיימוביץ' (המועצה הלאומית לכלכלה), שרון חצור (משרד האנרגיה), פרופ' אשר טישלר (אוניברסיטת תל אביב), ג'ינה כהן, יובל לסטר (המשרד להגנת הסביבה), יונתן מילר (משרד החוץ), שני מנדל לאופר (משרד האוצר), ד"ר גיל פרואקטור (המשרד להגנת הסביבה), איתן פרנס (אייגוד חברות אנרגיה ירוקה לישראל), פרופ' נגה קרונפלד שור (המדענית הראשית, המשרד להגנת הסביבה), ד"ר אוהד קרני (המשרד להגנת הסביבה), תמר רביב (המשרד להגנת הסביבה), פרופ' ניר שביב (מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית) וגל תמיר (המשרד להגנת הסביבה).

² לעמדה דומה לזו המוצגת כאן לגבי הסיכוי לניטרליות פחמנית והקשר לתעשיית הפחם ראו התייחסות של ראש הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה: <https://www.ft.com/content/1b203a3e-efdf-49b8-8fa9-72f9ec963501>

אף שהסכם פריז מנוסח באופן גמיש וסובלני לאפשרות של אי עמידה בו, הוא משפיע על התודעה הציבורית: מאז שנחתם הוא מניע פעולות מדיניות המקדמות את הכלכלה העולמית לניטרליות פחמנית.

פרק זה מציג ניתוח מקרו-כלכלי של הסיכונים המרכזיים הקשורים למשבר האקלים ואת המעבר האנרגטי המתחייב מהם. החלק הראשון מתאר את סוגיית המדיניות, מגדיר את המונחים המרכזיים הקשורים לנושא, כגון ניטרליות פחמנית, ביטחון אנרגטי ומעבר אנרגטי, וממחיש אותם באמצעות נתונים על פליטות גזי החממה, התפלגות מקורות הפליטה הראשוניים והתפלגות ייצור האנרגיה. בחינת השינוי בפליטות של מדינות העולם מעלה פער משמעותי בין היעדים שהוצבו בהסכם פריז ב-2015 לרמת הפליטות כיום. הניסיון של מדינות שונות מהשנים האחרונות למד על הצורך לקדם את המעבר בין מקורות האנרגיה באופן מבוקר כדי לשמר את הביטחון והיציבות של אספקת האנרגיה לאורך התהליך ובסופו.

החלק השני, הסוקר את ההתפתחויות במפגש האחרון של ועידת האקלים בגלזגו, מצביע על האפשרות שהפחתת הפליטות בעתיד תהיה איטית מהצפוי, ולכן חשובה ההסתגלות למצב חדש זה, שבו ריכוז גזי החממה באטמוספירה גבוה יותר מאשר היום, דבר המגביר את הסיכוי להתחממות מעבר לתחזיות הנוכחיות. הסתגלות זו כרוכה בהיערכות לסיכונים האקלים שתחייב להקצות משאבים ציבוריים רבים יותר (תיבה ז'-1).

החלק השלישי בוחן את הפער בין יעדי הפליטה שהגישה ממשלת ישראל לוועידת האקלים ובין התוכניות הנוכחיות שלה להפחתת הפליטות, וממחיש עובדה הנכונה לגבי כל מדינות העולם: ניטרליות פחמנית היא מטרה התלויה בטכנולוגיות שאינן מסחריות בעת הזאת. השקעה בתשתית האנרגיה בישראל בעוד מועד תוכל להכין את מערכת האנרגיה לקליטת טכנולוגיות כאלו לכשיפותחו בעתיד.

1. המתח בין ביטחון אנרגטי למעבר אנרגטי

בשנת 2015 חתמו 192 מדינות על הסכם פריז – ציון דרך בסדר היום הסביבתי בתחום האקלים. מטרת ההסכם הייתה לאזן בין פליטות גזי החממה שמקורן באדם³ ובין ספיחת גזי החממה ליבשה ולאוקיינוסים – כלומר להגיע למצב המכונה "ניטרליות פחמנית" או "אפס פליטות נטו".^{4,5} אף שההסכם עצמו מנוסח באופן גמיש וסובלני לאפשרות של אי עמידה בו, הוא משפיע על התודעה הציבורית: מאז שנחתם הוא מניע פעולות מדיניות המקדמות את הכלכלה העולמית לניטרליות פחמנית.⁶ המדינות החתומות על הסכם פריז התחייבו לעדכן את יעדי הפחתת הפליטה ולתקשר אחת לחמש שנים בעניין תרומותיהן למאבק בהתחממות הגלובלית באמצעות הפחתת פליטות גזי החממה אצלן.⁷ חשיבות המפגש ה-26 של הצדדים להסכם ב-2021 בגלזגו ("ועידת גלזגו")

³ מעבר לפגיעה הסביבתית באקלים באמצעות פליטות גזי חממה לאוויר האדם פוגע בסביבה באמצעות פגיעה בקרקע ובמים.

⁴ Article 4.1, Paris Agreement: "a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gas in the second half of this century"

⁵ European Commission: "A European Green Deal: Striving to be the first : climate-neutral continent"

⁶ כביטוי לרמת המחויבות להסכם, הממשל האמריקאי, בנשיאותו של אובמה, חתם עליו בלי הסכמת הקונגרס. מאוחר יותר הדבר אפשר לממשל, בנשיאותו של טרמפ, לסגת ממנו. לפירוט ראו:

J. Dorney (2017). "Defining the Paris Agreement: A Study of Executive Power and Political Commitments", Carbon & Climate Law Review, 11(3), 234–242

⁷ Article 4.9, Paris Agreement: "communicate a nationally determined contribution every five years"

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

היא בהיותו נקודת ציון לפני 2023. במועד זה תיערך, על פי הסכם פריז, "ספירת מלאי" – בחינת הפליטות של הצדדים בהסכם.⁸

כדי להגיע לניטרליות פחמנית יש להפחית את פליטות גזי החממה שמקורן באדם כך שהן ישוו לסך גזי החממה אשר סופחים הקרקע והאוקיינוסים.⁹ סך פליטות גזי החממה בעולם, במונחי פחמן דו-חמצני, שהוא גז החממה הנפוץ ביותר, הגיע ב-2018 לרמה שנתית של 49 גיגה טון (ג"ט), כפי שמציג לוח ז'-1,¹⁰ בעוד שהאוקיינוסים והביוספירה היבשתית צורכים בשנה 11 ג"ט ו-12 ג"ט של גזים אלו, בהתאמה. כדי להגיע לניטרליות פחמנית יש להפחית אפוא הפליטה ב-26 ג"ט.¹¹ ייצור אנרגיה הוא מקור הפליטה הראשוני הגדול ביותר, שאחראי ל-76% מסך הפליטות העולמיות, ובפרט שריפת פחם ונפט – מקורותיהן של 33%-ו-27% מהפליטות בעולם, בהתאמה (לוח ז'-1).¹² כיום מקורות הייצור המסחריים של אנרגיה נטולת פליטה הם מים, רוח, שמש ואנרגיה גרעינית. טכנולוגיות אחרות לטיפול בפליטות גזי החממה, כגון טכנולוגיות ללכידת פחמן, לטיפול בפסולת ולטיפול בפליטות הנובעות מתהליכים כימיים, עדיין אינן מסחריות. מפני המשקל הגדול של ייצור האנרגיה בפליטות, יחד עם העובדה שהפיכת משק האנרגיה לנטול פליטות ישימה מבחינה טכנולוגית יותר מאשר הפיכת המקורות האחרים לכאלה, המהלכים העיקריים לצמצום הפליטות בעולם מתמקדים במשק האנרגיה, ולכן גם פרק זה מתמקד בו.

לוח ז'-1: מאזן הפליטה העולמי של גזי החממה

(2018)					
פליטה			ספיחה		
מסה"כ %	GT CO2 Equivalence		מסה"כ %	GT CO2 Equivalence	
76%	37	אנרגיה	22%	11	אוקיינוסים
33%	16	פחמן	25%	12	ביוספירה יבשתית
27%	13	נפט	47%	23	סה"כ ספיחה
16%	8	גז טבעי			
1%	1	אנרגיה אחר			
3%	2	פסולת			
12%	6	חקלאות			
6%	3	שימוש תעשייתי			
3%	1	אחר	53%	26	יעד ההפחתה
	49	סה"כ פליטה		49	
100%					

מקור: IEA ו- global carbon project, climatewatch.

⁸ Article 14.2, Paris Agreement: "Agreement shall undertake its first global stocktake in 2023 and every five years thereafter"

⁹ לתיאור דומה של האיחוד האירופי ראו: European Parliament (Oct 2019). "What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?"

¹⁰ מגפת הקורונה פגעה בפעילות הכלכלית, ולכן גם הפחיתה את השימוש באנרגיה ואת פליטות גזי החממה. הואיל ונושאי הדיון – ההתחממות הגלובלית וניטרליות פחמנית – הם מטרות של הטווח הארוך, שנות הקורונה אינן מייצגות.

¹¹ הספיחה צפויה גם היא להצטמצם עם צמצום הפליטות, ומשמע שהיעדים אמורים להיות שאפתניים יותר, דבר המחזק את תוצאות הניתוח מטה.

¹² זיהוי נכון של המקורות הראשוניים מצריך זיהוי של מקורות הפליטה, ולא של המוצרים הסופיים. כך, לדוגמה, רוב הפליטות מהחקלאות נובעות משימוש בדלקים ובגזי קירור, ולכן מקובל לייחס אותן לתעשיית האנרגיה ולתעשיית הכימיה ולא לחקלאות.

החלפת מקורות האנרגיה הראשוניים במקורות נטולי פליטה היא תנאי הכרחי לניטרליות פחמנית, והיא גם בעלת הפוטנציאל הגבוה ביותר של תרומה להפחתת הפליטות. יחד עם זאת, אם היא תבוצע מהר מדי היא תפגע בביטחון האנרגטי.

מעבר אנרגטי, שהתחולל מספר פעמים בהיסטוריה, הוא החלפת המקורות המייצרים אנרגיה. המעבר האנרגטי הנוכחי הוא החלפת מקורות אנרגיה שתהליך ייצורה באמצעותם כרוך בפליטת גזי חממה, ובפרט דלקי מאובנים, במקורות אנרגיה נטולי פליטה. בניגוד למעברים אנרגטיים בעבר, המעבר הנוכחי אינו נובע מכוחות שוק אלא מכוחות פוליטיים, המשקפים במידה רבה לחץ להפנמה של השפעות חיצוניות, ולכן כופה אילוצים על כוחות השוק החופשי. כיוון שההשפעות החיצוניות הן בין-לאומיות, הלחץ על המדיניות הממשלתית המקומית בתחום ניהול משק החשמל מופעל מהמדיניות הבין-לאומית.

ביטחון אנרגטי מאפשר למשקי הבית, לעסקים ולממשל לתכנן ביעילות את הצריכה וההשקעה שלהם. "זמינות יציבה של מקור אנרגיה במחיר שווה לכל נפש" מונעת עלויות של הפרעות בייצור ושל התאמת הון.¹³ צריכת אנרגיה שונה מצריכתם של מוצרים ושירותים אחרים בהכרחיותה: קָשָׁל במערכת האנרגיה יפגע באופן קריטי בפעילות הכלכלית וברווחה ללא פרופורציה עם המשקל הנמוך של ענף האנרגיה בתוצר (בישראל כ-7%). מסיבה זו המגזר הציבורי במדינות השונות מאסדר את המערכת ומשמש ספק שההיצע שלו חסין יותר מזה של השוק החופשי למחזורי העסקים. טיעונים בעד החשיבות של הביטחון האנרגטי מגיעים לאחרונה גם מסדר היום האקלימי; אלה מציגים את החשיבות של מוצר ציבורי זה לצורך ההסתגלות למצב החדש, שבו הטמפרטורה תהיה גבוהה משהייתה.¹⁴

הפיכת מערכת האנרגיה לנטולת פליטות, הכרוכה בהחלפת מקורות האנרגיה הראשוניים, היא תנאי הכרחי לניטרליות פחמנית, והיא גם בעלת הפוטנציאל הגבוה ביותר של תרומה להפחתת הפליטות. יחד עם זאת, אם היא תבוצע מהר מדי, וללא איזון מתאים בין המקורות הנגרעים למתווספים, וללא התאמה של מערכת ההולכה לשינוי הרכב הייצור, היא תפגע בביטחון האנרגטי. ביטוי למתח בין הביטחון האנרגטי למעבר האנרגטי ניתן לראות בשיבושים במערכת האנרגיה בגרמניה בשנים האחרונות. גרמניה קידמה את שלבי היציאה מייצור אנרגיה באמצעות דלקים מאובנים וטכנולוגיות גרעיניות בקצב שהיה, כפי שמתברר בשנים האחרונות, מואץ מדי, וללא ההתאמות הנדרשות במערכת ההולכה ובקישוריות לגיבוי ממערכות החשמל של מדינות אחרות – וסבלה מהפרעות באספקת החשמל ומנסיקה של מחירי האנרגיה.¹⁵ אמנם המשבר הנוכחי בגרמניה משקף שילוב של מספר גורמי ביקוש והיצע, אך דוח של חברת מקינזי מ-2019 כבר הצביע על הסיכונים הטמונים בהחלפה של מקורות האנרגיה שם, שתבוצע באופן מואץ וללא תכנון כולל וארוך טווח.¹⁶ גם האירועים הנוכחיים באוקראינה ממחישים את הסכנה שבתמהיל לא מגוון של מקורות האנרגיה. כדי להרחיב את טווח המענים לצורך בביטחון אנרגטי לצד הפחתת הפליטות, החליט האיחוד האירופי לאחרונה לסווג חלק מטכנולוגיות הגז הטבעי המשולבות עם לכידת

¹³ סוכנות האנרגיה הבין-לאומית מגדירה ביטחון אנרגטי כ- "uninterrupted availability of energy sources at an affordable price", IEA, 2019.

¹⁴ הדוח האחרון של ועידת האקלים בנושא ההסתגלות הקדיש לנושא האנרגיה פרק מיוחד. לפירוט ראו: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

¹⁵ המשבר פרץ לאחרונה, ולכן ישנם בהקשר זה רק דוחות ראשוניים. לדוגמה: Yana Popkostova (Jan 2022). "EUROPE'S ENERGY CRISIS CONUNDRUM: Origins, impact and way forward".

¹⁶ ראו: Pflugmann et al (Nov 2019). "Germany's energy transition at a crossroads", McKinsey & Company.

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

פחמן (carbon capturer) וחלק מטכנולוגיות האנרגיה הגרעינית כמקורות אנרגיה ירוקים.¹⁷ עוד לפני כן פרסם משרד האנרגיה בישראל, במסגרת מפת הדרכים למשק האנרגיה 2050, המלצה לבחינה של ייצור חשמל באנרגיה גרעינית כמענה לדה-קרבוניזציה בצד ביטחון אנרגטי.¹⁸ מתח זה בין סדר היום האקלימי לצורך לספק ביטחון אנרגטי הוא שאלת מדיניות מרכזית שעומדת בפני הממשלים בעולם. לאחרונה פרסמו נשיאי ארה"ב והאיחוד האירופי הצהרה משותפת המעידה על החשיבות שממשליהם מייחסים לשני נושאים אלו.¹⁹

פליטות גזי החממה של ישראל זניחות במונחי השפעתן על האקלים וההתחממות הגלובלית (0.2% מהפליטות בעולם). לכן מחויבותה לצמצום הפליטות חשובה בעיקר כביטוי של השתתפות בקהילה העולמית ובמאמץ הבין-לאומי, וגם כדי להימנע מהסיכונים של תגובה אפשרית מצד הקהילה הבין-לאומית כלפי מדינות ועסקים פולטי-פחמן שלא יעמדו בתקנים הבין-לאומיים. לישראל העמידה ביעדי האקלים היא משימה מאתגרת במיוחד, מכמה סיבות:²⁰ 1. גידול האוכלוסייה חריג ביחס למדינות המפותחות האחרות; 2. הפליטות ביחס לאוכלוסייה בנקודת המוצא אינן גבוהות מאשר במדינות מפותחות אחרות;²¹ 3. ישראל היא "אי חשמלי", ואין באפשרותה, בשלב זה, להסתמך על מערכות חשמל אחרות;²² 4. הטכנולוגיות הזמינות לייצור אנרגיה באמצעים נטולי פליטה בישראל מוגבלות לשימוש בשמש ובגרעין, אך מגבלות שונות מקשות על השימוש בהן.²³ שטחה המצומצם של ישראל הופך את האפשרות להסתמך על אנרגיית שמש בכמויות גדולות למאתגרת יותר, ותדרוש פתרונות יצירתיים כדו-שימוש בקרקע או כיסוי נרחב של גגות בתים בלוחות סולריים.²⁴

המעבר האנרגטי למקורות אנרגיה נטולי פליטות צפוי להתקדם בשלושה שלבים, שכל אחד מהם כולל יציאה מדלק-מאובנים:²⁵ 1. מעבר מפחם לגז טבעי (חשמל); 2. מעבר מנפט לגז טבעי (תחבורה); 3. מעבר מגז טבעי למקורות נטולי פליטה. באיור ז'-1 מוצגת התפלגות מקורות הפליטה הראשוניים של קבוצת המדינות שננתח, במונחי תרומתו הפוטנציאלית של כל דלק-מאובנים להפחתת פליטות גזי החממה. המדינות המופיעות באיור אחראיות לכ-70% מפליטות גזי החממה בעולם.

¹⁷ נדגיש שלא מדובר בכל טכנולוגיות הגז הטבעי, אלא בטכנולוגיות הכוללות לכידת פחמן בשיעורים שכעת אינם בשימוש מסחרי נרחב. לפירוט ראו: European Commission (Jan 2022). "EU Taxonomy: Commission begins expert consultations on Complementary Delegated Act covering certain nuclear and gas activities."ties

¹⁸ ראו: משרד האנרגיה (אפריל 2021): "מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050", עמוד 16.

¹⁹ ראו: "Joint Statement by President Biden and President von der Leyen on U.S.-EU Cooperation on Energy Security".

²⁰ הסכם פריז מתייחס במפורש ליישומם בהתאם לנסיבות ולצרכים המיוחדים לכל מדינה. ראו: הסכם פריז, סעיף 2.2.

²¹ בשנת 2019 הממוצע בישראל היה 9.4 טון לאדם לשנה, ואילו הממוצע במדינות ה-OECD עמד על 10.1. בחינה של הקשר בין רמות הפליטה לנפש ולשינוי בפליטה ראו בהמשך.

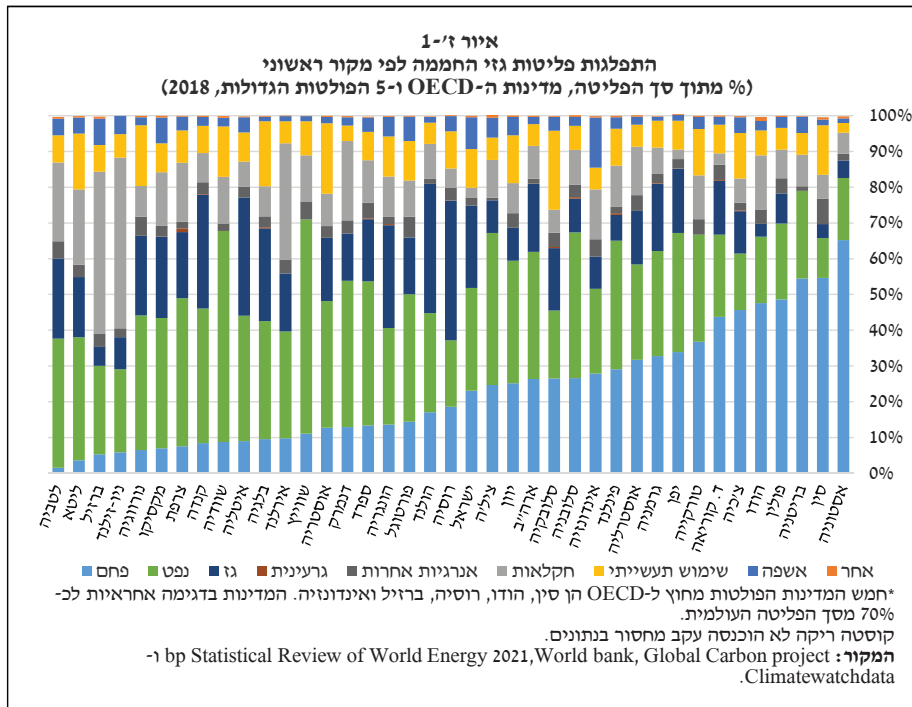
²² אמנם לאחרונה נחתם הסכם למסחר בחשמל עם ירדן, אך הסכם זה אינו מחבר את ישראל למערכת החשמל הירדנית אלא רק למתקן עצמאי בשטח הממלכה. לעומת היותה אי חשמלי ישראל אינה נחשבת לאי לאנרגטי, שכן מערכת האנרגיה כוללת גם את הנפט, הגז וכו'; לישראל רשת גז המחוברת לרשתות של מצרים וירדן.

²³ באירופה, לדוגמה, רוב מקורות של האנרגיות נטולות הפליטה הם מים, רוח וגרעין.

²⁴ לדיון בסוגיית השטח ראו: 1. המשרד להגנת הסביבה, (2020), "הערכת פוטנציאל הייצור הסולרי במרחב הבנוי בישראל", 2. משרד האנרגיה (אפריל 2021). "מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050" עמ' 69 ואילך ועמ' 136. 3. רשות החשמל, (2020) "הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030".

²⁵ אנו מתרגמים כאן שלב כ-Phase Out. Phase Out – שלב יציאה; Phase down – שלב ירידה.

פליטות גזי החממה של ישראל זניחות במונחי השפעתן על האקלים וההתחממות הגלובלית. מחויבותה לצמצום הפליטות חשובה בעיקר כביטוי של השתתפות בקהילה העולמית ובמאמץ הבין-לאומי.



השלב הראשון של המעבר האנרגטי הוא שלב היציאה מפחם והחלפתו בגז טבעי, מקור אנרגיה שהפליטות והזיהום בעטיו נמוכים יותר.²⁶ פחם הוא המקור המשמעותי ביותר לא רק בגלל שכיחותו: הוא גם פולט את הרמה הגבוהה ביותר של גזי חממה ליחידת אנרגיה.²⁷ לפיכך היוזמה להפחית את השימוש בפחם הייתה ספינת הדגל של ועידת גלזגו, וצפויה להמשיך ולהיות יעד מרכזי בוועידת האקלים הבאה, שתתקיים בשארם-א-שייך בשנת 2023.²⁸ מהאיור עולה שפחם הוא עדיין מקור הפליטה המשמעותי ביותר במדינות מתפתחות כסין והודו, וכן במדינות מפותחות כבריטניה, גרמניה, יפן ואוסטרליה.²⁹ בוועידת גלזגו נקבע יעד לשלב הירידה מפחם (להבדיל מהיעד הראשוני, שעניינו שלב היציאה), אשר צפוי לקחת זמן רב מאוד. נציין כי בעוד שמדינות מפותחות רבות עדיין בונות, מפתחות ומתכננות תחנות כוח פחמיות לחשמל, ישראל צפויה להשלים את שלב היציאה מפחם עם סגירת תחנת הכוח הפחמית האחרונה שלה, בשנת 2026. קידום המעבר מנפט לגז טבעי כרוך בהעברה של ענף התחבורה לכלי רכב נטולי פליטה.³⁰ אתגריו כוללים שינוי בהתנהגות ובהשקעות של משקי הבית לצד השקעה של המגזר הציבורי בתשתיות וקידום של האסדרה והחקיקה הנדרשות.³¹ רכבים נטולי פליטה תלויים בזמינות של טכנולוגיות אגירה, ובפרט סוללות ליתיום או מימן, שמחיריהן יורדים במידה ניכרת בשנים האחרונות. יש

פחם הוא המקור הראשוני המשמעותי ביותר של פליטות גזי חממה, מפני שכיחותו וגם מפני שרמת הפליטה ממנו ליחידת אנרגיה היא הגבוהה ביותר. לפיכך היוזמה להפחית את השימוש בפחם הייתה ספינת הדגל של ועידת גלזגו, וצפויה להמשיך ולהיות יעד מרכזי בוועידת האקלים הבאה, שתתקיים בשארם-א-שייך בשנת 2023.

²⁶ עבור כל יחידת אנרגיה, גז פולט 43% פחות מפחם.

²⁷ פחם פולט 100 ט"ט (טון פחמן דו-חמצני לטרה ג'אול), אחרי נפט (75 ט"ט), וגז טבעי (57 ט"ט).

²⁸ במדינות המתפתחות מעבר אנרגטי מתייחס להחלפה של עץ, פחם, צואת בקר ופסולת יבול, הנשרפים בתוך בתים, במקורות כפחם, גז טבעי ונפט, הנשרפים בגנרטורים.

²⁹ יותר מ-50% מהפליטות של סין הן מפחם. סין היא גם הצרכנית המשמעותית ביותר של פחם (54% מצריכת הפחם בעולם), אחריה הודו (12%), ארה"ב (6%) ויפן (3%).

³⁰ עבור יחידת אנרגיה גז טבעי פולט 38% פחות מנפט.

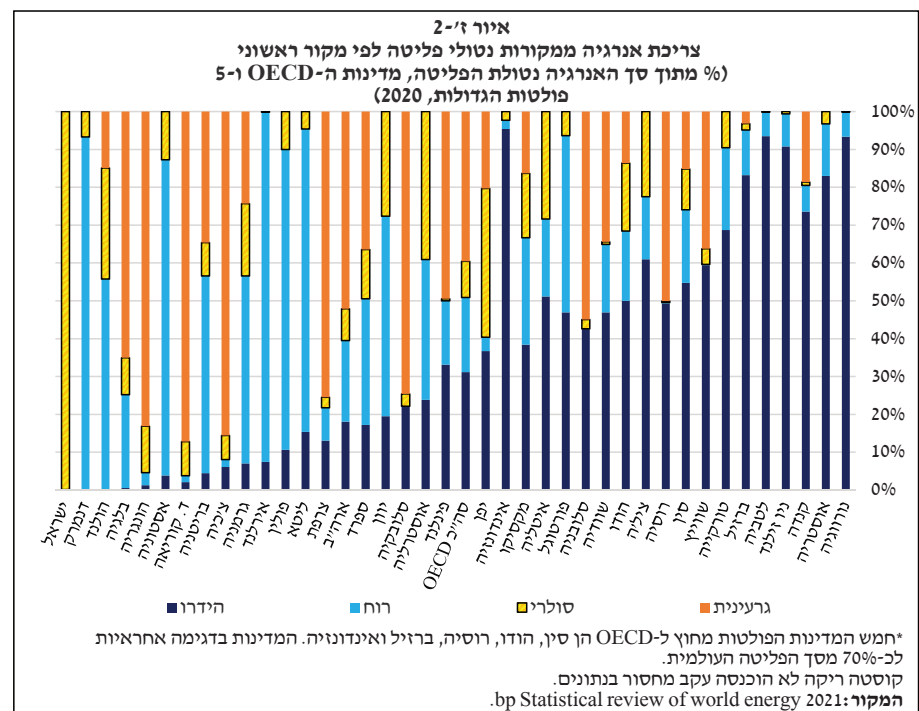
³¹ לניתוח מפורט של פליטות ענף התחבורה בישראל ראו: ליאור גאלו ויוסי מרגונינסקי (אוקטובר 2021). "צמצום טביעת הרגל האקלימית של ענף התחבורה בישראל", בנק ישראל,

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

להדגיש שהתשתיות ששני סוגי טכנולוגיה אלו מצריכים הן שונות, ולכן לבחירת תמהילם יש השלכות על ההשקעה הנדרשת בנושא. בגלל מבנה העלות של שני סוגי טכנולוגיה אלו סוללות ליתיום מתאימות יותר לרכבים פרטיים קטנים, ומימן – לרכבים גדולים יותר, כאוטובוסים ומשאיות. עבור כלי תחבורה גדולים יותר, ובפרט מטוסים ואוניות, אין כרגע טכנולוגיות מסחריות לאגירת אנרגיה. עם המעבר מפחם לגז טבעי בייצור החשמל בישראל בשנים האחרונות עלה משקלה של התחבורה בסך פליטות גזי החממה. ההתערבות הממשלתית המשמעותית ביותר בתחום זה כוללת השקעה בתשתית הדרושה לרכבים נטולי פליטה ולתחבורה הציבורית; זאת במקביל ליישום היוזמה הבריטית, שעליה חתמה ישראל בוועידת גלז'ו, אשר לפיה ישראל תפעל כדי שעד 2035 כל הרכבים הפרטיים החדשים יהיו רכבים נטולי פליטה.³² ישראל אף מחמירה בהקשר זה ביחס להסכם בוועידת גלז'ו: בהחלטת הממשלה 171 כלולה מגבלה חמורה, המגבילה את הפליטה של רכב חדש כבר משנת 2030 ל-5% מזו של רכב מקביל ב-2020.³³

ישראל כבר הניעה את שלב היציאה מגז טבעי לטכנולוגיות נטולות פליטה, ושיעור האנרגיה המתחדשת נטולת הפליטה בהספק הגיע ב-2021 ליותר מ-9%.³⁴ הקמת ענף המשק העוסק באנרגיות מתחדשות היא הישג משמעותי של המגזר הציבורי בישראל בשנים האחרונות, לאחר שנים רבות שבהן תעשייה זו לא הצליחה לנבט.

איור ז'-2 מתאר את התפלגות מקורות האנרגיה נטולי הפליטה בעולם בשנת 2020, שהשכיחים ביותר בהם הם מים (30% מהאנרגיה נטולת הפליטה בממוצע) ורוח (20%). שניהם אינם רלוונטיים לישראל במידה משמעותית. שאר מקורות האנרגיה נטולי הפליטה הם גרעין (22%)



³² UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy (Dec 2021). "COP26 declaration on : ראו "accelerating the transition to 100% zero emission cars and vans"

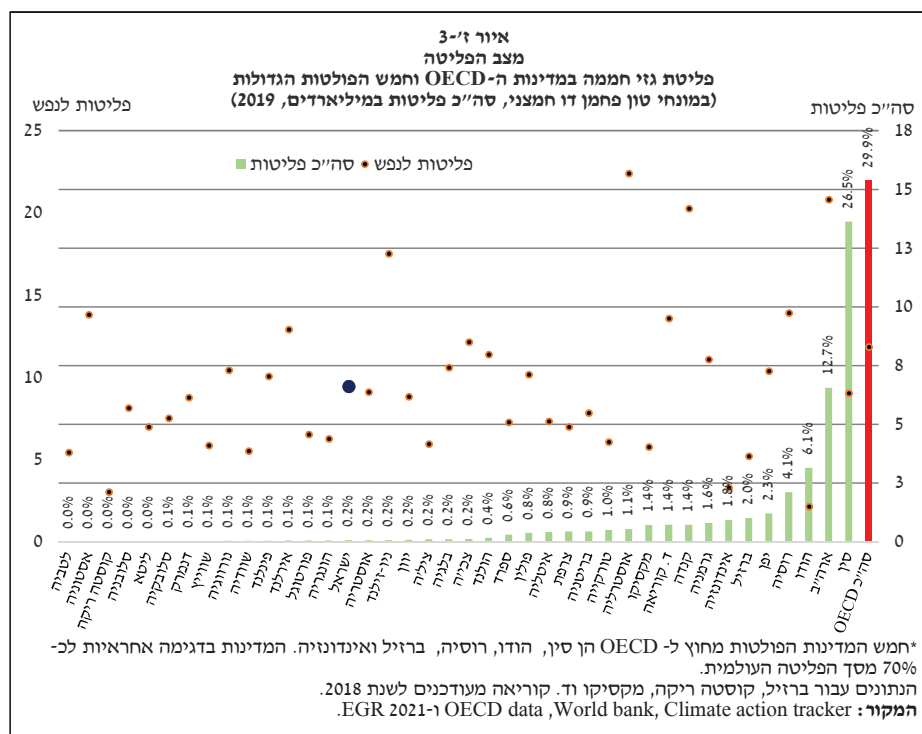
³³ ראו : משרד ראש הממשלה (יולי 2021). "מעבר לכלכלה דלת פחמן".

³⁴ אנו לא מחשיבים ביומאסה לאנרגיה נטולת פליטה, אף שהיא אנרגיה מתחדשת, משום שמקדם הפליטה שלה – הפליטה ליחידת אנרגיה – דומה לזה של נפט.

ואנרגיה סולרית, שמשקלה בסך ייצור האנרגיה נטולת הפליטה נמוך יחסית (11%). ישראל ייחודית מבחינה זו: משקל האנרגיה הסולרית בה מסך האנרגיות נטולות הפליטה הוא 96%. המשקל הנמוך של טכנולוגית האנרגיה הסולרית בעולם מוסבר בעיקר בעובדה שטכנולוגיה זו, ובפרט הפוטו-וולטאית, נעשתה מסחרית רק בשנים האחרונות.³⁵ נוסף על כך, האנרגיה שהיא מייצרת אינה ניתנת לצריכה בעת שונה מעת ייצורה, כך שייצור האנרגיה מוכרח להיות מסונכרן עם צריכתה – או שנדרשים פתרונות לאגירת אנרגיה, המגדילים את עלותה וזמינים רק בהיקף מוגבל. זהו המכשול המשמעותי ביותר העומד בפני הפיכת אנרגיות אלו לתחליף למקורות אנרגיה אחרים, וצפוי שהוא יוסר בעתיד, עם פיתוחן של טכנולוגיות אגירה. תיבה ז'-2 עוסקת בסוגיית האגירה באמצעות סוללות ליתיום או באמצעות מימן. מהתיבה עולה שעבור מערכת החשמל סוללות הליתיום הן, לעת עתה, כלי אגירה כלכלי יותר מאגירה באמצעות מימן.³⁶

א. מצב הפליטה, התחייבויות וביצועים

חלק ניכר מפליטות גזי החממה בעולם מרוכז במספר מדינות גדולות. איור ז'-3 מציג את סך הפליטות של גזי החממה ואת רמת הפליטות לנפש בכל מדינה במדגם – מדינות האחריות, כאמור, ל-70% מסך הפליטות.³⁷



³⁵ ראו: ליאור גאלו ויהודה פורת (ספטמבר 2017). "התפתחות משק החשמל בישראל לקראת משק חשמל בר קיימא", בנק ישראל.

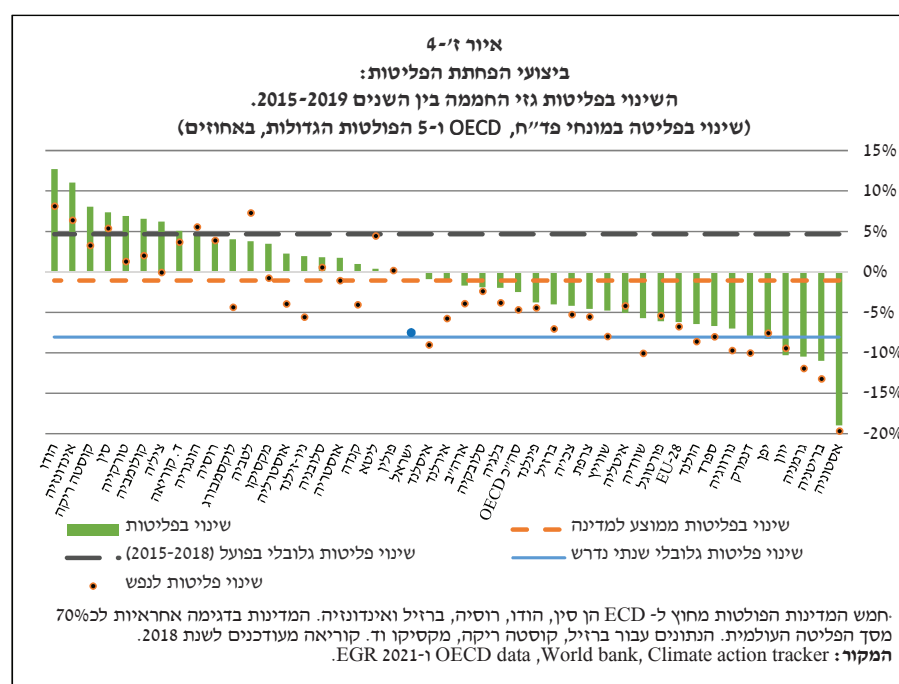
³⁶ עבור כלי רכב גדולים, כגון אוטובוסים ומשאיות, השימוש במימן הולך והופך רווחי יותר.

³⁷ סין לבדה אחראית ל-14 ג"ט, שהם כ-27% מסך פליטות גזי החממה. ארה"ב היא הפולטת השנייה בגודלה (13%). הפליטות של ארה"ב גבוהות גם כאשר הן נבחנות ביחס לגודל האוכלוסייה, והן שניות רק לאוסטרליה. המדינות הבאות מבחינת חלקן בפליטות הן הודו (6%) ורוסיה (4%).

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

סין, הודו, רוסיה, אינדונזיה ואוסטרליה, האחראיות לכ-40% מכלל הפליטות, דחו את יעדי האקלים – ניטרליות פחמנית ב-2050 – ובכך אפשרו לייצור האנרגיה באמצעות פחם אצלן להתפתח בעתיד.³⁸ התפתחויות דומות צפויות בכמה מדינות מתפתחות, הנמצאות בשלב מוקדם יותר של המעבר האנרגטי, ועל כן, צריכת האנרגיה, ואיתה הפליטות בעולם המתפתח, צפויה לגדול משמעותית בשנים הבאות.

האתגר הבא בסדר היום האקלימי שבפניו ישראל תעמוד לאחר ועידת גלזגו הוא "ספירת המלאי" שתיערך ב-2023: הפחתת הפליטות של כל מדינה תיבחן ביחס למדינות האחרות. איור ז'-4 מציג את ספירת המלאי נכון לעתה – השינוי בסך הפליטות של כל מדינה בין 2015 ל-2019. הירידה הממוצעת בפועל במדינות הנסקרות בארבע השנים הללו עומדת על 1%, והיא מיוצגת באיור בקו האדום המקווקו. אך הירידה הממוצעת מתעלמת מגודל המדינות, וכך, לדוגמה, מייחסת את אותו המשקל לסין ולישראל. הממוצע המשוקלל של השינוי בפליטות, השקול לירידה בסך הפליטות, מציג תמונה פסימית יותר, שלפיה סך הפליטות של גזי חממה עלה בתקופה הנסקרת ב-5%, עלייה המתבטאת באיור בקו השחור המקווקו. כדי להמחיש את המרחק בין היעדים למצב בפועל מתאר הקו הכחול שרמתו -8%, את הירידה של רמת הפליטות הממוצעת שנדרשה בתקופה זו כדי להגיע לניטרליות פחמנית ב-2050.

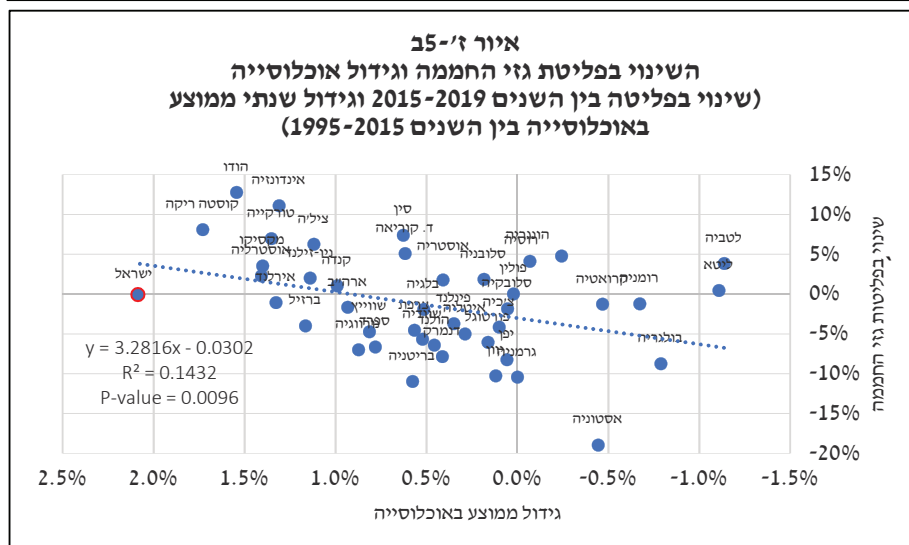
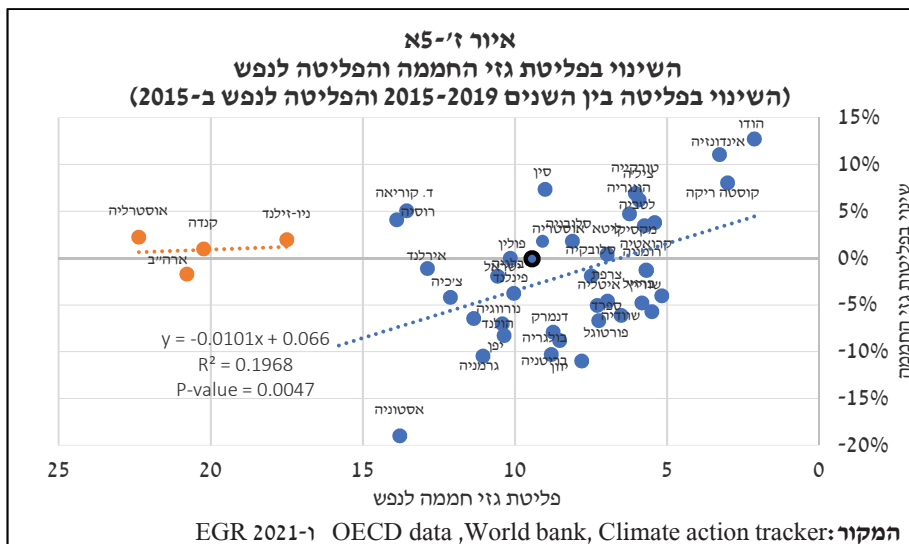


עוד עולה מהנתונים שמספר מדינות, מעבר לאלו אשר דחו את מטרות האקלים באופן פומבי, הגדילו את פליטות גזי החממה שלהן בתקופה הנסקרת. ישראל נמצאת במרכז האיור: השינוי בסך הפליטות בה קטן. נוסף על המדד של סך הפליטות מוצג באיור מדד לשינוי ברמת הפליטות

³⁸ ראו קישור בהערה 2; בנוסף למדינות המוזכרות שם לא חתמו על האמנה גם הודו, אינדונזיה ואוסטרליה. תוחלת החיים של תחנת כוח פחמנית היא בין 35 ל-40 שנים. התחייבות לניטרליות פחמנית ב-2050 משמעותה הפחתה של בין 5 ל-10 שנים מתקופת הפעילות של הנכס, כלומר, פגיעה בערכו הנוכחי הנקי, ועל כן – ביכולת לממנו. לפיכך ההתחייבות של חלק מהמדינות לניטרליות פחמנית ב-2060 היא למעשה הצהרה שלעת עתה "עסקים כרגיל".

לנפש. במדד זה ביצועי ההפחתה של ישראל אינם גבוהים ביחס למדינות העולם, שכן הוא מתחשב בגידול המהיר של האוכלוסייה בישראל ביחס למדינות המפותחות האחרות, שרובן הפחיתו את הפליטות.

כפי שצוין מעלה, יעדי האקלים מאתגרים במיוחד למשק הישראלי – בין השאר, משום שרמת הפליטות לנפש בישראל אינה גבוהה ביחס למדינות המפותחות בעולם, ומשום שקצב גידול האוכלוסייה בישראל גבוה ביחס למדינות האחרות. איורים ז'-5.1 ו-ז'-5.2 מראים את הקשר בין ביצועי ההפחתה לבין שני גורמים אלו. באיור העליון (ז'-5.1) ניתן לראות את הקשר בינם לבין רמות הפליטה לנפש בשנת 2015. מהאיור נראות שתי קבוצות מדינות: האחת גדולה יותר וכוללת את רוב מדינות המדגם, ובשנייה נמצאות כמה מדינות שבהן רמות הפליטה לנפש גבוהות יחסית (ארה"ב, קנדה, ניו זילנד ואוסטרליה). מהאיור עולה קשר שלילי בין רמת הפליטה לנפש ב-2015 לשינוי בביצועי הפליטות בקבוצה הכוללת את רוב המדינות. מדינות בעלות רמות פליטה גבוהות לנפש הצליחו להוריד אותן יותר מאשר מדינות שבהן רמות הפליטה לנפש נמוכות. תוצאה אמפירית זו מוסברת בעובדה שלמדינות אשר בהן רמות הפליטה לנפש גבוהות יש יותר אפשרויות לצמצום



תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

והפחתה של הפליטות בשלבים הראשונים של התהליך (אשר בסופו כל המדינות אמורות להגיע ל"ניטרליות פחמנית"). האירוע התחתון מציג את הקשר בין ביצועי ההפחתה לגידול האוכלוסייה: הוא מצביע על מתאם חיובי בין גידול האוכלוסייה לגידול הפליטות. מהאירוע עולה שאף כי גידול האוכלוסייה בישראל גבוה יחסית לשאר המדינות במדגם, ביצועי ההפחתה שלה אינם נמוכים, והיא אף נמצאת מתחת לקו המגמה. לסיכום, ישראל ממוקמת סמוך לשני קווי המגמה, משמע שבהתחשב בנסיבות של המשק הישראלי ביצועיו עולים בקנה אחד עם המגמה העולמית – פליטה גבוהה במקצת מן המגמה כאשר הביצועים נבחנים ביחס לרמת הפליטות לנפש ונמוכה במקצת מן המגמה כאשר מתחשבים בגידול האוכלוסייה.

ב. השפעות פוטנציאליות של ההחלטות בוועידת גלזו על המדיניות בישראל

מדיניות האקלים בישראל כרוכה בהחלטות על כלי מדיניות פיסקלית בעלות השלכות לטווח הארוך. כך, לדוגמה, את ההשקעה בתשתית האנרגיה ניתן לנתב לערוצים המספקים פתרון בטוח הקצר או לתשתית שתאפשר פתרון בטוח הארוך, לכשיתפתחו טכנולוגיות חדשות, וכן לתשתית המספקת פתרונות בתחום ההפחתה או בתחום ההסתגלות, שלעיתים מנוגדים זה לזה.³⁹ ההחלטות על עיתוי ההשקעה הממשלתית ותמהילה, תלויות, בין היתר, בעוצמה ובעיתוי של תהליכי הפחתת הפליטות בעולם ובכללים שיינקטו בקהילה הבין-לאומית.

מאחר שבשלב זה הגמילה מפחם היא האתגר הקריטי ביותר בסדר היום האקלימי, היוזמות של ועידת גלזו כוונו לעבר שלב היציאה מדלק-מאובנים זה: פסגת המנהיגים שמטרתה הייתה לקדם דה-קרבונזציה של הכלכלה העולמית בעוד 30 שנים,⁴⁰ היוזמה הפיננסית לעצור את המימון של פיתוח והשקעה בתעשיית הפחם לייצור אנרגיה, ויוזמת האנרגיה לעצור את הפיתוח והסבסוד של תחנות כוח מבוססות-פחם. בוועידה הוסכם ששלב היציאה מהפקת אנרגיה מפחם יוחלף בשלב הפחתה. שלב היציאה היה אמור לעצור את הפיתוח והתמיכות של ייצור אנרגיה באמצעות פחם, מה שצפוי להתרחש בישראל ב-2026. במקום זאת הוחלט – בהתאם לשני האמור בפורום הבין-לאומי – להסתפק בהפחתת חלק מהתמיכות לתעשייה זו, בעיקר על ידי צמצום של סובסידיות לא יעילות, אך לא של כל הסובסידיות. אמנם בוועידת גלזו הושגו מספר יעדי מדיניות ראויים לציון מחוץ ליוזמת האקלים המרכזית – ובפרט הסכמה בדבר החשיבות של עצירת כריתת יערות הגשם, יוזמה להגביל את פליטות גז המתאן והסכמה של גופים שונים להתייחס לנושא מהאספקט הפיננסי – אך השפעתם קטנה בהשוואה להפחתת השימוש בפחם.^{41,42} אחד ההישגים של ועידת גלזו הוא ההסכמה על מנגנון שוק אוניברסלי של סחר בפליטות, שישתתפו בו גם מדינות אשר כיום אינן לוקחות חלק בסחר זה: מדינות אשר לא עמדו ביעדי ההפחתה תוכלנה לשלם למדינות שהפחיתו את הפליטות מעבר ליעדים, וכך לזקוף את אותה הפחתה לזכות עצמן. הדבר ממסד את מנגנון הבחינה העתידית של השגת יעדי הסכם פריז. מנגנון השוק יאפשר לישראל, כמו למדינות אחרות, לשקלל את העלות והתועלת של אי-עמידה ביעדים ולהגיב באמצעות מסגרת מסודרת, תוך אפשרות להגדיל את הפליטות באמצעות תשלום למדינות אחרות שיפחיתו אותן, ועל כן מסיר חלק ניכר מאי-הוודאות לגבי התפתחויות פוליטיות והאפשרות של סנקציות בין-לאומיות בעתיד.

אחד ההישגים של ועידת גלזו הוא ההסכמה על מנגנון אוניברסלי של סחר בפליטות, שישתתפו בו גם מדינות אשר כיום אינן לוקחות חלק בסחר זה: מדינות אשר לא עמדו ביעדי ההפחתה תוכלנה לשלם למדינות שהפחיתו את הפליטות מעבר ליעדים, וכך לזקוף את אותה הפחתה לזכות עצמן.

³⁹ ראו לדוגמה: חברת נגה (פברואר 2022). "משק החשמל בישראל", כחלק מהוועדה המיוחדת לעניין הקרן לאזרחי ישראל.

⁴⁰ ראו: הערה 36.

⁴¹ לעומדה דומה לזו המוצגת כאן לגבי הסיכוי לניטרליות פחמנית והקשר לתעשיית הפחם ראו התייחסות של ראש הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה.

⁴² לפירוט ההישגים בוועידה ראו: "United Nations: " COP26. Together for our planet."

2. תחזית הפליטות וההתחייבויות הבין-לאומיות של ישראל

סעיף זה מציג את ההתחייבויות הבין-לאומיות של ישראל מול תחזית פליטות הבנויה על תרחישים, המפורטים מטה. נבחין בניתוח בין ההתחייבויות של ישראל על בסיס ההצהרות הרשמיות לגבי רמות הפליטה העתידיות לבין כלי המדיניות הכוללים את ההשפעה של תקנות, רגולציה וכלי מדיניות פיסקלית (המסים או ההוצאה הממשלתית) על הפליטות. משמע שתחזית הפליטות אינה מניחה כי המטרות יושגו, אלא בוחנת את הסיכוי שיושגו על בסיס מגמת הפליטה בשימושים המרכזיים בעבר והשפעת כלי המדיניות השונים עליהם. התרחישים השונים נותנים ביטוי לכלי מדיניות שונים. אנו מתרכזים בכלי מדיניות הקשורים לאנרגיה, ולא עוסקים באפשרות לצמצם פליטות באמצעות כלי מדיניות שיופעלו על הפסולת, על התהליכים התעשייתיים ועל החקלאות. התחזית מניחה כי פליטותיהם של אלה יגדלו בקצב גידולם בעבר.

תוצאות הסימולציות מלמדות שאין תרחיש המבוסס על כלי המדיניות, מבין אלה שבחנו, שבו ישראל תעמוד ביעדי הפחתת הפליטות בתחום האנרגיה, ומשום כך – כנראה גם ביעדי האקלים שהציבה לעצמה. כלי המדיניות שבחנו אכן גורמים לשינויים מבניים לא מבוטלים, שהם חלק מרכזי במעבר לכלכלה דלת פחמן, ושינויים אלו משפיעים על קצב גידולן של הפליטות בטווח הקצר – אך בטווח הארוך מגמות בעלות קצב גידול מעריכי, כגידול האוכלוסייה והתוצר, משפיעות על הפליטות יותר. לפיכך, כדי לעמוד בהתחייבויות יידרשו בשנים הקרובות צעדי מדיניות נוספים, וכן שימוש בטכנולוגיות שחלקן, לעת עתה, אינן קיימות או אינן כלכליות.

לוח ז'-2: היעדים הלאומיים של ישראל להפחתת הפליטה¹

(רמת הפליטה של ישראל וההתחייבויות להפחתת הפליטה)

פליטה בפועל		יעדים			
2015	2019	2019	2030	2050	
² MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	שינוי מ-2015	MtCO ₂ e	שינוי מ-2015	2015
פליטות/יעדים כלליים					
79	79	0%	58	-27%	12
פליטות/יעדים לפי מגזר					
חשמל	37.6	-13%	26.3	-30%	5.6
תחבורה	17.6	6%	18.2	3%	0.7
תעשייה	12	3%	8.4	-30%	5.3
פסולת	5.5	1%	2.9	-47%	0.4
אחר	6.3	54%	6.3	0%	6.3
סכום המקורות	79	0%	62.1	-21%	18.3

NDC.1

MtCO₂e - Million ton of CO₂ equivalent.2

מקור: החלטת ממשלה 171 והלמ"ס

הרלוונטיים של ההתחייבויות והמטרות שתוארו מעלה מוצגים בקווים אנכיים לשנים 2015, 2021, 2023, 2030 ו-2050. הקו השחור מתאר את כמות הפליטות המרבית שישראל מורשה לפלוט על פי התחייבויות הבין-לאומיות. נדגיש שמגמת הקו הלינארית היא הנחת עבודה לצורך המחשה, ואינה חלק מההתחייבויות. עקב המעבר מיעדים במונחי פליטה לנפש למונחי הפחתת כלל הפליטות החל משנת 2020 השיפוע של הקו השחור יורד.

נתוני סך הפליטות, עד 2019, מחולקים על בסיס מקורות הפליטה הראשוניים. הפליטות מ"סך כל האנרגיה" מתחלקות לשלושה רכיבים: ייצור אנרגיה (47% מסך פליטות גזי החממה ב-2018), שעיקרו ייצור חשמל ותחבורה (24%), ואנרגיה אחרת (9%).⁴⁷ מקורות הפליטה האחרים הם תהליכים תעשייתיים (9%),⁴⁸ פסולת (8%),⁴⁹ וחקלאות (3%).⁵⁰ נתוני הפליטה לאחר 2019 מבוססים על תחזית הפליטה. פרט לכלי המדיניות במשק האנרגיה, שאותם נפרט להלן, כל התחזיות במודל "עסקים כרגיל" מבוססות על מגמות העבר.⁵¹

קצב הגידול של ייצור החשמל הוא 2.7% בשנה.⁵² תמהיל האנרגיה בתרחיש "עסקים כרגיל" מניח ש-10% מהחשמל מיוצרים באמצעות אנרגיות סולריות, קרוב למצב הנוכחי, וכך עד 2050. ההתערבות הממשלתית היחידה המובאת בחשבון בתרחיש "עסקים כרגיל" היא עיתוי שלב היציאה מפחם והמעבר לגז טבעי ב-2026. תוצאות התרחיש מלמדות שבהנחות אלו ישראל לא תעמוד ביעדיה ל-2023, בעת "ספירת המלאי", וגם לא ביעדים של 2030 ו-2050.

נבחן את ההשפעה של מספר הצעות לתוואי מדיניות בתחום האנרגיה על תחזית הפליטה. תוצאות הסימולציות של התרחישים השונים מוצגות בלוח ז'-3. השורה הראשונה מציגה את סך הפליטה המרבי המותר בישראל על בסיס ההתחייבויות שניתנו באמנת האקלים, בשנים רלוונטיות. בשורה השנייה מוצגים יעדי הפליטה מייצור חשמל, בשלישית כמות הפליטות הצפויה בתרחיש "עסקים כרגיל", שתואר מעלה, וברביעית הפליטה מייצור חשמל בתרחיש "עסקים כרגיל".

לאחר מכן הלוח מציג תרחיש, שנכנה "תרחיש 30 70", אשר בו תמהיל הדלקים מבוסס על תוכנית משרד האנרגיה לשנת 2030, המוצגת באיור ז'-7. תמהיל האנרגיה משקף את שלב היציאה מפחם של המעבר האנרגטי בישראל, עם הפסקת שריפת הפחם עד 2026, וכן את המשך יישום השלב השלישי של המעבר האנרגטי – מגז טבעי לאנרגיות נטולות פליטה. נדגיש שחלק ניכר מירידת הפליטות בישראל בשנים האחרונות נובע ממעבר מפחם לגז טבעי, והירידה צפויה להתמצות עם סיום המעבר. בתרחיש "30 70", משקלן של האנרגיות נטולות הפליטה יגדל בהדרגה מ-7% ב-2019 עד 30% ב-2030, וייוותר ברמה זו לאחר מכן. במסגרת התרחיש שאר החשמל מסופק באמצעות גז טבעי, בשיעור של 70%, וללא דלקים אחרים, כגון פחם ומזוט. על פי הנחות תרחיש זה צפוי כי ישראל תעמוד ביעד שנקבע למגזר החשמל, אך לא ביעד הכללי.

⁴⁷ האנרגיה האחרת כוללת בעיקר שריפת דלקים כגון גפ"מ, קורסין ועצי הסקה.

⁴⁸ בעיקר הידרופלורקרבון, המשמש למזגנים.

⁴⁹ כלומר תהליכי ריקבון.

⁵⁰ שהפליטות בה נובעות מתהליכי ריקבון, מתהליכים כימיים ומפליטות גזים של בעלי החיים.

⁵¹ בפרט, פליטות התחבורה האחרת גדלות בקצב שנתי של 3.5%, האנרגיה האחרת ב-3.5%, התהליכים התעשייתיים ב-3.8% הפסולת ב-1% והחקלאות ב-1.7%.

⁵² L. Gallo (2017). "A Long-Term Forecast of Electricity Demand in Israel" Bank of Israel Discussion Paper

מאז 2017 הוכנסו בתחזיות צמיחת התוצר בישראל מספר עדכונים, אך הם לא משפיעים על תוצאות תחזית הביקוש לחשמל במידה משמעותית.

פרק ז': ביטחון אנרגטי
תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

לוח 3: תחזית הפליטה תחת תרחישים שונים של תמהילי דלקים בייצור חשמל (MtCO_{2e})

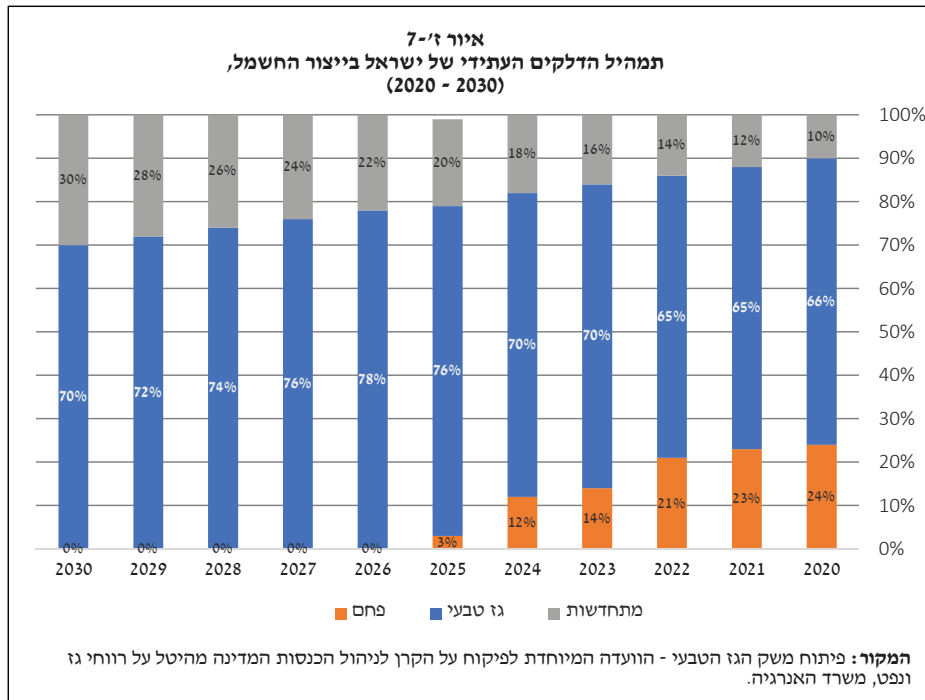
2050	2040	2030	2023	
יעדים - NDC				
12	35	58	75	רמת הפליטה
6	16	26	34	פליטות מייצור חשמל
תרחיש עסקים כרגיל				
146	112	87	79	רמת הפליטה
52	41	33	34	פליטה מייצור חשמל
30 אחוז מתחדשות ו- 70 אחוז גז טבעי עד 2030				
134	103	80	77	רמת הפליטה
-12	-9	-7	-2	השינוי ברמת הפליטה לעומת תרחיש עסקים כרגיל
41	32	25	32	פליטה מייצור חשמל
100 אחוז מתחדשות עד 2050				
93	85	76	76	רמת הפליטה
-52	-27	-11	-3	השינוי ברמת הפליטה לעומת תרחיש עסקים כרגיל
0	14	22	31	פליטה מייצור חשמל

מקור: מבוסס על עיבודי בנק ישראל

בטווח הארוך, השפעתן של מגמות בעלות קצב גידול מעריכי כמו האוכלוסיה והתוצר גוברת, הפליטות ממשיכות לגדול וישראל לא מצליחה לעמוד ביעדים הכלליים תחת אף תרחיש. עם זאת תיתכן אפשרות של עמידה ביעד המגזרי של משק החשמל.

התרחיש האחרון מציג מצב היפותטי שבו משקל האנרגיות נטולות הפליטה בתמהיל הדלקים ממשיך לעלות באופן לינארי מהרמה הנוכחית ועד לרמה שבה כל החשמל מיוצר באמצעות אנרגיות סולריות, ב-2050. לפי תרחיש זה שיעור האנרגיות הסולריות בסך ייצור החשמל ב-2030 יגיע ל-40%, ואכן ניתן לראות בלוח ז'-3 שתרחיש זה מפחית את הפליטות יותר מאשר תרחיש "70 30". בתרחיש זה ישראל תעמוד ביעד המגזרי של משק החשמל, אולם עמידה ביעד הכללי דורשת נקיטת צעדים משמעותיים גם בתחומים אחרים. משרד האנרגיה הכין מפת דרכים למשק חשמל דל פחמן עד שנת 2050 במטרה להגיע להפחתה של 85% בפליטות הפחמן ממשק החשמל עד לאותה שנה.⁵³ בתוכנית צוינו שני מתווי קצה: במתווה האחד כל הפחתת הפליטות מושגת על ידי שימוש באנרגיה סולרית, עד כדי 87% מתמהיל הדלקים, ובמתווה השני הונח גידול "טבעי" של האנרגיה הסולרית, שיגיע בשנת 2050 ל-54%, ושאר הפחתת הפליטות תושג באמצעות טכנולוגיות שעדיין אינן מסחריות או אינן בשימוש בישראל כיום – טורבינות גז עם "תפיסת פחמן" (Carbon capture), קישוריות לרשתות חשמל שכנות לשם רכישת חשמל ממקורות מתחדשים, טורבינות רוח הצפות בים, ועוד. על פי התוכנית, המתווה בפועל יהיה במרחב בין שני תרחישי קצה אלו. נוסף על כך, בהתאם להתחייבות של ראש הממשלה בוועידת גלזגו לאיפוס פחמני עד 2050, אותרו מספר טכנולוגיות עתידיות, שתוכלנה להביא את ישראל לאיפוס מלא של פליטות הפחמן, כגון אגירה ארוכת טווח ופירוליזה של מתאן. את התהליכים שתוארו בתרחישים עשויה להגביר הטלת מס פחמן, כהמלצת בנק ישראל. על פי תיבה שפורסמה בדוח הבנק לשנת 2019 עלייה של אחוז אחד במחיר החשמל עקב המס תקטין את הביקוש לחשמל בכ-0.3%, מה שיקרב את המשק להשגת היעדים.

⁵³ ראו: משרד האנרגיה (אפריל 2021). "מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050" [לינק](#)



בחינה נוספת שנערכה מטמיעה בתרחישים הקודמים כלי מדיניות נוסף, הקשור למעבר מנפט לגז טבעי. בעקבות היוזמה הבריטית הונח שכל המכוניות החדשות בישראל משנת 2035 ואילך יהיו מכוניות חשמליות. רמת הפליטות של כלי רכב נטול פליטה נקבעת על בסיס תמהיל הדלקים המשמש לתחבורה. קצב הגידול של מספר כלי הרכב הוא בהתאם לגידול באוכלוסייה (1.7%).⁵⁴ 10% מהרכבים הם חדשים, ושיעור הבלאי השנתי של הרכבים הוא 5%. משקלם של כלי הרכב הפרטיים נטולי הפליטה בסך הרכבים החדשים גדל באופן ליניארי מהרמה הנוכחית עד ל 100% ב-2035. השינוי ברמת הפליטות כתוצאה ממהלך זה הוא שולי, ועל כן אינו מוצג כאן.

3. סיכום והמלצות מדיניות

פרק זה ניתח את המתח, הגובר בשנים האחרונות, בין הצורך לספק לאזרחים ביטחון אנרגטי ובין המגמה העולמית לקדם ניטרליות פחמנית במשק האנרגיה. דה-קרבוניזציה של מערכת האנרגיה (חשמל, תחבורה ו"אנרגיה אחרת"), המהווים ביחד 76% מסך פליטות גזי החממה) היא תנאי הכרחי להשגת ניטרליות פחמנית, כלומר להפחתה של 53% לפחות מפליטות גזי החממה בעולם, וההיתכנות של פתרונות לפליטות של גזי החממה ממשק האנרגיה גבוהה מזו של פתרונות המתייחסים לשאר המקורות. משום כך הניתוח בפרק התרכז במשק האנרגיה והתעלם מהטיפול בפליטות האחרות – של פסולת, תהליכים כימיים וחקלאות. נמצא כי כל זמן שטכנולוגיות לכידת פחמן אינן מסחריות, הדרך היחידה לדה-קרבוניזציה של מערכת האנרגיה היא החלפת מקורות

⁵⁴ מספר הרכבים בישראל גדל בקצב של 5% בשנה. אם מגמה זו תימשך, מספר הרכבים על כבישי ישראל צפוי לגדול פי ארבעה עד 2050. כיוון שתרחיש זה אינו בר-קיימא, אנו בוחרים תרחיש מתון יותר. כמובן, משמעות הדבר היא שהפליטות המוצגות בתרחישים כאן מוטות כלפי מטה, וסביר שיהיו גבוהות יותר.

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

האנרגיה הראשוניים מדלקים מאובנים באנרגיות נטולות פליטה, כגון אנרגיות מתחדשות וגרעיניות.

הניסיון הבין-לאומי בשנים האחרונות מלמד על חשיבות הסינכרון והתכנון הנכון של מערך הייצור וההולכה בתהליך המעבר לאנרגיות מתחדשות. תהליך זה כולל הכנה ממשלתית של שוקי האנרגיה, התשתית והרגולציה הרלוונטית לפיתוח תעשיות האנרגיה המתחדשות והבטחת יתירות גיבוי. הפיתוח המואץ של טכנולוגיות אגירה צפוי להקל על ההתמודדות עם אתגרים אלה בעתיד. מהלכים אלה נחוצים גם מההיבט של ההסתגלות, משום שהם מחזקים את היכולות הטכניות והמוסדיות של מערכות האנרגיה בישראל. על כן, הטכנולוגיות המתחדשות הן עדיין הפתרון הישים ביותר להשגת ניטרליות פחמנית בישראל. ניתן לקדם את תעשיית האנרגיות המתחדשות באמצעות תמיכה בתחרותיותן. זאת על ידי תמחור העלויות החיצוניות של הדלקים הפוסיליים (למשל הטלת מס פחמן) והשקעה בתשתית מערכת החשמל.⁵⁵

יחד עם זאת, לנוכח הסיכונים בהסתמכות בלעדית על אנרגיה סולרית, אנו רואים בחיוב את דעת הגורמים המקצועיים, הממליצים לבחון בזהירות ייצור חשמל בטכנולוגיות גרעיניות. הדבר לא נעשה עד כה בישראל, מסיבות ייחודיות לה, אף שהוא רווח במדינות רבות ומפותח באחרות, גם במזרח התיכון.^{57,56} אנרגיה גרעינית היא כיום המקור הזמין – טכנולוגית ומסחרית – הנותן מענה לשתי מטרות המדיניות: ביטחון אנרגטי וניטרליות פחמנית. כל עוד ייצור אנרגיה באמצעים גרעיניים בישראל אינו על הפרק, ההיתכנות של ניטרליות פחמנית תלויה בטכנולוגיות עתידיות, שאינן קיימות או אינן מסחריות, ובצעדי מדיניות שטרם אופיינו ונוסו בישראל. מימוש התחייבויותיה של ישראל לקהילה הבין-לאומית תלויה אפוא בהתפתחויות טכנולוגיות עתידיות. חשוב שתהליך הבחינה יהיה שקוף ככל הניתן לשוקי האנרגיה, שכן מתווה המדיניות של הממשל חשוב להם לצורך תכנון ארוך טווח. כדוגמה לחשיבות התכנון ארוך הטווח המליץ בנק ישראל בעבר לקדם את תוכנית האב למשק האנרגיה בישראל, ואכן יש התקדמות בנושא.⁵⁸ התפתחויות טכנולוגיות מהשנים האחרונות מרמזות על האפשרות שתפותח טכנולוגיה גרעינית אשר תהיה סחירה יותר מהטכנולוגיות הקודמות, ותאפשר גם למדינות שאינן חתומות על אמנת אי ההפצה לייצר אנרגיה באמצעים גרעיניים, עם הפיתוח של כורים קטנים.⁵⁹

לניתוח ההתפתחויות בגלגול מספר השלכות על ישראל. ראשית, ניכר שהצטמצמו סיכויי ההצלחה העולמיים לעמוד ביעדי הגבלת ההתחממות הגלובלית אשר נקבעו בהסכם פריז. לכן גברה החשיבות של ההסתגלות למצב החדש. תיבה ז'-1 מתארת בקצרה את סוגיית ההסתגלות, את הערכת הסיכון הפיזי לישראל ואת כלי המדיניות המרכזיים לטיפול בו. שנית, העדר מחויבות בין-לאומית רחבה ליעדי הפחתת הפליטות מגדיל את הסיכון שירידת הביקושים לדלקים פוסיליים במדינות שמתכוונות לעמוד ביעדי האקלים תקוזה בחלקה על ידי עליית השימוש בדלקים כאלה במדינות שאינן מחויבות ליעדים, עקב ירידת מחירם.⁶⁰ יתר על כן, בקרב המדינות שתעמודנה ביעדי האקלים קיימת האפשרות שירידה של ההשקעות באנרגיה פוסילית תגרום למשברי אנרגיה,

⁵⁵ לתיאור מלא של התוכנית הלאומית, הכוללת התייחסות לפליטות שאינן ממערכת האנרגיה ראו: המשרד להגנת הסביבה (אוקטובר 2021). "תכנית יישום לאומית להתמודדות עם משבר האקלים 2022-2026".

⁵⁶ ראו: משרד האנרגיה (אפריל 2021). "מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050", עמוד 16.

⁵⁷ S. Griffiths (2017). "A review and assessment of energy policy in the Middle East and North Africa region. Energy Policy", 102, 249–269.

⁵⁸ ראו: "המאבק העולמי בהתחממות הגלובלית והשלכותיו על ישראל", סוגיות נבחרות, דוח בנק ישראל, 2019.

⁵⁹ Buongiorno, Jacopo, Ben Carmichael, Bradley Dunkin, John Parsons, and Dirk Smit. 2021. "Can Nuclear Batteries Be Economically Competitive in Large Markets?" Energies 14, no. 14: 4385.

⁶⁰ הערכה זו עולה בקנה אחד עם זו של הפורום הכלכלי העולמי: "The Global Risk Report", World Economic Forum, 2022.

לנוכח הסיכונים
בהסתמכות בלעדית
על אנרגיה סולרית אנו
רואים בחיוב את המלצת
הגורמים המקצועיים
לבחון בזהירות ייצור
חשמל בטכנולוגיות
גרעיניות. הדבר לא נעשה
עד כה בישראל, מסיבות
ייחודיות לה, אף שהוא
רווח במדינות רבות,
ומפותח באחרות, גם
במזרח התיכון.

אשר יולכו להיפוך המדיניות. שלישית, הואיל וחלק לא מבוטל ממדינות העולם – וביניהן מעצמות-על כרוסיה וסין וגם מדינה מפותחת כאוסטרליה – דחו רשמית את יעדי האקלים, ייתכן שפחתה ההסתברות לנקיטת מהלכים של מיסוי היבוא ממדינות בעלות פליטות גבוהות. מכל מקום, ההתפתחויות ממחישות את הדינמיות של המערכת הפוליטית הבין-לאומית ואת המהפכים שמתחוללים בה. דוגמה לכך היא הסכמתן של מדינות העולם, לאחר שנים של משא ומתן קשה, על רפורמה במיסוי הבין-לאומי, לרבות חלוקת תקבולי מס מסוימים בין המדינות. לפירוט ראו תיבה בפרק ו'.

אירועי השנים האחרונות באירופה בכלל ובגרמניה בפרט ממחישים שיש חשיבות רבה לסנכרון של צמצום השימוש במקורות האנרגיה הקיימים עם שילוב האנרגיות המתחדשות ולהבטחת אמינות האספקה. מתח זה בין המעבר האנרגטי וסדר היום האקלימי לביטחון האנרגטי הוא שאלת המדיניות המרכזית שעומדת בפני הממשלות בעולם בסוגיית האקלים. כחלק מהרחבת המענים לדילמה זו הציע האיחוד האירופי לאחרונה לסווג טכנולוגיות גז טבעי הכוללות לכידה והטמנה של פחמן, וגרעין כטכנולוגיות ירוקות.⁶¹ גם נשיא ארה"ב ונשיאת האיחוד האירופי התייחסו למתח זה לאחרונה בהצהרה משותפת.⁶²

הקשיים האמורים בתהליך המעבר לטכנולוגיות האנרגיה המתחדשת אינם בגדר טיעון תקף נגד הכנת שוקי האנרגיה, תשתית האנרגיה והרגולציה הרלוונטית להטמעה במערכת האנרגיה הישראלית; זאת, בין השאר, לנוכח ההתקדמות של טכנולוגיות האגירה, הצפויה לשנות תמונה זו בעתיד. הכנת התשתית שתתאים לטכנולוגיות אלו חשובה גם מבחינת ההסתגלות למצב החדש, משום שהיא מגבירה את החוסן ואת היכולות הטכניות והמוסדיות של המערכת. לכן, על אף האתגרים האמורים, קידום מהלכים אלה הוא עדיין כלי המדיניות הפרגמטי ביותר לקידום ניטרליות פחמנית בישראל.

אשר לכלי המדיניות לטיפול בשוק, וזאת באופן העולה בקנה אחד עם המלצות הארגונים הבין-לאומיים – מומלץ לחזק את מעמדן התחרותי של תעשיות האנרגיה המתחדשת מול תעשיות האנרגיה המבוססות על דלקים פוסיליים באמצעות תמחור פחמן.⁶³ בגלל קוטנו של המשק הישראלי מס פחמן מתאים יותר מכלים אחרים: הוא הכלי היעיל ביותר, ובו הנטל העודף הנמוך ביותר.⁶⁴ מס פחמן יסייע למעבר מאוזן אל אנרגיות מתחדשות, באפשרו לשוק, שבו נמצא הידע הרלוונטי, ולא לאדמיניסטרציה, לבחור את הטכנולוגיה המתאימה, ובהחלטה 286 הממשלה החליטה על החלתו.⁶⁵ הצו שהוציא שר האוצר בעקבות זאת נידון בימים אלו בוועדת הכספים.⁶⁶ מאחר שמהלך זה כרוך גם בייקור החשמל, חשוב ללוותו בצעדים משלימים לצמצום הפגיעה באוכלוסיות רגישות, וזאת בלי לפגוע בתמריצים להפחתת הפליטות.

⁶¹ ראו: (European Commission (Jan 2022: "EU Taxonomy: Commission begins expert consultations on" "Complementary Delegated Act covering certain nuclear and gas activities".

⁶² ראו: (The White House (Jan 2022: "Joint Statement by President Biden and President von der Leyen" "on U.S.-EU Cooperation on Energy Security".

⁶³ ראו: "International Monetary Fund (Oct 2019): "Fiscal Monitor: How to Mitigate Climate Change".

⁶⁴ המסמך של קרן המטבע הבין-לאומית (שם) מציג דיון מפורט ביתרונות ובחסרונות של כלי מדיניות שונים לקידום הפחתת הפליטות ומצביע על התועלת המשקית של הפעלת מס פחמן רחב היקף במשק, ובשיעור ניכר. (הדוגמה במסמך הקרן היא מס בשיעור של 75 לדולרים טון פחמן).

⁶⁵ לפירוט, ראו: יוסי מרגונינסקי וליאור גאלו (יוני 2020). "המאבק העולמי בהתחממות הגלובלית והשלכותיו על ישראל", בנק ישראל.

⁶⁶ ראו: משרד ראש הממשלה (אוגוסט 2021). "תמחור פליטות גזי חממה".

⁶⁷ ראו הודעה על ישיבות ועדת הכספים בנושא: /segaP/sesaeleRsserP/sweN/li.vog.tessenk.niam/:sptth xpsa.L12022170sserp

תרומת ישראל למאבק בהתחממות הגלובלית ותחזית הפליטה

פיתוח תעשיית אנרגיות מתחדשות, שהן הכרחיות להתקדמות הן בתחום ההפחתה והן להסתגלות, מצריך תשתית מפותחת של מערכת החשמל. לצורך זה יש להאיץ את ההשקעה בחיבור מוקדי הייצור הפוטנציאליים בדרום למוקדי הצריכה בירושלים ובמרכז הארץ. ההשקעה הכרחית גם לשינוי המבני המתנהל במשק החשמל עם המעבר מייצור ריכוזי לייצור מבוזר. נוסף על אלו, האצת פיתוח התשתית נדרשת כדי להגביר את החוסן של המערכת, וזאת משיקולי הסתגלות למצב שבו רמת הסיכון גבוהה יותר מאשר היום. תשתית חשמל חזקה יותר תמנע אי-יציבות במקרים של אסונות טבע או מצבי מזג אוויר קיצוניים. ההשקעה בתשתית החשמל נדרשת גם לצורך המעבר מנפט לגז טבעי והמעבר המקביל של ענף התחבורה מרכבים המבוססים על מנוע בערה פנימית לרכבים נטולי פליטה, שיוסיפו עומס על מערכת החשמל. גידול זה יגביר גם את הביקוש וגם את התעבורה במידה לא מבוטלת, והדבר מצריך גם הוא תשתית חשמל נאותה. בכפיפות למגמות הפליטה הנוכחיות, הטכנולוגיות הקיימות וכלי המדיניות המוצעים, יכולתה של ישראל לעמוד בהתחייבויותיה באמנת האקלים, ובפרט בזו של שנת 2023, מועד "ספירת המלאי", מוטלת בספק. ואולם ישראל אינה ניצבת בפני אתגר זה לבדה; גם למדינות אחרות צפויים אתגרים לא פשוטים בהשגת היעדים. ישראל אף רשאית לזקוף לזכותה מספר הישגים, כפי שהוצג מעלה. לאור תמונת מצב זו, לצד הקשיים שהתגלו בהשגת קונצנזוס בין-לאומי לגבי יעדי הפחתת הפליטות, ייתכן שאם מאמצי הדה-קרבוניזציה בישראל יוליכו להתקדמות איטית מכפי שקובעים היעדים, הדבר יתקבל בהבנה בקרב השותפות לתהליך.

תיבה ז'-1: סוגיית ההסתגלות והערכת הסיכון בישראל¹

תיבה זו מציגה בקצרה את סוגיית ההסתגלות להתחממות הגלובלית, ומאירה את הסיכונים העיקריים הכרוכים בהתחממות הגלובלית לכלכלה הישראלית. סוגיית ההסתגלות – שעניינה ההיערכות להשפעות ההתחממות הגלובלית – מוצאת ביטוי מועט בלבד בדיון הציבורי הבין-לאומי, וזאת מפני האספקט המקומי שבאופיה: התועלת מאדפטציה היא ברמה הלאומית. ברוח זו יצאה מוועידת גלזגו קריאה למדינות העולם להאיץ את יישום הכלים הרלוונטיים באופן מקומי, לאומי.²

התיבה בנויה על הדוחות של הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) בנושא האדפטציה, שבהם הנושא מנותח, ושואבת מהם את ההגדרות הבסיסיות ואת התוצאות המרכזיות הרלוונטיות לישראל.³ הערכת הסיכון של דוחות ה-IPCC היא על פי אזורים אקלימיים ולא על פי מדינות, ולכן הדוח האחרון, שפורסם בפברואר 2022 (AR6), כולל פרק העוסק באזור המזרח התיכון, ולא ספציפית בישראל. הדבר מחייב הערכה ספציפית של הסיכונים בישראל. יש להדגיש, שהתרחיש הבסיסי המוצג ב-AR6 אינו מתחשב בהערכה שהוצגה מעלה, אשר על פיה כתוצאה מההסכמות בוועידת גלזגו הסבירות של רמת פליטות גבוהה יותר עלתה, ומשום כך ייתכן כי ממצאי AR6 המתוארים כאן הם הערכת חסר של הסיכון.

אחת המסקנות המרכזיות הכלליות של AR6 היא שהתחזיות מהשנים הקודמות העריכו בחסר את הנזקים הצפויים להיגרם בכל תרחיש של ההתחממות הגלובלית. זאת, בין היתר, בגלל התגברות ההשפעות של שינויי האקלים עד עתה, מידע חדש שהצטבר, והעובדה, העולה מהמדידות, שקצב עליית הטמפרטורה גם הוא מהיר מהצפוי.

שינוי האקלים גורם לעליית הטמפרטורה ולעלייה בשכיחות ובחומרה של אירועי קיצון אקלימיים, ובכך הוא מסכן את המערכות הפיזיות, המערכות האקולוגיות היבשתיות והימיות ומערכות האדם. פוטנציאל הסיכון של שינוי האקלים לכל אחת ממערכות אלו שונה בין אזורים גיאוגרפיים, ותלוי מאוד ברמת התשתיות המקומית. ה-IPCC מסווג את הוודאות לגבי כל אחד מהסיכונים לחמש רמות, מרמה נמוכה מאוד לרמה גבוהה מאוד. רמת הוודאות הגבוהה ביותר היא של סיכונים למערכת הפיזית, כגון סופות, שיטפונות, הצפות, בצורות, גלי חום וסחיפת קרקע.⁴ הנזק הפוטנציאלי מסיכונים אלו צפוי להיות חמור ביותר במדינות המתפתחות, משתי סיבות: ראשית, הסבירות הגבוהה לאסונות פיזיים

¹ תודה מיוחדת לפרופ' נגה קורנפלד שור, לתמר רביב ולצוות המשרד להגנת הסביבה על תרומה משמעותית לתיבה זו.

² Decision -/CP.26: "urges Parties to further integrate adaptation into local, national and regional planning;"

³ הדוח הקודם AR5:

Field, C. B., & Barros, V. R. (Eds.). (2014). *Climate change 2014—Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*. Cambridge University Press.

הדוח הנוכחי AR6:

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>

⁴ J. A. Patz, D. Campbell-Lendrum, T. Holloway and J. A. Foley (2005). "Impact of regional climate change on human health". *Nature*, 438(7066), 310–317.

C. Mora, B. Dousset, I. R. Caldwell, F. E. Powell, R. C. Geronimo, C. R., Bielecki and C. Trauernicht (2017). "Global risk of deadly heat", *Nature Climate Change*, 7(7), 501–506.

R. Basu and J. M. Samet, (2002). "Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence", *Epidemiologic Reviews*, 24(2), 190–202.

R. S. Kovats and S. Hajat (2008). "Heat stress and public health: a critical review", *Annu. Rev. Public Health*.

היא בעיקר במרכז אפריקה ובדרומה, בדרום אמריקה ובמזרח אסיה, כולל את הודו וסין; שנית, רמת התשתית הפיזית (אנרגיה, מים, תברואה, תחבורה ותקשורת) במדינות שבאזורים האלה פחות מפותחת, ולכן רגישותם לסיכון גבוהה יותר.⁵ מעבר לסיכונים הפיזיים קיימים סיכונים למערכות האקולוגיות היבשתיות והימיות. סיכונים אלו כוללים התגברות משמעותית בתדירות ובעוצמה של שריפות יער, התייבשות נחלים, אובדן מגוון ביולוגי והכחדה של מינים, תהליכי מדבור, פגיעה במצוק החופי, התפשטות של מחלות זואוונטיות ועוד. ביחס לאזור המזרח התיכון דוח ה-IPCC מפרט מגוון השפעות חמורות, כולל עלייה בשכיחות ובחומרה של גלי חום קיצוניים, אשר צפויים לגרום לעלייה של שיעורי התמותה, בפרט בקרב אוכלוסיות רגישות⁶, עלייה בשכיחותן וחומרתן של שריפות, עלייה בריכוז החלקיקים הנשימים המסוכנים לבריאות (PM2.5) בעקבות תהליכי מדבור ועלייה בשכיחות ובחומרה של סופות המסכנות תושבים.⁷ הידע בעניין השפעת ההתחממות הגלובלית על הסיכונים למערכות האדם מוגבל מאוד, משום שהוא מורכב במיוחד, ואי-הוודאות לגביו היא הרבה ביותר. נוסף על כך הוא מצריך, יותר מאשר הסיכונים למערכות האחרות, בדיקה מקומית ברזולוציה גבוהה כיום אין הערכת סיכון המתמקדת בישראל; כך עולה גם מדוח שפרסמה המנהלת הממשלתית לשינויי האקלים בישראל.⁸ הערכה כזאת נדרשת לנוכח המאפיינים הייחודיים של ישראל, שבגללם הסיכונים הרלוונטיים לה שונים מאלו של מדינות אחרות באזור. לדוגמה: בהיותה מדינה צפופה, שגידול אוכלוסייתה מהיר, גדלה בה במהירות גם צריכת המשאבים (בעיקר מים, מזון, אנרגיה ושטח). רבות מהתשתיות והערים נמצאות לאורך החוף, באזורים החשופים לסיכונים הצפות ועליית מפלס פני הים, לרבות תשתיות ההתפלה והאנרגיה, הממוקמות לאורך חופי הים התיכון. אמנם רמת התשתיות של ישראל, שלא כזו של שאר מדינות האזור, היא של מדינה מפותחת, אך ללא מיפוי מפורט של הסיכונים והיערכות לטיפול בהם צווארי בקבוק בהשקעה ובתכנון עלולים לסכן את המערכת כולה. דוגמה לסיכון פיזי הרלוונטי לאזור הוא פגיעה במקורות מים, ובכלל זה התייבשותם. לאורך עשרות שנים פיתחה ישראל יכולות התפלה מהתקדמות בעולם, המספקות כיום מענה לרוב הביקוש לשימוש ביתי. עם זאת יש לזכור שתהליך התפלת המים הוא עתיר אנרגיה, ולפיכך ההיערכות בישראל לביקושי המים העתידיים צריכה לכלול גם את התחשיב האנרגטי. פתרון ההתפלה גם לא עונה על הצורך במים לחקלאות, ולכן מגמת ההתייבשות עתידה לפגוע גם בענף זה. סיכון אפשרי אחר הרלוונטי לישראל נוגע למערכות האדם ולביטחון הלאומי והאזרחי. האירועים הפיזיים עלולים להשפיע במידה ניכרת על מדינות אחרות באזור, דבר שעלול להחמיר סכסוכים עם המדינות השכנות או להביא להגירת-אקלים ממדינות שייפגעו.⁹ סיכון אחר בהקשר של מערכות האדם קשור למערכת הבריאות. מגפת הקורונה, שגרמה אבדות באדם וברוחה, משמשת מבחן קיצון בזמן אמת, והניעה את מערכת הבריאות בישראל להסתגל לתגובה על משבר. חשוב לשמר את הידע שנצבר במהלך ההתמודדות עם המגפה לשם ההתמודדות עם אירועים דומים בעתיד. לנוכח החשיפה של המשק הישראלי לסיכונים אקלים חסר מידע מספק על התוחלות והסיכונים לאוכלוסיות, נכסים, תשתיות ופעילויות כלכליות. לכן חשוב לקדם הערכת מצב לאומית, שתמפה ותעריך בפרוטרוט את הסיכונים הפוטנציאליים בישראל ותציג כיוונים לפיתוח מענים אפשריים. יש לעשות זאת בהקדם, שכן ההיערכות לקראת חלק מאותם סיכונים פוטנציאליים יכולה להיות ממושכת. חשוב שניתוח כזה יתחיל בעבודה מדעית, שתציג את השלכות הסיכונים הפיזיים של שינוי האקלים באזור על מדינת ישראל, ועל בסיס זה ייערך ניתוח מקצועי-פרטני בתחומי המשק השונים, לצד ניתוח ההשפעות הפיננסיות והתכנוניות. במקביל מוצע לפתח ערוצי הידברות ותיאום אזרחיים עם מדינות

⁵ W. N. Adger, S. Huq, K. Brown, D. Conway and M. Hulme (2003). "Adaptation to climate change in the developing world." *Progress in Development Studies*, 3(3), 179–195.

⁶ ראו פרק 9 ב-AR6.

⁷ ראו פרק 6 ב-AR6.

⁸ ראו: היערכות מדינת ישראל לשינוי אקלים - דוחות המנהלת.

⁹ Climate and Security in the Middle East and North Africa, *Congressional Research Services*, 2022

דוח ה-IPCC מצביע על קשר בין אירועי חום למידת האלימות של סכסוכים, בפרט במדינות המזרח התיכון (רא' פרק 7).

תיבה ז'-2: השוואה כלכלית בין טכנולוגיות מרכזיות לאגירת אנרגיה

- שימוש בחשמל מאנרגיה סולרית ורוח בשיעור ניכר מסך ייצור החשמל יחייב אגירת אנרגיה. בבחינת ההיקף הנדרש של יכולת האגירה יהיה צורך להביא בחשבון גם את השונות בייצור בין ימים שונים בשל שינויים במזג האוויר.
- בהשוואה בין שתי טכנולוגיות אגירה – סוללות ליתיום ומימן – אגירה באמצעות מימן יקרה יותר, אך לפי ההערכות הקיימות מחירה היחסי צפוי לרדת.
- ההשפעות הסביבתיות המזיקות של טכנולוגיית האגירה באמצעות סוללות ליתיום גדולות מאלה של מימן.

שימוש באנרגיות מתחדשות הוא כלי מרכזי לצמצום פליטות גזי החממה במדינות רבות, ובהן ישראל, בהתאם ליעדים שקיבלו על עצמם. בשנת 2021 ייצור החשמל בישראל באמצעות אנרגיות אלו עמד על כ-7%¹ מסך ייצור החשמל, וכ-95%² מתוכם יוצרו באמצעים סולריים. השוואת התפלגות הצריכה של אנרגיות מתחדשות להתפלגות ייצורן השעתי מגלה חפיפה חלקית בלבד בין השיא בשעות הייצור לשיא בשימוש. כיוון שייצור אנרגיה סולרית הוא תלוי שמש, מעבר לאנרגיות מתחדשות בהיקף נרחב יחייב התמודדות עם הסוגיה של ייצור אנרגיה עודפת בשעות היום לשם שימוש בשעות הלילה – כלומר אגירת אנרגיה. שיפורים טכנולוגיים רבים והעלאת המודעות האקלימית הביאו לעלייה חדה של הביקוש לכלי אגירה שונים בשווקים הפרטי והציבורי כאחד. במסמך זה נתמקד בשתי דרכי אגירה הצוברות תאוצה רבה: סוללת ליתיום-יון (אגירה כימית) ומימן (אגירה בדלקים).

סוללת ליתיום-יון היא כלי אלקטרו-כימי לאגירת אנרגיה, שבו יוני ליתיום עוברים מאלקטרודה שלילית לחיובית ולהפך. היתרונות הבולטים של השימוש באמצעי זה הם צפיפות אנרגטית גבוהה, מספר מחזורי פריקה/טעינה גבוה ואיבוד נמוך של הקיבולת במהלך המיחזור; נוסף על כך סוללה זו יכולה להיטען ולפרוק אנרגיה באופן ישיר, ואין צורך בתהליכי ביניים, הנדרשים באמצעי אגירה אחרים. לאחר פריצת דרך משמעותית, שהניעה את חברת "סוני" היפנית, לראשונה ב-1991, לשווק כלי זה באופן מסחרי, גדל השימוש בליתיום-יון ברציפות; זאת במקביל לשיפורים טכנולוגיים, אשר הורידו את עלותו בשלושת העשורים האחרונים בכ-98%. לשם השוואה, בשנת 2000 היקף שוק הסוללות העולמי הוערך בכ-3-5 מיליארד דולרים³, ומחירו של קילואט-שעה הוערך בכ-2,200 דולרים, ואילו כיום שוק זה נאמד בכ-41 מיליארד דולרים⁴, והמחיר של קילואט-שעה הוא 140 דולרים. תחום מרכזי שאליו נכנסו הסוללות בשנים האחרונות הוא תעשיית הרכב.

הפקת מימן אפשרית במספר דרכים, שונות זו מזו ברמות הזיהום ובעלויות. הדרך הנקייה ביותר להפיק מימן, ובה נתמקד, היא מימן "ירוק", המופק ממים. בדרך זו המימן מיוצר באמצעות חשמל מאנרגיות מתחדשות לשם אלקטרוליזה (הפרדה חשמלית): בה מפרידים את המים למימן וחמצן; את המימן שהופרד בתהליך אפשר להמיר חזרה לחשמל באמצעות טכנולוגיות שונות של תאי דלק. היקף השימוש הגלובלי במימן נאמד בכ-330 שט"ן (שווה ערך לטון נפט)⁵, וסך מכירות המימן ב-2018 הוערך בכ-115 מיליארד דולרים. אולם כ-95% מהייצור הוא בטכנולוגיות מזהמות, ושאינו מופק מאנרגיה מתחדשת.⁶

¹ חישובי בנק ישראל על בסיס נתוני חברת החשמל.

² הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

³ C. Pillot, March 2017

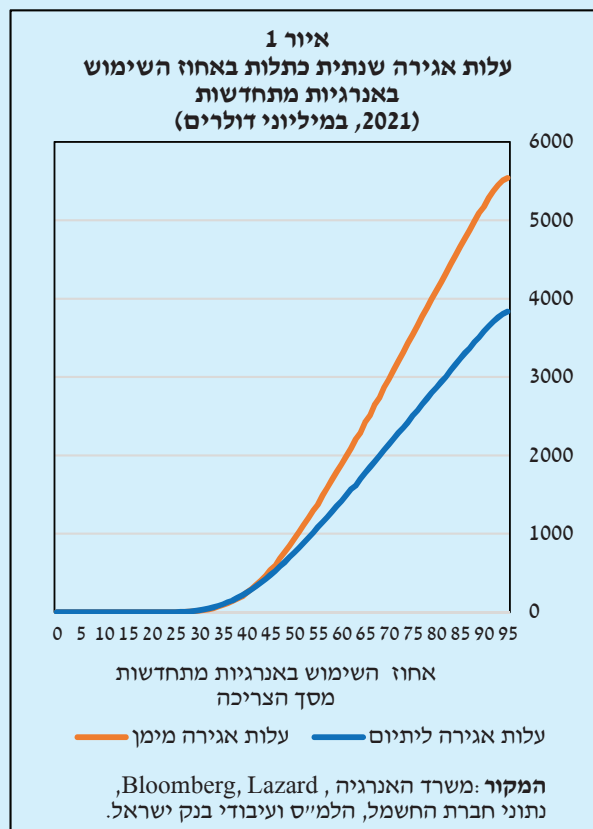
⁴ בשנים שבין 2000 ל-2016 גדל השוק גדל באופן לינארי, ומ-2016 עד היום התעשייה הכפילה את עצמה.

⁵ IRENA, Sep 2018

⁶ IRENA, Sep 2019

כדי להשוות כלכלית בין מקורות אנרגיה שונים יש לקבוע יחידת מידה משותפת, המביאה בחשבון את השונויות במאפייניהם – באופן פעולתם, במחזור החיים שלהם, באנרגיה שביכולתם לספק ועוד; בספרות מקובל להשתמש בעלות הנקראת "עלות אנרגיה/אגירה מנורמלת" (Levelized cost of energy/storage), המוגדרת כסך ההשקעה הכספית במקור האנרגיה ליחידת אנרגיה המופקת ממנו.⁷

היקף צריכת החשמל היומית בישראל בשנת 2021 היה כ-207 אלף מגה-וואט-שעה; על בסיס התפלגות הצריכה השנתית בכל יום נערכה סימולציה לגבי כל אחד מכלי האגירה, ובה חושבו עלויות האגירה לצד הגדלת קיבולת הייצור



של אנרגיות מתחדשות כתלות באחוז השימוש בהן מסך הצריכה השנתית. מסימולציות אלו עולה כי השוואתן של שיטות האגירה מתחילה להיות רלוונטית כאשר השימוש באנרגיות מתחדשות מסך הצריכה הוא מעל 23%, וכי אגירה בעלויות משמעותיות מבחינה כלכלית נדרשת החל מ-40% בערך (איור 1).⁸ נתון משמעותי נוסף העולה מסימולציות אלו הוא הפער בין התרחישים בסך האנרגיה המתחדשת שנצטרך לייצר כאשר נדרשת אגירה. פער זה נובע מהבזבוז שבתהליך – מאובדן האנרגיה הכרוך בהמרת החשמל למימן וחזרה לחשמל בעת השימוש. הכמויות הדרושות של אנרגיות מתחדשות מצביעות גם על היקף ההיערכות הכרוכה בהקמת תשתיות הייצור.⁹ בטכנולוגיות הקיימות אובדן האנרגיה מוערך בכ-55%-75% מהאנרגיה המושקעת במימן. משמע שכדי להשתמש ב-1 קילואט-שעה שנאגר בשעות היום יש לייצר כ-2.5 קילואט-שעה; לעומת זאת בסוללות הליתיום-יון אובדן האנרגיה מוערך כ-5%-15% בלבד.¹⁰ ואולם צפוי שהטכנולוגיה בתחום המימן תתקדם, וכך יצטמצם הפער המחושב בתרחישים המוצגים כאן.¹¹

לוח 1 מציג השוואת עלויות לגבי תרחישי האגירה באמצעות מימן ובאמצעות סוללות ליתיום-יון, בדמותו מצב שבו המשק משתמש בכ-50% אנרגיות מתחדשות מסך הצריכה השנתית של האנרגיה ברמתה בשנת

2021.¹² כן מניחה ההשוואה אגירה תוך-יומית בלבד, ובמילים אחרות: בתרחישים אלו על סך האנרגיה

7

$$LCOS = \frac{\text{Total life time cost of Storage}}{\text{Total life time output}}, LCOE = \frac{\text{Total life time cost of production}}{\text{Total life time output}}$$

⁸ בהתחשב בשונויות הרבה בין ימים שונים ביכולת הייצור של אנרגיות מתחדשות בשל תנאי מזג האוויר, הסף האפקטיבי נמוך יותר, ותלוי גם במידת היתירות של מקורות האנרגיה האחרים.

⁹ הקמת התשתיות מתייחסת הן לאמצעי הייצור של האנרגיה המתחדשת והן להולכתה.

¹⁰ בניתוחים בהמשך מסמך זה נעשה שימוש ביעילות (האנרגיה המנוצלת מתוך האנרגיה המושקעת) של 40%-85% עבור מימן וליתיום, בהתאמה, משום שערכים אלו הם הנפוצים ביותר בספרות, בפרט בIEA. ראו ערך: (World energy council, 2020), ו-(IEA, June 2019)

¹¹ כתלות במספר משתנים כגון קצב השיפור הטכנולוגי של סוללות הליתיום-יון, ההיצע של מחצב הליתיום ושל מתכות שונות המעורבות בייצור הסוללה ושיפור היעילות של טכנולוגיית המימן בקצב מהיר מזה של שיפור טכנולוגיית הליתיום-יון.

¹² ככל שהביקוש לחשמל יגדל, כך הצורך באגירה יהיה רלוונטי בשיעור נמוך יותר של אנרגיות מתחדשות מסך השימוש.

המתחדשת המיוצרת בשעות היום לספק גם תחליף לביקוש בשעות הלילה.¹³ מהניתוח ניתן לראות כי בסך הכול, כשהטכנולוגיות והעלויות הן אלה הקיימות כיום, יש לאגירת אנרגיה בעזרת סוללות ליתיום-יון יתרון כלכלי על פני שימוש במימן בתרחישים המוצגים לעיל: עלות האגירה באמצעות מימן ירוק נאמדת בכ-930 מיליון דולרים בשנה, וזו של שימוש בסוללות בכ-757 מיליון; תוצאה זו משקפת בעיקר את העובדה כי טכנולוגיית האגירה באמצעות מימן בזבזנית יותר, ולכן מחייבת בניית כושר ייצור והפקה של יותר אנרגיה מתחדשת בשעות היום, מה שמביא ליותר שימוש ישיר באנרגיה מתחדשת, ולכן – לפחות אגירה ביחס לשימוש בליתיום.¹⁴ למרות זאת, השפעת ה"זבזב" היא הדומיננטית, ולכן השימוש במימן יקר יותר.

הבדל נוסף הוא כי שלגבי סוללות הליתיום-יון כלי האגירה הוא גם המוצר עצמו, ואילו לגבי מימן ייצור ואחסונו הם שלבים נפרדים. לאחסון מימן ישנן דרכים שונות, כגון: דחיסתו למכליות; שמירתו במערות תת-קרקעיות ייעודיות;

לוח 1: השוואת עלויות האגירה של אנרגיה מתחדשת - עבור כמות זהה ל-50% מסך הצריכה בשנת 2021 (יחידות אנרגיה ב-TWh)

תרחיש מימן	תרחיש סוללות	
74		סה"כ צריכת חשמל שנתית בשנת 2021
37		סה"כ צריכת חשמל מאנרגיה מתחדשת שנתית
44	38	סה"כ ייצור חשמל באנרגיה מתחדשת שנתית ¹
12	7.3	סה"כ אנרגיה מתחדשת שנתית המיועדת לאגירה ²
40%	85%	יעילות אמצעי האגירה ³
4.8	6.2	סה"כ צריכת חשמל שנתית מאמצעי אגירה ⁴
194	122	עלות אגירה מנורמלת (דולר למגה וואט שעה) ⁵
931	757	עלות אגירה שנתית כוללת (מיליוני ₪) ⁶

1. צריכת החשמל מאנרגיה מתחדשת שווה לסך ייצור החשמל באנרגיה מתחדשת פחות האנרגיה שאובדת בתהליך האגירה.

2. ייצור האנרגיה שמוקצה לאמצעי אגירה ברוטו.

3. יעילות משמעותה סך האנרגיה המנוצלת (output) חלקי סך האנרגיה שנאגרה (input).

4. כמות האנרגיה שמשמשת לייצור חשמל מתוך האנרגיה האגורה.

5. בהנחה שהעלויות המנורמלות של שני אמצעי האגירה הן קבועות (בלתי תלויות בכמות הייצור) - מתוך הערכות Lazard ו-Bloomberg. כולל את עלות ייצור האנרגיה שאבדה בתהליך האגירה.

6. העלות היא מכפלה של כמות האנרגיה הנצרכת מאגירה בעלות האגירה המנורמלת.

מקור: Lazard, Bloomberg ועיבודי בנק ישראל.

¹³ בניתוח זה לא בחנו תרחישי אגירה ארוכי טווח, אף על פי שהדבר בהחלט אפשרי.

¹⁴ זאת משום שבשני המצבים סך הביקוש של הצרכנים במשק הוא אותו סך, וכן גם בייצור האנרגיה ממקורות פוסיליים. כך, למשל, לצורך אגירה באמצעות מימן אמנם יש לבנות יותר כושר ייצור של אנרגיות מתחדשות, אך כיוון שמקורות אלה זמינים גם בשעות היום, ניתן להפחית את השימוש באנרגיה פוסילית בשעות האור ולהגדילו בשעות הלילה, ובכך להקטין את הצורך בצריכת אנרגיה אגורה ממקורות מתחדשים בשעות הלילה.

הפיכתו לנוזל וספיגתו בחומרים כימיים אחרים – למשל אמוניה. בניתוח זה ההנחה היא שנעשה שימוש במכליות, אשר בהן המימן נמצא במצב גזי ודחוס.¹⁵ עלות אחסון המימן בצורה זו מוערכת בכ-0.19 דולר לק"ג.¹⁶ למרות היתרון הכלכלי של הסוללות בתרחישים דלעיל, ישנן תחזיות אשר לפיהן עד שנת 2050 עלות ייצור המימן תרד מאוד – עד לכ-50 דולרים למגה-וואט-שעה. זאת הודות לשיפורים טכנולוגיים ולסכומים גדולים המושקעים במחקר ופיתוח בתחום.¹⁷ לגבי סוללות נושא זה מורכב יותר: אמנם גם לגביהן נחזית ירידת מחירים כתוצאה משיפור טכנולוגי (אף כי מתונה יותר מאשר ביחס למימן), אך מאחר שהסוללות מופקות בחלקן מליתיום, המגיע ממחצבים, וכמותו מוגבלת, קשה לשלול את האפשרות שללא פריצת דרך טכנולוגית משמעותית בתחום הסוללות, יחד עם גידול הביקוש בעולם,¹⁸ המחירים דווקא יעלו. בהקשר הסביבתי חשוב לציין שייצור סוללות הליתיום-יון כרוך בזיהום, ונכון להיום מיחזור הסוללות אינו כדאי ליצרניות ומתנהל בהיקפים נמוכים יחסית. משמעות הדבר היא שחלק ניכר מסוללות אלו נטמן כיום בקרקע ומהווה זיהום נוסף.¹⁹ לסוגיה זו יהיה צורך לתת מענה בעתיד, באמצעות כלי מדיניות שיביאו להפנמת עלויות ההטמנה וייצרו כדאיות למחזור את הסוללות.²⁰ סקירה זו מציגה תרחישים נפרדים, אך ייתכן שהפתרון האופטימלי יתקבל משילוב של שני אמצעי האגירה יחד. זאת במיוחד בזכות היתרונות הכלכליים הנוכחיים של הסוללות לאגירה תוך-יומית לצד יכולתו של המימן לאגור אנרגיה גם לטווחי זמן ארוכים יותר.

ביבליוגרפיה

Bloomberg (March 30, 2020). Hydrogen Economy Outlook.

Department for Business, eENERGY & Industrial Strategy UK (Aug 2021). Hydrogen Production Costs 2021. London, UK: OGL.

iea hydrogen (Dec 2017). Global trends and outlook for hydrogen. Retrieved from <https://www.ieahydrogen.org/case-studies/?limit=20&q=global%20outlook%20and%20trends>

IEA (June 2019). The future of hydrogen. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IRENA (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. Abu Dhabi.

IRENA (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi.

LAZARD (Oct 2021). LAZARD'S LEVELIZED COST OF HYDROGEN ANALYSIS—VERSION 2.0.

LAZARD (Oct 2021). LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS—VERSION 7.0.

PILLOT, C. (Sep 2017). The rechargeable Battery Market and Main Trends 2016-2025. Portugal: AVICENNE ENERGY.

World energy council (2020). Five steps to energy storage. London-UK.

¹⁵ פתרון הדחיסה נבחר לניתוח זה משום שהוא נפוץ יחסית, פשוט טכנולוגית ומיועד לאגירה לטווח קצר. עם זאת ישנם בישראל מאגרים תת-קרקעיים שבהם ניתן לאחסן מימן; פתרון הספיגה בכימיקלים אחרים נפוץ בעיקר כחלק מאחסון המימן בהעברה ממקום למקום.

¹⁶ לפירוט הערכות ראו: Bloomberg Hydrogen Economy Outlook של Bloomberg.

¹⁷ Hydrogen Economy Outlook-Bloomberg.

¹⁸ בין היתר, עקב הגידול באגירת אנרגיות ירוקות ורכבים נטולי פליטה.

¹⁹ החישובים לא כוללים עלות זו.

²⁰ עוד בנושא במסמך "צמצום טביעת הרגל האקלימית של ענף התחבורה בישראל", שכתבו יוסי מרגונינסקי וליאור גאלו מחטיבת המחקר, כחלק מ"לקט ניתוחי מדיניות וסוגיות מחקריות".

