

ביטחון אנרגטי לנוכח משבר האקלים

שחר דולב ורם עמר

קיים ניגוד בין ביטחון אנרגטי הנשען על דלקים פוסיליים לבין ביטחון לאומי השואף לשמר שקט ביטחוני, יציבות באספקת מזון, מים ואנרגיה, ורמת חיים המאפשרת חינוך, תעשייה, מסחר ומחקר ופיתוח. השימוש הגלובלי בדלקים פוסיליים לייצור חשמל, לתחבורה ולתעשייה מייצר גזי חממה התורמים להתחממות כדור הארץ. מדינת ישראל ממוקמת באזור המתחמם מהר יותר מהמוצא הגלובלי, ולכן ככל שמדיניות השימוש בדלקים פוסיליים תימשך, כך ייפגעו מקורות המים, המזון ורמת החיים, ואיתם החוסן הלאומי. בעולם מתרחשת תפנית ומדיניות האנרגיה משתנה, יחד עם מדיניות רחבה יותר לצמצום פליטות גזי חממה. לישראל אתגרים רבים בהשתלבות בתפנית זו, אך היא אפשרית ותביא עימה תועלות כלכליות. הביטחון האנרגטי של ישראל יכול להישען על אנרגיה סולארית, על אגירת אנרגיה ועל ניהול מבוזר. שיפורים טכנולוגיים, הוזלה בעלויות ודוגמאות מן העולם מראים שאפשר להשיג ביטחון אנרגטי שאינו נוגד את הביטחון הלאומי. על ישראל להפנים את הסיכון והמחירים של משבר האקלים, וכדי לבצע את התפנית עליה לאמץ חקיקה לצמצום פליטות והטלת מס פחמן.

מבוא

הגדרת הביטחון האנרגטי של מדינה היא היכולת לספק לכלל אזרחיה את כל צורכי האנרגיה (חשמל ודלק) בכל זמן, ברציפות, במחיר ברה־השגה ותוך שמירה על הבריאות והסביבה. מאחר שאנרגיה חיונית לקיום החיים, לביטחון האנרגטי משקל כבד במסגרת הביטחון הלאומי הכללי. התלות של בני אדם באנרגיה הלכה וגברה מתחילת המהפכה התעשייתית ועד היום, ותלות זו צפויה עוד להתעצם עם עליית רמת החיים של כשליש מאוכלוסיית העולם. אולם לאופן ייצור האנרגיה כיום יש השפעה שלילית על הביטחון הלאומי.

במבט לעתיד ותוך התחשבות בצפי גידול האוכלוסייה ל־15 מיליון תושבים בשנת 2050 (למ"ס, 2012), ההשפעות הצפויות של המשך התחממות האקלים בישראל הן

מדאיגות. העלות הכלכלית של החרפת הבצורות, המשך הפגיעה בתוצר החקלאי והקצנה של הנזקים מאירועי אקלים תגדל. תנאי המחיה בעונת הקיץ, שתתארך ותהיה חמה יותר, יכולים לגרום להגירה של השכבות הגבוהות באוכלוסייה. תנאים קשים יותר במדינות שכנות ובאפריקה יכולים להעלות את מספר המהגרים שיגיעו לישראל ברגל ויבקשו מקלט. תנאי אקלים ותנאים כלכליים קשים יותר יכולים גם לערער את יציבות המשטרים סביבנו ולהשפיע לרעה על הסיכוי ליחסי שכנות טובים עם האוכלוסייה הפלסטינית. ככל שתנאי המחיה בישראל יהיו קשים יותר כך ייפגע החוסן הלאומי. בין התלות באנרגיה לבין הביטחון הלאומי קיים מעגל משוב שלילי אשר יש לשנותו ברמה הבינלאומית, קל וחומר ברמה הלאומית.

המפתח לשבירת מעגל המשוב השלילי נמצא בצמצום פליטות גזי חממה. מאחר שצריכת אנרגיה היא מקור ל-80 אחוזים מהפליטות במדינת ישראל (המשרד להגנת הסביבה, 2018), שינוי כיוון בתחום האנרגיה יהווה מסה קריטית להנעת תהליך של צמצום פליטות כללי בישראל. המאמר נפתח ברקע על משבר האקלים ואנרגיה ולאחר מכן מודגם כיצד מעבר לאנרגיה מתחדשת – 50 אחוזים בשנת 2030 ו-95 אחוזים ב-2050 – הוא אפשרי, כלכלי וסביבתי. אחרי כן מובא דיון באופן שבו המעבר לאנרגיה מתחדשת שובר את מעגל המשוב השלילי בין הביטחון האנרגטי לבין הביטחון הלאומי, ולסיום מוצעת רשימת המלצות למדיניות שיסייעו במימוש המעבר. מאמר זה מתבסס על עבודת מחקר שבוצעה במרכז השל לקיימות במסגרת מחקר NZO (מרכז השל לקיימות, 2020), אשר שם לעצמו למטרה לבחון כיצד אפשר לצמצם את פליטות גזי החממה ממשק החשמל בישראל בעשורים הקרובים.

רקע

משבר האקלים הוא תוצאה של אופן ייצור האנרגיה, שריפת דלקים פוסיליים והביקוש לאנרגיה, אשר גדל בצורה מעריכית (אקספוננציאלית) יחד עם האוכלוסייה מזה 150 שנה. מתחילת המהפכה התעשייתית, עם המצאת מנועי הקיטור והבעירה הפנימית, האנושות חוצבת וצורכת כמות הולכת וגדלה של דלקים פוסיליים (פחם, נפט, גז) ושורפת אותם כדי להפיק מהם אנרגיה. אנרגיה זו משמשת בין היתר לייצור חשמל, להנעת כלי תחבורה ולייצור חום לשימושים תעשייתיים. תוצר הלוואי של ייצור האנרגיה הוא פליטת פחמן דו-חמצני – גז חממה שמצטבר באטמוספירה וכולא בתוכה את חום השמש. ב-150 השנים האחרונות האנושות פלטה כשני טריליון טונות של פחמן דו-חמצני, וכיום ריכוזו באטמוספירה (ppm 414) גבוה ב-40 אחוזים מהשיא במיליון השנים האחרונות (ppm 300) ("Carbon Dioxide", 2020). כדי לתת פרופורציה על משמעות השינוי, כשריכוז הפחמן הדו-חמצני היה נמוך ב-40 אחוזים (ppm 180) מהשיא במיליון השנים האחרונות, כדור הארץ היה בעידן קרח. ככל שתמשיך האנושות

בקו הנוכחי של הגברת התלות באנרגיה ושריפת דלקים פוסיליים, ריכוז גזי החממה יגדל, משבר האקלים יחריף ותוצאותיו ישפיעו באופן דרמטי על הביטחון הלאומי של מדינות רבות, בפרט על ישראל.

בעוד הטמפרטורה הממוצעת של כדור הארץ עלתה במעלת צלזיוס אחת תוך 150 שנה (2020, "Carbon Dioxide"), במדינת ישראל הטמפרטורה עלתה ב-1.4 מעלות צלזיוס, והיא צפויה לעלות במעלה אחת נוספת תוך 30 שנה. ישראל גובלת במדינות שבהן שורר אקלים מדברי ושינויי האקלים במדינה ניכרים כבר כיום: אירועי חום קיצוניים, ירידה בכמות המשקעים הממוצעת ועלייה במספר השיטפונות (יוסף ועמיתיו, 2019). לשינויים אלו יש גם השפעות שניתן לחוש כבר עתה: עלייה בצורך במיזוג אוויר, שגזרת עלייה בביקוש לאנרגיה; מחסור במים וגידול במספר מתקני ההתפלה, שגוזרים עליה נוספת בביקוש לאנרגיה; נזקים כלכליים לערים שאירעו בהן שיטפונות (נהריה, תל-אביב); נזקים לחקלאות משיטפונות ומימי שרב ממושכים; ועלייה במספר השריפות. לשינויי האקלים גם השפעה ישירה על הביטחון האנרגטי בישראל – עליית הטמפרטורה מפחיתה את נצילות טורבינות הגז ואת הקיבולת של קווי הולכת החשמל. שריפות מחד גיסא וסופות מאידך גיסא מאיימות על קווי ההולכה, ומיעוט המשקעים מקשה על שימוש במים לקירור יחידות הייצור.

מכיוון שישראל אחראית ל-0.18 אחוזים מהפליטות השנתיות בעולם,¹ ניתן להתווכח אם לישראל יש תפקיד במניעת משבר האקלים, שהוא גלובלי במהותו. התשובה השטחית היא לא. ישראל כשלעצמה לא תפתור (או לא תחמיר) את משבר האקלים. עם זאת, קיים אינטרס מובהק לנקוט מדיניות לצמצום פליטות, משום שמחיר ההתעלמות גבוה בכל מתאר של מדיניות בינלאומית. במתאר "עסקים כרגיל" שבו מדינות העולם לא מיישמות מדיניות חריפה למניעת משבר האקלים, מדינת ישראל חייבת להיערך לאקלים חם יותר בשלוש מעלות צלזיוס לפחות. אקלים כזה יוביל ליבוא כמעט מלא של מזון, להתפלה של כלל צריכת המים ולעלייה בשימוש במיזוג אוויר, ועד סוף המאה ה-21 גם לעלייה של פני הים במטרים ספורים. במתאר שבו העולם אכן נוקט מדיניות לצמצום פליטות, הימנעות של ישראל מכך תוביל לפגיעה במעמדה הבינלאומי ולהפסדים כלכליים משמעותיים ביבוא וביצוא, אשר ימוסו במכסי פחמן באירופה (European Commission, 2020) ובארצות הברית (Climate Leadership Council, 2019). כך או כך, על ישראל לפעול לצמצום פליטות גזי החממה, והדרך היעילה ביותר היא מעבר לאנרגיה מתחדשת. הצטרפותה של ישראל למדינות העולם שמיישמות מדיניות מניעה למשבר האקלים תאפשר לה לחזק את מעמדה הבינלאומי ולהוביל בתחום האנרגיה הסולארית. זאת נוסף על יתרונות כלכליים, ביטחוניים וסביבתיים שעולים בקנה אחד עם אנרגיה מתחדשת.

בעשור האחרון הדעה הרווחת הייתה שאנרגיה מתחדשת היא יקרה מדי, ומכיוון ששמש ורוח אינם מקורות רציפים וסדירים, לא ניתן לתכנן רשת חשמל הנשענת ברובה על ייצור ממקורות אלו. דעה זו משתנה כיום, ובמבט לעתיד ניתן לראות כיצד אנרגיה מתחדשת תיתן מענה יציב ואמין לרשתות חשמל בכל קנה מידה. הסיבה העיקרית לשינוי היא ירידה בעלות ייצור החשמל משמש ומרוח, וירידה בעלותם של אמצעי אגירת האנרגיה בסוללות ליתיום. ניתן לראות כיום חוות סולאריות וטורבינות רוח, לצד אגירה בסוללות המספקות חשמל בזמינות גבוהה ובעלות נמוכה יותר מכל אמצעי הייצור האחרים. על סמך שינויים אלו המתרחשים בעולם מראה המאמר כיצד המעבר לאנרגיה מתחדשת אפשרי, מעמיק בהשפעות על הביטחון האנרגטי ומסתיים בהמלצות למדיניות.

תוכנית מעבר לאנרגיה מתחדשת האתגרים

נכון לשנת 2020, משק החשמל בישראל מבוסס ברובו על ייצור באמצעות גז טבעי (כ-70 אחוזים), וזאת לאחר שינוי שמקטע הייצור עבר בשני העשורים האחרונים: מייצור בעיקר באמצעות פחם, סולר ומזוט לייצור בעיקר באמצעות גז. ייצור באמצעות פחם מספק קצת יותר מ-20 אחוזים מהביקוש השנתי לאנרגיה, ואנרגיה סולארית מספקת קצת פחות מ-10 אחוזים ממנו. כדי להגדיל את היקף הייצור ממקורות מתחדשים ולצמצם את הפליטות מייצור חשמל, צריך משק החשמל להתגבר על מספר קשיים שהם ייחודיים לישראל:

- לישראל מגוון מצומצם של מקורות אנרגיה מתחדשים – אין בה נהרות ומפלים שמהם ניתן להפיק חשמל הידרו־אלקטרי ואין מקורות קרקעיים שמהם אפשר להפיק חשמל גיאותרמי. מפת הרוחות ביבשה מסמנת אזורים מצומצמים שבהם אפשר להפיק אנרגיה, ובאזורים אלו יש הגבלות סביבתיות נוספות המגבילות את פוטנציאל הייצור. המקור העיקרי בישראל הוא השמש.
- אנרגיית השמש, שמטבעה מייצרת כמות חשמל גדולה מאוד בצוהרי היום, באופן שאינו מתלכד עם שיא הביקוש, ומייצרת פחות חשמל בחורף, מציבה שני אתגרים מורכבים לרשת החשמל: אספקה זמינה של חשמל לאורך כל השנה ומיתון עומס על קווי הולכה בשעות שיא הייצור. הפתרון לאתגרים אלו נשען על אגירת אנרגיה – טכנולוגיה שמתפתחת בקצב מואץ וחלים בה שינויים מהירים וירידה תלולה במחירים. אין בעולם מדינות הנשענות על היקף גדול של ייצור חשמל סולארי בלבד.
- יש קושי בהקצאת שטחים מספיקים לייצור כלל האנרגיה הנדרשת מהשמש. שטח מדינת ישראל הוא כ-22 אלף קמ"ר והצפיפות בה היא מהגבוהות במערב. היקף השטח שיידרש למתקני ייצור סולאריים בשנת 2050 הוא כ-900 קמ"ר, או כחמישה

אחוזים משטח המדינה. מתנהל ויכוח ערני בשאלה היכן יוקצו השטחים הללו: בשטחי טבע פתוחים; בשטחים ביטחוניים לאימונים או לתעשיות ביטחוניות; בשדות חקלאיים; בשטחים עירוניים ומבונים?

- קושי נוסף הוא רשת הולכת החשמל, שבעשור האחרון לא נעשתה בה השקעה רבה, וכיום היא מהווה צוואר בקבוק להוספת מקורות ייצור סולאריים בדרום הארץ ובצפונה. הואיל וכלל המקורות הסולאריים מייצרים את שיא האנרגיה בשעת הצוהריים (שעת שיא השמש), רשת ההולכה נדרשת לספק קיבולת הולכה גדולה מאוד (אם כי רק בשעות השיא). מצב זה מחייב להקים קווי הולכה נוספים של מתח עליון ועל-עליון, אשר ינוצלו בעיקר בצוהריים. נוסף על כך, ברמה הסטטוטורית, תכנון קווי הולכה נמשך זמן רב כי הם חוצים מגוון שטחים, נדרשת סביבם רצועה רחבה של שטח ביטחון והם מהווים מפגע סביבתי. כל אלה מקשים על פתיחת צוואר הבקבוק של רשת ההולכה וחיבור מקורות סולאריים לרשת.
- אין לישראל קשרי חשמל עם מדינות שכנות. קושי זה מחייב את ישראל לתכנן ביטחון אנרגטי "אוטרכי". כמעט כל מדינה בעולם יכולה להתחבר לרשת החשמל של מדינות שכנות, ובכך להגביר את יציבות הרשת.
- הביקוש לחשמל צפוי לגדול יחד עם האוכלוסייה, התחממות האקלים וכניסתם של כלי הרכב החשמליים. הגידול בביקוש מקצין ומחריף את כל שאר הקשיים.

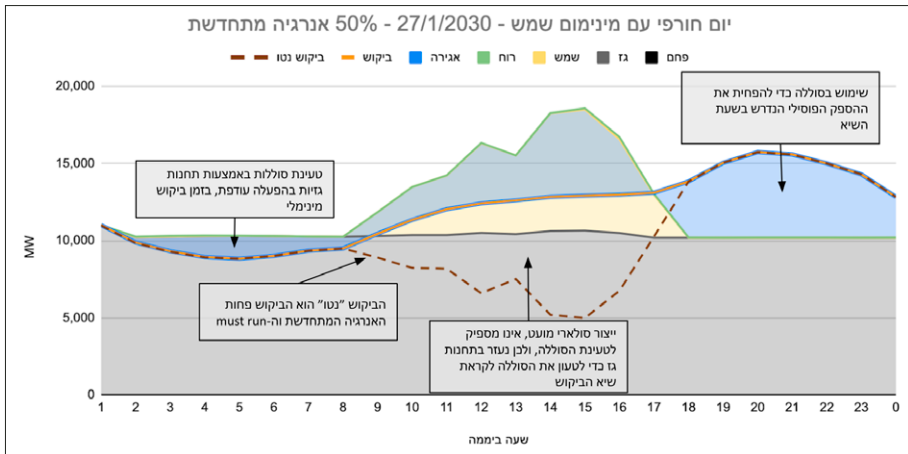
לאילו מתווספים הקשיים המוכרים של מעבר לאנרגיה מתחדשת: איזון וייצוב רשת החשמל; שליטה ובקרה ברשת מרובת צרכנים ויצרנים; וכמובן תכנון עלויות והגנה על תעריף החשמל לצרכן.

הפתרונות

תכנון אמצעי הייצור ממקורות מתחדשים

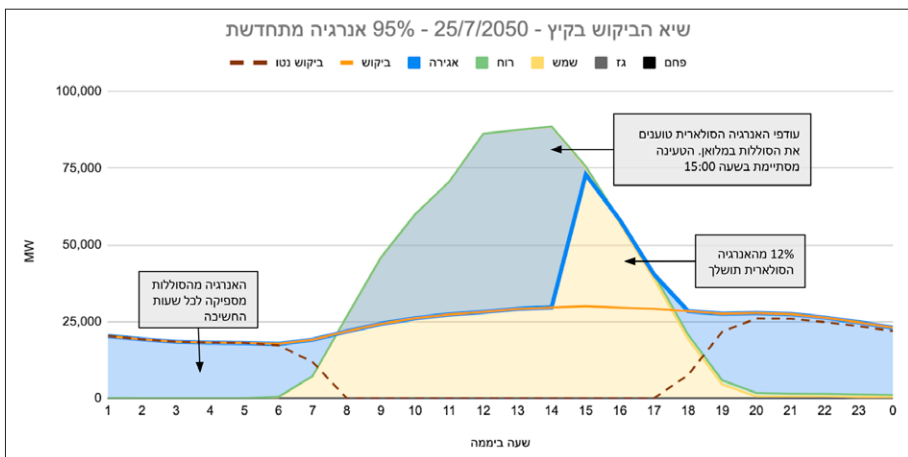
פרויקט NZO בוחן את כל הקשיים לעיל, חוקר ומגבש פתרונות לכל אחד מהם. האתגר הראשון שאיתו התמודד הצוות הוא הדגמת היכולת של ישראל להצטייד במקורות מתחדשים לייצור אנרגיה ולאגירתה, אשר ייתנו מענה לביקוש לחשמל בדרגת אמינות שקולה לאמצעים הקיימים כיום. כדי לעשות זאת פיתח הצוות סימולציה של מקורות ייצור החשמל, אשר מתאימה את אופן השימוש בהם לביקוש הצפוי בשלושת העשורים הבאים, ברזולוציה שעתית. הסימולציה נשענת על נתוני ביקוש אמיתיים שרשות החשמל מפרסמת מדי שנה. באמצעותה הסימולציה ניתן להדגים את המענה לביקוש לחשמל בשנים 2030 ו-2050 ברזולוציה של שעה, בתמהיל של מקורות ייצור המאפשר 50 ו-95 אחוזי ייצור ממקורות מתחדשים.

התרשימים הבאים מדגימים כיצד ייראו שני ימים מייצגים:



תרשים 1

תרשים 1 מציג את הייצור לפי מקור ושעה ביום שבו האנרגיה הסולארית תהיה המועטה ביותר בשנה. הקו הכתום מייצג את הביקוש, השטח האפור – ייצור פוסילי והצהוב – סולארי. השטחים בכחול מייצגים את השימוש בסוללות: כאשר שטח כחול נמצא מעל קו הביקוש, הסוללות נטענות. כאשר שטח כחול נמצא מתחת לקו הביקוש, הסוללות נפרקות ונעשה שימוש באנרגיה שלהן. ניתן לראות בתרשים 1 שגם ביום עם שמש מינימלית, רשת החשמל תיתן מענה לביקוש תוך התחשבות במגבלות אמצעי הייצור הפוסיליים (ramp up/down times) ותוך הבטחת אספקה של האנרגיה הנדרשת.



תרשים 2

באופן דומה, תרשים 2 מראה כיצד רשת החשמל תיתן מענה ליום בשנה שבו הביקוש לחשמל מרבי, תוך הישענות מלאה כמעט (95 אחוזים) על אנרגיה מתחדשת. קשה מאוד לחזות איך ייראה משק החשמל בעוד 30 שנה, אך נובעת מכאן מסקנה עקרונית: בטכנולוגיה המוכרת לנו כיום אפשר לתכנן רשת חשמל שתתבסס על אנרגיה סולארית ואגירתה בסוללות ליתיום. הסימולציה שפותחה בפרויקט NZO אפשרה לתכנן מפת דרכים לפיתוח מקורות הייצור, אשר מובילה להיקף מקורות מתחדשים של 50 אחוזים בשנת 2030 ו-95 אחוזים בשנת 2050, תוך התחשבות במגבלות ובאילווצים שהם מורכבים בפני עצמם: כושר הייצור של התעשיות הסולארית והסוללות; העלויות הצפויות של התוכנית; צמצום פליטות גזי החממה; ודרישות השטח העצומות עבור לוחות סולאריים.

השטח הנדרש לאמצעי הייצור הסולאריים

מימוש תוכנית המעבר לאנרגיה מתחדשת תלוי במידה רבה בשטח הנדרש לקצירת האנרגיה מהשמש: 900 אלף דונם. נעשו בארץ עבודות אחדות למיפוי השטחים הפוטנציאליים לאנרגיה סולארית:² מיפוי של המשרד להגנת הסביבה (המשרד להגנת הסביבה, 2020), ומיפוי של רשות החשמל (רשות החשמל, 2020). המחקר בפרויקט NZO נשען על ניתוחים אלו כדי להציע תמהיל שטחים שייתן מענה להספק הסולארי הנדרש עד 2050:

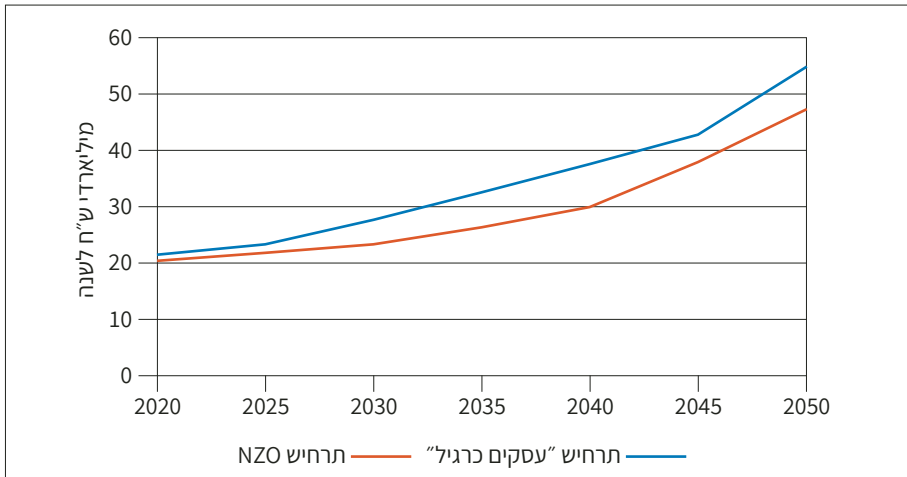
- כ-400 אלף דונם במרחב הבנוי והמופר, הקיים והעתידי (גגות, מאגרי מים, הצללות, כבישים ועוד).
- כ-100 אלף דונם של שטחי קרקע פתוחים ושטחים חקלאיים מוסבים.
- כ-400 אלף דונם נוספים משטחים ביטחוניים ודו־שימושיות בשטחים חקלאיים.

פוטנציאל השטחים קיים אך יש קשיים תהליכיים רבים במימושו, ולכן נדרשת התגייסות כוללת של מוסדות התכנון.

עלויות תוכנית המעבר לאנרגיה מתחדשת

השלב הבא בפרויקט NZO היה בחינת העלויות הצפויות של מימוש המעבר לאנרגיה מתחדשת, באמצעות בניית תוכנית שנתית של פיתוח מקורות ייצור החשמל משנת 2020 עד 2050. העלויות חושבו לפי שיטה הנהוגה בעולם בשם LCOE – Levelized Cost of Energy (Lazard, 2020). שיטת חישוב זו מאפשרת לחשב ולהשוות את עלות ייצור החשמל ממקורות שונים, שעלויות ההקמה והתפעול שלהן שונות מאוד. התחזיות לעלויות של מקורות ייצור שונים נלקחו מגופים מוכרים בעולם כגון Bloomberg NEF והמכון האמריקאי NREL. כמו כן, נדרש היה להביא בחשבון חלוקה לתת-קטגוריות של מקורות הייצור, לדוגמה לוחות סולאריים שמחיר התקנתם על גגות בתים שונה

ממחיר התקנתם בשדות סולאריים. חישוב העלויות נעשה פעם אחת עבור תרחיש NZO ופעם נוספת עבור תרחיש "עסקים כרגיל", שבו מדיניות האנרגיה נמשכת לפי תוכניות הממשלה הקיימות. התרשים הבא מראה את תוצאות ההשוואה.



תרשים 3: השוואת עלויות ייצור חשמל

התרשים מראה חישוב מצטבר של כ-130 מיליארד ש"ח עד שנת 2050. זהו חישוב צנוע יחסית לעלויות משק החשמל, אך תועלותיו מתבטאות בצמצום הפליטות, בביזור ההון ובהוזלת תעריף החשמל.

רשת הולכת החשמל

כאמור ייצור חשמל מאנרגיית השמש מציב אתגרים משמעותיים לרשת ההולכה. לדוגמה, כדי להוליך את האנרגיה שתיוצר בדרום הארץ לאזורי הצריכה ברחבי הארץ יידרש עיבוי נכבד של קווי ההולכה צפונה. הפתרון הטכנולוגי המאפשר לצמצם את הצורך בתשתיות הולכה ובמקביל להגביר את אמינות האספקה הוא אגירה. מתקני אגירה משני צידי קווי ההולכה יאפשרו לאגור את החשמל המופק בשיא הצוהריים ולהוליכו בפרק זמן ארוך יותר, באופן שתואם בצורה טובה יותר את שעות הביקוש ומגביר את ניצול קווי ההולכה. אגירת אנרגיה מאפשרת להפחית את הצורך בהולכה, ובד בבד להגביר את אמינות הרשת.

ניהול רשת מבוזרת

להתקנת מערכות סולאריות על קרקעות דו־שימושיות ובאופן מבוזר יש כמה יתרונות:

- ייצור החשמל קרוב למקום הצריכה, וכך נחסכת תשתית ההולכה.

- צמצום הפגיעה בשטחים הפתוחים, שהם כה נחוצים בישראל.
- צמצום פגיעות הרשת, ובכך הגברת השרידות וביטחון אספקת החשמל.

אולם מבנה כזה של רשת מבוזרת יוצר קושי לשליטה ובקרה, קל וחומר למנהל הרשת בישראל, אשר מתוכנן לעבוד מול עשרות אחדות של יצרני חשמל. בקושי זה נתקלים בכל העולם ברשתות שבהן היקף האנרגיה המתחדשת הולך וגדל. הפתרון שאליו העולם צועד הוא ביזור ניהול הרשת, בין בחלוקה ל-microgrids ובין ביצירת אגרגטורים או תחנות כוח וירטואליות (virtual power plants).

תחנות כוח וירטואליות הן מודלים מופשטים שלפיהם גוף מסחרי מארגן מספר רב של צרכנים/יצרנים זעירים ומנהל את הייצור, הצריכה והאגירה בתחומם, ובכך מאפשר למנהל הרשת להתייחס למספר גופים גדולים, במקום להתמודד עם אלפים רבים של גופים זעירים.

microgrids הם מודל פיזי של רשת בסדר גודל של שכונה או יישוב קטן, המנהלות את תהליכי הייצור, הצריכה, והאגירה בתחומן. microgrids מאפשרים בדרך כלל גם פעילות עצמאית (islanding) ללא חיבור לרשת הארצית – תכונה המאפשרת פעילות עצמאית בעת חירום.

אמצעי אגירת אנרגיה

כאמור, כדי למתן את התנודתיות הגבוהה של האנרגיה הסולארית ולתאם בין הייצור לצריכה, נדרשת אגירה בכמויות גדולות. כמו הייצור הסולארי, אפשר להתקין גם את אמצעי האגירה באופן ריכוזי בחיבור לרשת ההולכה, או באופן מבוזר באזורי הייצור והצריכה.

ככלל אצבע, אם לצד כל מקור ייצור סולארי, קטן כגדול, יותקן מתקן אגירה באותו הספק ובקיבולת של ארבע שעות, יפתרו שני הקשיים הנעוצים בזמינות האנרגיה הסולארית בשעות החשיכה ובחורף, ובקיבולת רשת ההולכה. הקושי בקבלת טענה זו נעוץ בדעה הרווחת שטכנולוגיית אגירה בסוללות ליתיום עדיין אינה בשלה. אך כאמור, תחום זה מתפתח בימינו באופן מואץ, הודות לתעשיית הרכב. בעולם כבר קיימים פרויקטים רבים של שדות סולאריים משולבים עם אגירה (Henze, 2019), המספקים חשמל בעלות נמוכה יותר מאשר שימוש בגז (Weaver, 2019). בצד האגירה בצמוד למקורות הייצור, יש להביא בחשבון גם את האגירה בתוך מרכזי ערים, אשר גם בקווי ההולכה אליהם ייווצרו צווארי בקבוק. כאן כדאי להדגיש את מקומם של כלי הרכב החשמליים. במכונית חשמלית ממוצעת יש סוללה בעלת קיבולת 50 קוט"ש (International Energy Association, 2020), ו-20 אחוזים מקיבולת זו נמצאים בשימוש יום-יומי,³ כך שניתן לגייס את המכוניות החשמליות ולהקצות כ-25 אחוזים מקיבולת הסוללות שלהן לטובת אגירת אנרגיה בבתים ובשכונות (תמורת תשלום).

כמו כן, אגירה מבוזרת בבתים ובשכונות, בין באופן פרטני או כחלק ממערכות מיקרו רשתות, מאפשרת יכולת עבודה אוטונומית במנותק מהרשת הארצית. בכך יש תרומה לחוסן הלאומי ולביטחון האנרגטי.

דין

התלות שפיתחה האנושות באנרגיה המבוססת על דלקים פוסיליים מייצרת ביטחון אנרגטי המנוגד לביטחון הלאומי: ככל שנגביר את הביטחון האנרגטי נעלה את הסיכוי לנזקי אקלים ואת עוצמתם, ונפגע בביטחון הלאומי של ישראל. השפעות משבר האקלים יפגעו ביכולת לספק אנרגיה, מזון ומים, וגם ברמת החיים, שכן באזורנו יהיו תקופות בשנה שבהן לא תהיה אפשרות לצאת לאוויר הפתוח. עם זאת, אנרגיה המבוססת על מקורות מתחדשים תציב את הגברת הביטחון האנרגטי לצד הביטחון הלאומי. כדי להתמודד עם משבר האקלים יש להסב את משק האנרגיה בישראל (ובעולם) לשימוש במקורות מתחדשים ונקיים. כעת נותר לדון בשאלה אם המעבר לאנרגיה מתחדשת אכן מבטיח ביטחון אנרגטי. נבחן סוגיה זו על פי הקריטריונים הבאים:

- זמינות החשמל – האם ניתן לספק חשמל ברצף (24/7) לכלל צורכי המשק?
- זמינות בחירום – כיצד נמדדת שרידות ייצור החשמל במצב של מלחמה, מתקפת טרור או איום אחר?
- עלות – כיצד יושפע מחיר החשמל לצרכן?
- שמירה על הסביבה – איזו השפעה יש על זיהום אוויר, פליטת גזי חממה, שטחים פתוחים ועוד?
- התייעלות הצריכה – איזו השפעה יש על מודעות הצרכנים לכמות האנרגיה הנצרכת והשעות שבהן היא נצרכת? האם אפשר לשנות ולתכנן את הביקוש כך שיתאים לאופי הייצור?

שדות סולאריים בשילוב אגירה

היתרון הגדול של שדות סולאריים הוא העלות שלהם. בשילוב עם אגירה, השדות הסולאריים מספקים זמינות חשמל למשך יממה. ריבוי שדות סולאריים מקנה יתירות, ופיזורם על פני שטחים נרחבים מגביר את שרידות רשת החשמל בעת אירוע חירום. בהיבט הסביבתי הם אכן מצמצמים פליטות, אך השטח הנרחב שהם תופסים מצמצם את היקף השטחים הפתוחים והטבעיים במדינה.

זמינות	חירום	עלות	סביבה	התייעלות
✓	✓	✓		

גגות סולאריים בשילוב אגירה

בתים פרטיים עם גג סולארי ואמצעי אגירה יכולים להיות עצמאיים כמעט לגמרי מבחינה אנרגטית, להפחית עומס מהרשת ולספק חשמל גם בחירום. הפגיעה בסביבה היא מינימלית והתקנת מערכות אלו בבית מעידה על מודעות גבוהה יותר לצריכת חשמל, שבמקרים רבים משולבת עם מוצרים טכנולוגיים לניהול והתייעלות הצריכה (מונים חכמים, חיבור ל-microgrid, תעריף חשמל דינמי וכו').

זמינות	חירום	עלות	סביבה	התייעלות
✓	✓		✓	✓

אגירה במרכזים עירוניים

אגירת מסוג זה תגביר את זמינות האנרגיה גם במהלך היום ובמיוחד בחירום – כשיש הפסקות חשמל ונדרש לספק חשמל לצרכנים שתלויים בכך. כמו כן, אגירה במרכזיים עירוניים יכולה לפתור צווארי בקבוק של הולכת חשמל, על ידי הולכה בשעות שבהן הביקוש נמוך והזרמה מקומית בשעות שיא הביקוש. לדוגמה, מגרש חניה לכלי רכב חשמליים יצרוך הרבה מאוד חשמל בשעות שיא החניה, וחשמל זה יכול להגיע מאגירה מקומית.

זמינות	חירום	עלות	סביבה	התייעלות
✓	✓		✓	

תחנות כוח גזיות כגיבוי

גם במתאר שבו מגיעים ל-95 אחוזים של אנרגיה מתחדשת, יהיו שבועות בחורף שבהם הייצור ממקורות מתחדשים לא יספיק. בתקופות אלו יהיה צורך לייצר חשמל באמצעות דלקים פוסיליים, שהיתרון שלהם הוא זמינות ורציפות באספקת החשמל. אין לדלקים אלו יתרון בחירום, מאחר שתשתיות הולכת הגז והייצור בגז מרוכזות וחשופות לפגיעה ממוקדת. כמו כן אין להן יתרון במחיר, מכיוון שאנרגיה סולארית זולה יותר ומחיריה ימשיכו לרדת.

זמינות	חירום	עלות	סביבה	התייעלות
✓				

Microgrid

ביזור אחריות ניהול הרשת לקהילות, שכונות ומתחמים עירוניים מחזק את הביטחון האנרגטי בכמה היבטים. ראשית, הביזור מפחית עומס ואחריות מרמות הפיקוח

הארצית והאזורית ומאפשר לניהול המקומי לפעול באופן יעיל ומדויק יותר לאמצעי הייצור, האגירה והצריכה. העברת אחריות הניהול לרמה המקומית מאפשרת הגברת הזמינות הרשתית הכוללת בכך שכל microgrid שואף לעצמאות אנרגטית וניתן לניתוק ולבידוד מהרשת במקרה של תקלות. שנית, microgrid מאפשר ליצרנים ולצרכנים לסחור בחשמל ברמה המקומית, ובכך לחסוך בעלויות וגם להתייעל בהתאמת הביקוש וההיצע. לבסוף, השאיפה לעצמאות אנרגטית בשילוב עם החיסכון בעומס הניהולי, בעלויות ובהיקף הצריכה מאפשרים חיסכון גם ברשת ההולכה והיבט נוסף של הגנת הסביבה.

זמינות	חירום	עלות	סביבה	התייעלות
✓		✓	✓	✓

נושאים נוספים במעבר לאנרגיה מתחדשת

צמצום פליטות גזי חממה ומעבר משק האנרגיה למקורות מתחדשים הם תהליכים מורכבים הנוגעים כמעט בכל תחומי החיים. במאמר זה נסקרו רק החלקים העיקריים של תהליכים אלו, הקשורים לרשת החשמל. עם זאת יש לציין בקצרה כמה נושאים שהם חלק אינטגרלי ממעבר לאנרגיה מתחדשת, אך אינם קשורים לייצור חשמל: בנייה ירוקה, חשמול התעשייה ותחבורה ציבורית חשמלית.

הצורך בבנייה ירוקה ילך ויגדל עם עליית הטמפרטורה והגידול באוכלוסייה. כדי להימנע מגידול חד בביקוש לחשמל, על תקני הבנייה הירוקה לכלול הנחיות לבידוד תרמי שיאפשר ליעל את השימוש במזגנים. זאת ועוד, כדי לאפשר ייצור סולארי ואגירה בקרבת אזורי הצריכה, יש לכלול הכנות תכנוניות למערכות סולאריות עם אגירה בכל מבנה חדש.

נוסף על בנייה ירוקה, על הייצור התעשייתי לעבור מצריכה ישירה של דלקים לצריכה של חשמל לייצור חום. מפעלים רבים צורכים קיטור וחום וכיום הם מתוכננים לעבור הסבה לצריכת גז טבעי. הקפאה של תוכנית זו, תכנון מחדש של כיסוי אזורי תעשייה בלוחות סולאריים והסבה לשימוש בחשמל לייצור חום – כל אלו יאפשרו גם התייעלות בצריכה וגם צמצום נוסף בפליטות.

הנושא האחרון הוא תחבורה ציבורית חשמלית. הואיל וישראל סובלת מזה שנים מעומס רב בכבישים, נדרש תכנון של תחבורה ציבורית חשמלית. כלי תחבורה חשמליים מאפשרים שימוש יעיל יותר באנרגיה (פחות אנרגיה לכל ק"מ), ותחבורה ציבורית חשמלית תאפשר לצמצם את סך צריכת האנרגיה בתחום זה. שלושת הנושאים הללו יחדיו – בנייה ירוקה, חשמול התעשייה ותחבורה ציבורית חשמלית – ישיאו תרומה משמעותית לצמצום הפליטות ולשימור רמת החיים.

סיכום והמלצות למדיניות

בחינה ממוקדת של משבר האקלים מלמדת שמדיניות אנרגיה שאינה מתחשבת בפסולת האטמוספירית שהיא מייצרת היא הגורם העיקרי להתחממות הגלובלית. במאמר הודגם כיצד ההתחממות הצפויה בעשורים הקרובים תוביל את ישראל להתייכרות המחיה, לירידה ברמת החיים ולבעיות ביטחוניות שמקורן בפליטים ובמדינות שכנות עניות. הובאו טענות על כך שצמצום פליטות גזי חממה ומעבר לאנרגיה מתחדשת יאפשרו לחזק את הביטחון האנרגטי יחד עם הביטחון הלאומי, ושלישראל יש השפעה על המאמץ הגלובלי בהאטת ההתחממות. הודגם כיצד מעבר זה אפשרי ומביא לתועלות סביבתיות וכלכליות ונבחנה שמירת הביטחון האנרגטי. כדי להניע את המערכת בכיוון הרצוי, להלן המלצות עיקריות למדיניות:

- עיגון בחוק של היעדים לצמצום פליטות גזי חממה, בהתאם להנחיית האו"ם (UN Environment Programme, 2019): 50 אחוזים בשנת 2030, אפס פליטות ב-2050.
- יישום מס פחמן לפי קווי המתאר המומלצים על ידי האו"ם והבנק העולמי (Partnership for Market Readiness, 2017). מס פחמן הוא כלי לתמרוץ הכלכלה לעמידה ביעדי צמצום הפליטות, תוך הפניית הרווחים מהמס לצמצום פערים כלכליים (חלוקת דיווידנד פחמן) ולהאצת המעבר לאנרגיה מתחדשת (מימון השקעות ומחקר ופיתוח).
- בניית תוכנית פיתוח רב-שנתית למשק החשמל תוך שימוש בתהליך מוכר בעולם – Integrated Resource Planning – בהובלת רשות החשמל ובשילוב גורמים מהממשלה, מוסדות התכנון, המגזר העסקי וארגונים סביבתיים. על תוכנית זו לכלול:
 - המשך עידוד הייצור הסולארי והאגירה באזורי הצריכה, באמצעות קביעת הסדרים שיעודדו את המגזר הפרטי להתקין לוחות סולאריים וסוללות אגירה בבתי פרטיים ומשותפים.
 - הקמת "מרכזי חוסן" עירוניים מבוססי אגירה וייצור סולארי על מנת לספק יתירות אנרגטית לשגרה ולחירום, ולהקל צווארי בקבוק ברשת הולכת החשמל.
 - תכנון פיתוח רשת ההולכה להולכת אנרגיה מהפריפריה למרכז, תוך שימוש באגירת אנרגיה כדי למקסם שימוש בקווים קיימים ולצמצם הקמה של קווים חדשים.
 - הסדרה רגולטורית להקמת microgrids כדי לבזר את ניהול הרשת, לחזק את הביטחון האנרגטי המקומי ולאפשר הוזלת מחירים באמצעות מסחר מקומי ודינמי בחשמל.

הערות

- 1 ראו רשימת המדינות https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_carbon_dioxide_emissions
- 2 הטכנולוגיה שאליה נכון להתייחס בראייה עתידית של ייצור אנרגיה סולארית היא תאים פוטו-וולטאיים (PV). טכנולוגיות אחרות שנבחנו בארץ ובעולם (מראות מרכזות – concentrating solar power ושוקת פרבולית) אינן מתחרות בפשטות התפעול ובעלות של לוחות סולאריים.
- 3 רכב ממוצע נוסע 50 ק"מ ביום (17,500 ק"מ בשנה). בצריכה של 0.2 קוט"ש לק"מ, כלי רכב צורך 10 קוט"ש ביום. (מקור לנסועה: למ"ס, 2019).

מקורות

- המשרד להגנת הסביבה (2018). הפחתת פליטות גזי חממה בישראל – דו"ח מעקב אחר יישום התוכנית והיעדים הלאומיים להפחתת פליטות גזי חממה, עמ' 11. https://www.gov.il/BlobFolder/reports/reports_reducing_ghg_emissions_in_israel/he/climate_change_and_energy_efficiency_report_reducing_ghg_emissions_in_israel_data_from_2017.pdf
- המשרד להגנת הסביבה (2020). הערכת פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב הבנוי בישראל. https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/potential_for_solar_production_on_existing_structures_jan_2020
- יוסף, י', בהר"ד ע', אוזן ל', אוסטינסקי-צדקי א', כרמונה י', חלפון נ', פורשפן א', לוי י' וסתיני נ' (2020), 17 בינואר). שינוי האקלים בישראל – מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורות והמשקעים (דו"ח מחקר 2019-0000075-0804-4000, נובמבר 2019). השירות המטאורולוגי הישראלי. https://ims.gov.il/sites/default/files/ClimateChangeInIsraelReport_20191128_new.pdf
- למ"ס (2012). תחזיות אוכלוסייה לישראל לטווח ארוך: 2009–2059. אגף דמוגרפיה ומפקד, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה <https://www.cbs.gov.il/he/publications/DocLib/tec/tec27/tec27.pdf>
- למ"ס (2019). נסועה של כלי רכב (קילומטר) ' 2018. פרסום מס' 1772, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. https://www.cbs.gov.il/he/publications/DocLib/2019/1772/h_print.pdf
- מרכז השל לקיימות (2020). פרויקט NZO: תוכנית לאומית למעבר לאנרגיה מתחדשת Net Zero Emissions. יפורסם בדצמבר 2020 ב- www.nzo.org.il
- רשות החשמל (2020). הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030. https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030_final
- Carbon Dioxide (2020). Global Climate Change, NASA. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Climate Leadership Council (2019, September) The Four Pillars of Our Carbon Dividends <https://clcouncil.org/our-plan/>
- European Commission (2019). Annex to the Communication on the European Green Deal Roadmap – Key actions. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication-annex-roadmap_en.pdf
- Henze, V. (2019, July 31). Energy storage investments boom as battery costs halve in the next decade. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/>
- International Energy Association (2020). Global EV outlook 2020. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- Lazard (2020). Levelized Cost of Energy. <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2020/>

- Partnership for Market Readiness (2017). *Carbon Tax Guide: A Handbook for Policy Makers*. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/26300>
License: CC BY 3.0 IGO.
- UN Environment Programme (2019). Emissions Gap Report 2019. <https://www.unenvironment.org/interactive/emissions-gap-report/2019/>
- Weaver, J. (2019, September 10). Los Angeles says “Yes” to the cheapest solar plus storage in the USA. *PV Magazine*. <https://pv-magazine-usa.com/2019/09/10/los-angeles-commission-says-yes-to-cheapest-solar-plus-storage-in-the-usa/>