

# אנרגיה מתחדשת – המפתח לחוסן לאומי באנרגיה

## גדעון פרידמן

משבר הקורונה סיפק לנו הצצה אל עולם נקי מזיהום אוויר מתחבורה, כפי שהיה לפני כמאה שנים, וכפי שגם נראה בעתיד הלא־רחוק. משבר האקלים לעומת זאת לא צפוי להיפתר בטווח הזמן הקצר, ועל כן נדרשת התגייסות עולמית לצמצום טביעת הפחמן של האדם. ייצור אנרגיה באופן מתחדש הוא אחד משני פתרונות ברורים מבחינה טכנולוגית, הן לבעיית זיהום האוויר והן לפליטות גזי חממה. בשונה מהפתרון השני – אנרגיה גרעינית – אנרגיה מתחדשת היא פתרון מבוזר מאוד הטומן בחובו יתרונות משמעותיים לחוסן משק החשמל במצבי משבר.

ישראל זוכה ליהנות מאנרגיה מתחדשת בדמות אנרגיית השמש. זו האנרגיה המתחדשת הזולה ביותר כיום (אולי חוץ מאנרגיה הידרו־אלקטרית), והיא גם זמינה לכולם עד רמת הצרכן הפרטי. רשת החשמל בעתיד תהיה גמישה ותוכל לספק חשמל באופן מקומי, גם כאשר אמצעי הייצור או החלוקה המרכזיים ייפגעו. כך למשל, אדם שבביתו הותקנה מערכת סולארית עם אגירה יוכל לספק את צורכי החשמל הבסיסיים שלו גם במקרה של תקלה ברשת החשמל, בעזרת מערכת ניהול חשמל ביתית. ביישובים הכפריים שבהם יש ייצור סולארי מקומי רב, יוכלו התושבים ואפילו אזורי התעשייה להמשיך לפעול במתכונת מצומצמת לפחות. אפילו בערים הצפופות יהיו מרכזי ייצור חשמל, כגון על גבי מבני ציבור, חניונים ובתי מגורים, כך שניתן יהיה לספק צורכי חשמל מינימליים לתושבים באמצעות אגירה וניהול מקומי מושכל. לאפשרות זו השלכה מכרעת על יכולת ההתמודדות של ישראל עם מצבי חירום, הן כאלה הנובעים מאסונות טבע והן כתוצאה מפעולות איבה.

## מבוא

משבר הקורונה סיפק לנו הצצה אל עולם נקי מזיהום אוויר מתחבורה, כפי שהיה לפני כמאה שנים, וכפי שגם נראה בעתיד הלא־רחוק. משבר האקלים לעומת זאת לא צפוי להיפתר בטווח הזמן הקצר, ועל כן נדרשת התגייסות עולמית לצמצום טביעת הפחמן של האדם (IPCC, 2019). ייצור אנרגיה באופן מתחדש הוא אחד משני פתרונות ברורים מבחינה טכנולוגית, הן לבעיית זיהום האוויר והן לפליטות גזי חממה. בשונה מהפתרון השני – אנרגיה גרעינית – אנרגיה מתחדשת היא פתרון מבוזר מאוד הטומן בחובו יתרונות משמעותיים לחוסן משק החשמל במצבי משבר.

מאמר זה מסביר את הבעיה שבפניה ניצב העולם כיום בהקשר של זיהום האוויר ופליטות פחמן דו־חמצני, ומתאר את הפתרון המרכזי המוצע בדמות אנרגיה מתחדשת בהקשר הישראלי ואת אתגר אגירת האנרגיה שנדרש לצורך מימושו. בחלק המרכזי מוצג הקשר למושג ביטחון אנרגטי ויתרונותיו המרכזיים: ייצור אנרגיה מקומי, ביזור ושרידות. במקביל, האנרגיה המתחדשת גוררת צורך ממשי ביציבות, שניתן להשיגה בעזרת חיבור עם מדינות זרות. במקום לראות בכך חיסרון, ניתן לראות כאן הזדמנות לשינוי גיאופוליטי יסודי.

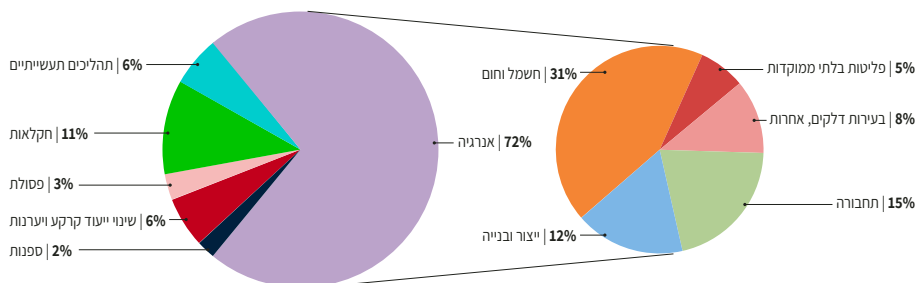
## רקע

קשה לדמיין את מרכזי הערים נקיים מזיהום אוויר. שכבת אוויר אפורה־צהובה מכסה את הערים הגדולות שבהן גרים מרבית תושבי ישראל. פעמים אחדות בכל שנה אנו זוכים לראות אוויר צלול יותר, בזכות תנאי מזג אוויר ייחודיים המסלקים את האוויר המזוהם במהירות. משבר הקורונה, שהשבית את התחבורה בארץ במשך ימים רצופים רבים, אפשר לנו לחוות את האוויר הנקי בלי תלות במזג האוויר. אני מעריך שבזכות מהפכת החשמול שתעבור התחבורה תוך 10–15 שנים, נזכה לנשום בערים אוויר נקי הרבה יותר. אולם בעיה מרכזית נוספת היא פליטת הפחמן הדו־חמצני (פד"ח), שהוא שקוף ונטול ריח לחלוטין ואינו יכולים לחוש בו, ובעיה זו אינה עומדת להיפתר בקרוב. הפחמן הדו־חמצני (להלן: הפד"ח) הוא גורם חשוב בהתחממות הגלובלית המורגשת בשנים האחרונות. כדי לעצור אותה עלינו לצמצם את טביעת הפחמן של האדם באופן משמעותי. התרשים להלן מציג את פליטות הפד"ח העולמיות לפי מגזרים.

את פליטות הפחמן ניתן לצמצם בשתי דרכים – על ידי צמצום שריפת הדלקים או על ידי לכידת הפד"ח הנפלט בעת שריפת הדלקים. האפשרות השנייה נמצאת כיום ברמת בשלות טכנולוגית ראשונית ביותר, ולכן עלינו לצמצם את שריפת הדלקים. משק החשמל תורם אחוזים ניכרים לפליטות הפד"ח, כפי שניתן לראות בתרשים. אם ברצוננו לשרוף פחות דלק, עלינו לייצר חשמל בדרכים אחרות. אחת מהן היא

ביקוע גרעיני, שאינו פולט פחמן כתוצר לוואי. מאמר זה לא ידון באפשרות זו, שיישומה בישראל כרוך בקשיים רבים.<sup>1</sup>

מגוון אחר של פתרונות לייצור חשמל ללא פליטת פד"ח מכונה אנרגיות מתחדשות. הכוונה לייצור חשמל (או אנרגיה בתצורה אחרת כגון חום או אנרגיה מכנית) ממקור שאינו נדלה ואינו מוסיף פד"ח לאטמוספירה.



**פליטות גזי חממה עולמיות אנתרופוגניות**

(הנתונים מתוך Climate Analysis Indicators Tool – World Resources Institute בעיבוד c2es.org)

## אנרגיית השמש

לא נסקור כאן את מגוון המקורות המתחדשים. ישראל זוכה ליהנות מאנרגיה מתחדשת בדמות אנרגיית השמש. אפשר לייצר חשמל מהשמש בהמרה ישירה (פוטו-וולטאית) – PV) או בעקיפין דרך חום (תרמו-סולארית). ההמרה הפוטו-וולטאית היא האנרגיה המתחדשת הזולה ביותר כיום (אולי חוץ מאנרגיה הידרו-אלקטרית). נכון למאי 2020 הוכרזו בכל רחבי העולם פרויקטים לייצור חשמל סולארי פוטו-וולטאי בעלות של 5.6–4.7 אגורות לקו"ט"ש (Weaver, 2020). גם בישראל תוקם תחנת כוח רביעית באשלים בעלות של פחות מ-9 אגורות לקו"ט"ש (משרד האוצר, 2019). המכרז האחרון לייצור חשמל עם אגירה, שתוצאותיו פורסמו ביולי 2020, משקף גם הוא להערכתי מחיר חשמל גבוה מעט מ-10 אגורות לקו"ט"ש.<sup>2</sup> לשם השוואה, מחיר ייצור החשמל מגז טבעי בישראל במערכות הייצור היעילות ביותר נע כיום סביב 20 אגורות לקו"ט"ש. כל הפרויקטים הללו לייצור חשמל פוטו-וולטאי ברחבי העולם הם פרויקטים גדולים מאוד בהיקף של מאות מגוואט כל אחד. עם זאת, גם בשדות העצומים האלה, יחידת הייצור הבסיסית היא לוח הקולט קרני שמש בגודל של כשני מטרים רבועים, המייצר כיום קצת פחות מחצי קילוואט חשמל כאשר הקרינה המגיעה אליו היא בהספק של קילוואט אחד למטר רבוע (זה בערך גם הספק קרינת השמש בארץ). השדות הגדולים פשוט מכילים אלפים עד מאות אלפים של יחידות כאלה. זהו מאפיין ייחודי לאנרגיה הפוטו-וולטאית. כך למשל, תחנת ייצור חשמל באמצעות גז טבעי

בהיקף של מאות מגוואט עשויה להיות בנויה מיחידה אחת שאינה מודולרית. הדור החדש של האנרגיה הגרעינית, שטרם הותקן בצורה מסחרית, יורכב מיחידות "קטנות" של כ-50 מגוואט. יחידת הבסיס להפקת אנרגיית הרוח, שהיא האנרגיה המתחדשת (שאינה הידרו-אלקטרית) הנפוצה בעולם, עשויה מטורבינה עצומה בגובה של יותר מ-100 מטרים, המייצרת שלושה עד חמישה מגוואט – כלומר פי עשרת אלפים מיחידת הבסיס הסולארית.<sup>3</sup>

כדאי לשים לב כי במרכז האחרון של רשות החשמל לייצור חשמל סולארי עם אגירה, גודל המתקנים היה קטן יחסית, אפילו כדי שניים עד חמישה מגוואט, ובכל זאת התקבלו מחירים נמוכים מאוד.

### ביטחון אנרגטי

כימות רמת הביטחון האנרגטי של חלופות שונות למבנה משק חשמל הוא נושא סבוך, המושפע מאוד מהנחות היסוד, מההסתברויות לתרחישים שונים ואף מהערכה סובייקטיבית של נזקים. מאמר זה אינו מתיימר לנתח את הנושא באופן אקדמי מעמיק, ואסתפק לכן באפיון היתרונות המובהקים של האנרגיה הסולארית על פני המצב הקיים, מבלי לכמת אותם.

ברמה הפשוטה ביותר, ביטחון אנרגטי במשק החשמל מודד את היכולת לספק חשמל בכל רגע, במחיר נגיש (<sup>4</sup>affordable) לכולם.<sup>5</sup> יש להבחין בין ביטחון לטווח קצר לבין ביטחון לטווח ארוך.

בטווח הארוך אפשר להתייחס למשל להבדל בין מקור אנרגיה מקומי למקור זר, שעליו ניתן לסמוך פחות, לכן רצוי יותר להסתמך על מקורות מקומיים, ולמצער להסתמך על מספר רב של ספקים זרים שונים. היבט אחר יכול להיות סוג הדלק – גיוון בסוגי הדלק מוסיף לביטחון, שכן אם אחד הסוגים פחות זמין, ניתן להשתמש באחר. מובן שיש להתייחס גם לנושא הקיימות, כלומר לזמינות מקורות האנרגיה לאורך זמן. האנרגיה הסולארית היא מקור אנרגיה נוסף ובכך משפרת את הגיוון האנרגטי, אולם העובדה שמקורות מתחדשים אחרים אינם זמינים בארץ בכמות גדולה מצמצמת את היתרון.<sup>6</sup> בשני ההיבטים האחרים, לאנרגיה הסולארית יתרון משמעותי לעומת אנרגיה המבוססת על דלקים מאובנים (פוסיליים). השמש זורחת גם בישראל, והיא לא תפסיק לזרוח בזמן הקרוב. לעומת זאת, דלקים מאובנים עלולים לאזול בעוד מספר שנים, וחלקם מגיעים ממקורות זרים. אתייחס לנושא הטווח הארוך גם בהמשך, בהקשר של אספקת חשמל סולארי ממקורות זרים.

בטווח הקצר, לאנרגיה הסולארית חיסרון בולט מול תחנות הכוח הקונוונציונליות – היא אינה בשליטתנו. לא נוכל לדרוש מהשמש לזרוח בחצות הלילה, גם אם נרצה מאוד, בעוד שנוכל להפעיל תחנת כוח גזית בכל עת שנרצה. כמו כן איננו שולטים במזג

האוויר ובכמות העננים, כך שהייצור הסולארי מחר עשוי להיות נמוך ממה שהיינו רוצים. כך, ניהול משק חשמל שבו עיקר הייצור ייעשה מן השמש כדי לא לפלוט פד"ח, מציב אתגרים לא פשוטים.

עם זאת, ניתן לחזות את הייצור הסולארי ברמת דיוק התלויה בטווח התחזית, והטעות נעה בין אחוזים ספורים לכ-10 אחוזים. אשר על כן, לכל הפחות ניתן להיערך לייצור חשמל באמצעים אחרים הזמינים תמיד, כאשר החשמל הסולארי אינו זמין. זאת ועוד, התקדמות באוטומציה של ניהול משק החשמל ובמהירות התגובה של אמצעי הייצור החליפיים תאפשר להגיב בצורה טובה יותר גם לשינויים בלתי צפויים. על כן, חיסרון זה של האנרגיה המתחדשת אינו משפיע באופן מהותי על הביטחון האנרגטי. היבט מרכזי אחר בהקשר של הביטחון האנרגטי בטווח הקצר הוא נושא השרידות של מערכת החשמל (survivability). הכוונה היא ליכולת להמשיך לספק חשמל גם במצבי חירום של תקלה מכוונת או מקרית, שמקורה באיתני הטבע או מעשה ידי אדם. בהיבט זה יש יתרונות משמעותיים לאנרגיה הסולארית, ואתייחס לכך ביתר פירוט בהמשך.

## אגירת חשמל

כאמור, השמש אינה זמינה תמיד. לפיכך, כדי לספק חשמל באופן רציף יש צורך באגירת חשמל בשעות שיש שמש, ואספקתו מהאגירה בשעות שהשמש אינה זורחת. אגירת חשמל בכמות גדולה הייתה תמיד אתגר, אולם שינוי יסודי בתחום זה חל בזכות התפתחויות טכנולוגיות, שנבעו מהצורך הגובר והולך באגירת חשמל במכשור האלקטרוני וקיבלו דחיפה עצומה מהצורך באגירת חשמל לצורכי תחבורה חשמלית. בשנים הקרובות יוקמו ברחבי העולם מתקני אגירה בסוללות ליתיום-יון (Li-Ion), הקרובים בגודלם למתקני האגירה השאובה שמתוכננים לפעול בארץ. כך למשל, ב-Moss Landing שבקליפורניה יקום עד סוף שנת 2020 מתקן בהספק של 300 מגוואט ובקיבולת של 1,200 מגוואט/שעה. מתקנים אלה נבנים תוך פחות משנה והם בעלי טביעת רגל קטנה בשטח. למשל, מתקן כאמור יתפוס שטח של כ-15 דונם (Tesla, 2019). מחירי האגירה בסוללות ירדו בעשור האחרון בשיעור של יותר מ-20 אחוזים בשנה – 85 אחוזים במצטבר, והגיעו לכ-135 דולר לקו"ט"ש מותקן (העלות ליחידת אנרגיה שבסוללה).<sup>7</sup> על פי תחזית שמרנית, המשך ירידת מחירים בשיעור של חמישה אחוזים בשנה יביא לירידת מחירים נוספת בעשור הקרוב, בשיעור של יותר מ-40 אחוזים. לכן סביר להניח שנראה מתקנים רבים מאוד, בגדלים האלה לפחות, כבר בעתיד הקרוב.

ירידות מחירים כאלה מאפיינות גם את הלוחות הפוטו-וולטאים, והם שהביאו למחירים הנמוכים של האנרגיה הסולארית, שאף עשויים להמשיך ולרדת בקצב מהיר.

אך הדמיון אינו מסתיים בכך. גם בתחום הסוללות יחידת הבסיס קטנה מאוד – בגודל של סוללה AA לשלט רחוק. סוללות הענק בפרויקטים שצוינו לעיל מורכבות גם הן מאלפי יחידות בסיס קטנות יותר. בניגוד ללוחות, סוללות קטנות עדיין יקרות במידה משמעותית מהתקני אגירה גדולים, מכיוון שמארז הסוללה וניהול החשמל שלה מהווים מרכיב חשוב בעלות.

רכישת סוללה ביתית עולה כיום 600–1,000 דולר לקוּוט"ש מותקן. כאמור, העלות הנוספת לעלות יחידת הבסיס כפי שצוין לעיל קשורה במארז ובעיקר באלקטרוניקה של ניהול החשמל. אולם כאשר הביקוש ליחידות אלה יגיע למיליונים ולעשרות מיליונים, תיעוש מהיר יביא לצניחה במחירים. זו בדיוק ההתמחות של העולם המודרני – אלקטרוניקה ומחשוב – כך נראה גם סוללות לא גדולות במחירים נמוכים, ולכן ירידת המחירים בסגמנט האגירה בהיקף הקטן תהיה מהירה יותר מאשר בתחום הלוחות הסולאריים.

## נקודת מפנה

מבחינת משק החשמל הארצי יש נקודת מפנה חשובה הקשורה בתמחור האנרגיה הסולארית אל מול הדלקים הקונוונציונליים. כאשר עלות ייצור החשמל הסולארי נמוכה מהעלויות המשתנות (בעיקר דלקים) של הייצור בתחנות גזיות, מתכנני המשק יעדיפו לספק חשמל סולארי כאשר הוא זמין, גם אם יהיה צורך להקים תחנה גזית כגיבוי. כפועל יוצא התחנות הגזיות יפעלו פחות שעות בשנה. למעשה אנחנו כבר נמצאים בנקודת מפנה זו, משום שבחלק ממכרזי ייצור החשמל מהשמש, מחיר החשמל שהתקבל היה נמוך מהעלות המשתנה של הייצור בגז. כל זאת אף מבלי להביא בחשבון את העלויות החיצוניות הכרוכות בשריפת הדלקים – עלויות זיהום האוויר ופליטת הפד"ח. רק זיהום האוויר מוסיף כשתי אגורות לקוּוט"ש על מחיר ייצור החשמל מהיחידות הגזיות היעילות ביותר.<sup>8</sup>

מצב זה יוצר יתירות באספקת אנרגיה (redundancy), לפחות בשעות שהשמש זמינה, מה שמחזק בצורה ניכרת את הביטחון האנרגטי. למשל, במקרה של תקלה בהפעלה של תחנות הכוח הגזיות, ניתן יהיה לספק חשמל מהשמש.

## ייצור חשמל במקום הצריכה

מודולריות הייצור הסולארי, המתבטאת גם במחיר של לוח אחד,<sup>9</sup> בצד המודולריות של אגירת החשמל בסוללות, מאפשרת גם לצרכן חשמל קטן – אפילו אדם יחיד, לייצר חשמל על גג ביתו ולצרוך אותו. כאן טמון היתרון העצום של ייצור חשמל מהשמש במובן של הביטחון האנרגטי. כך, אדם שבביתו הותקנה מערכת סולארית עם אגירה יוכל לספק את צורכי החשמל הבסיסיים שלו גם אם רשת החשמל קרסה, בעזרת

מערכת ניהול חשמל ביתית. הסוללות יאפשרו למערכת לספק חשמל לפי דרישה, גם בשעות הערב והלילה. כיוון שהשמש זורחת מדי יום, הסוללות יתמלאו בשעות שהשמש זורחת, ואספקת החשמל באופן זה תוכל להימשך לאורך זמן. מערכת ניהול החשמל המקומית תצטרך להיות מתוחכמת מספיק כדי לספק חשמל במשורה בימים שבהם יש פחות שמש, או אם מערכת הייצור אינה מסוגלת לספק את מלוא הצרכים, אולם ניתן יהיה לקיים רמת חיים טובה. מקרר ביתי, טלוויזיה, טלפון סלולרי, מחשב ותאורה אינם צרכני חשמל גדולים, וניתן יהיה להפעילם בקלות במצב כזה.

על גג של בית פרטי ניתן בדרך כלל להקים מערכת סולארית בהספק של 10-20 קילוואט. מערכת כזו מספקת ביום קיץ 70-140 קו"ש. כמות חשמל כזו מספקת בקלות את כל צורכי הבית, כולל אפילו מיזוג אוויר, אולם יש קושי לאגור את כל הכמות הזו. סביר יותר שבבית כזה תותקן מערכת אגירה של 10-20 קו"ש, אך בעזרת מערכת ניהול חכמה ניתן יהיה למזג את הבית בשעות שבהן יש שמש, שהן החמות ביותר. הבית לא יתחמם, ובשעות אחרות הסוללה תוכל לספק את כל צורכי הבית האחרים, אולי אפילו בצד מיזוג אוויר חלקי. אם הייצור הסולארי נחלש מאוד החל מהשעה חמש לפנות ערב ומתחדש בשעה תשע בבוקר, הרי ניתן להפעיל מזגן קטן של 1 קילוואט באזור מוגבל בבית במשך 16 שעות, ועדיין להשאיר די חשמל בסוללה למקרר ולתאורה.

גם ביום חורף שמשי יש די אנרגיה. כמות החשמל הזמינה לבית כזה תהיה 35-70 קו"ש, וגם במקרה זה לא יהיה קושי לחמם את הבית במערכת מבוססת מזגן או משאבת חום בשעות השמש. שעות השמש מועטות יותר בחורף, אך כמו בקיץ, ניתן יהיה לחמם אזור מצומצם באמצעות מזגן קטן גם מעבר לשעות השמש.

גם בימים מעוננים ניתן לייצר לא מעט חשמל. נדירים הימים שבהם יהיה ייצור של פחות מ-10 קו"ש. כאן חייבת להיכנס לפעולה מערכת הניהול המקומית, שתדע להגביל את צריכת החשמל בימים כאלה למינימום ההכרחי. ניתן בכמות חשמל כזו להפעיל מקרר, תאורה ותקשורת ללא קושי מיוחד. ניתן להפעיל מכונת כביסה ללא חימום של המים, כי חימוםם צורך הרבה חשמל. פתרון למחסור זה באנרגיה אפשרי, אם כי עלותו גבוהה יחסית לשימוש, אם משתמשים בו רק בעיתות חירום. למשל, סוללות אלומיניום-אוויר של חברת פינרג' הן קומפקטיות ויכולות לאגור אנרגיה במשך שנים. כאשר יש צורך ניתן להפיק מסוללה לא גדולה (כמו Powerwall של טסלה) גם 50 קו"ש, שיספיקו לחימום מים במשך שלושה עד חמישה ימים. את האלומיניום והתמיסה, בתצורה של מודולים קטנים נשלפים, למשל, ניתן להחליף בקלות במלאי חדש. אפשרות אחרת היא להיעזר בסוללות כלי הרכב החשמליים, שיהיו נפוצים יותר ויותר (ראו בהמשך). בהנחה שהמשבר הוא מקומי, לא תהיה בעיה להביא את האנרגיה

מהמכונות שייטענו במקומות רחוקים. גם אם הדבר לא יתאפשר, ניתן יהיה לקבל חשמל עבור שימוש צנוע במשך שלושה עד חמישה ימים.

הנה כי כן, בבתים פרטיים שבהם יש ייצור סולארי מקומי רב, יוכלו התושבים להמשיך לפעול במתכונת מצומצמת לפחות. בערים הצפופות יהיו מרכזי ייצור חשמל על גבי מבני ציבור, חניונים ועל פני המבנים עצמם, כך שניתן יהיה באמצעות אגירה וניהול מקומי מושכל לספק צורכי חשמל מינימליים לתושבים. באמצעות תכנון נכון ניתן יהיה במרכזי חוסן כאלה לתת שירותים ברמה שתאפשר יותר מטענית טלפונים – למשל לספק תאורה ולפחות מים וקירור מזון. ניצנים ראשונים לכך נראו בפלורידה, שם הותקנו ביותר ממאה בתי ספר מערכות פוטו־וולטאיות עם אגירה, כדי שיוכלו לשמש מרכזי חוסן אנרגטי. בזמן הוריקן אירמה בשנת 2017 שימשו כ־50 מהם מרכזי חוסן עם אספקת חשמל מקומית.<sup>10</sup> גם בישראל מתכנן משרד האנרגיה לעודד הקמה של מרכזי חוסן כאלה בזמן הקרוב.

עם הזמן, רשת החשמל המקומית – רשת החלוקה – תהפוך יותר ויותר חכמה. כך ניתן לדמיין שבעתיד, גם אם תהיה קריסה של הרשת הארצית, באזורים (גם צפופים) שבהם יש ייצור סולארי מקומי משמעותי מגגות מבני ציבור ומבנים אחרים, מקירוי של חניונים או אזורים אחרים ואולי גם מקירות הבתים, אפשר יהיה לספק את צורכיהם הבסיסיים של תושבי האזור.

מודלים שנבדקו במשרד האנרגיה לשנת 2050, הכוללים שימוש באנרגיה מתחדשת באחוז גבוה – 80 אחוזים מסך צריכת החשמל – מראים כי יש צורך בכמויות אגירה גדולות מאוד כדי לאפשר זאת. ניתן להבין זאת באופן אינטואיטיבי כך: כיוון שהשמש זורחת רק בחלק משעות היום, במצב שרוב האנרגיה המסופקת היא סולארית יש צורך לאגור אנרגיה בכמות שתספיק ליתר השעות באותו יום. כלומר אגירת האנרגיה צריכה להיות בסדר גודל של כרבע עד מחצית מצריכת החשמל היומית. כיוון שצריך גם לחלק את האנרגיה הזו לצרכנים, הגיוני למקם את מערכות האגירה בצמוד למערכות הפוטו־וולטאיות, כי משם כבר יש מערכת הולכה של החשמל לצרכנים. בין היתר, מובן שכדאי למקם את מערכות האגירה באתרים שבהם המערכות הפוטו־וולטאיות סמוכות לצרכנים. לפיכך, בתכנון משק החשמל נדרש כי בצמוד למערכות הייצור הסולאריות תהיה מערכת אגירה רצינית. מכאן קצרה מאוד הדרך לתכנון כל משק החשמל בצורה זו, כאשר הייצור המקומי בסיוע אגירה יוכל לספק את הצריכה המקומית לפחות באופן חלקי בשגרה, ולכן גם בשעת חירום, אם הרשת הארצית תקרוס.

זה הזמן לשוב למהפכת התחבורה החשמלית. הספק של סוללה ברכב חשמלי עממי הוא כיום 40–60 קו"ט"ש, וצפוי לגדול בשנים הקרובות עד 100 קו"ט"ש. אם נבחן את סך האגירה שיציע צי המכונות העתידי נקבל, בהנחה צנועה שיהיו שלושה מיליון כלי רכב, אגירה של 300 ג'יגה־ואט/שעה – כמות העולה על הנדרש על פי המודל

של משק החשמל ב-2050. אפשר גם לבחון חניון בינוני ובו 100 מכוניות. חניון כזה יכול לספק חשמל בהספק של 10 מגוואט לשכונה שסביבו במשך שעה, או פחות מזה במשך מספר שעות. זהו הספק של תחנת כוח קטנה, שיכול להספיק לאלף יחידות דיור! כלומר בניהול נכון של הפריקה והטעינה של כלי הרכב החשמליים, ניתן יהיה להשתמש בהם לאגירת חשמל ולאספקתו גם בחירום.

## שרידות

אפשרות אחרת יכולה להיות, במקרה של בעיות ברשת החשמל, העברת חשמל באמצעות "משאיות חשמל". רעיון זה הועלה לאחרונה כדי להתגבר על עיכובים בהקמה של רשת חשמל לצורך חיבור לשדה סולארי. משאית עם מכולה סטנדרטית באורך 40 רגל יכולה לשאת חשמל בהספק של כארבעה מגוואט/שעה. כאמור זו כמות מכובדת, שיכולה לספק חשמל ל-100 משפחות במשך יממה לפחות. פתרון זה זמין יותר ונקי יותר מאשר הטורבינות הניידות הקיימות כיום. הנה כי כן, אנרגיה סולארית המיוצרת במקום הצריכה, בשילוב עם אגירה, מספקת ביטחון אנרגטי ברמה גבוהה בהרבה מאשר משק החשמל הנוכחי.

גם במובנים של שרידות, לייצור המבוזר יתרונות חשובים. במשק האנרגיה יש כיום מספר נקודות רגישות החשופות לסיכון:

- בארות הגז
- אסדות הגז
- צנרת הגז הראשית
- תחנות הכוח הגדולות
- תחנות מיתוג גדולות
- יבוא דלקים

פגיעה בחלקן כנראה לא תשתק את משק החשמל, אולם פגיעה בכמה מהן עלולה לגרום לו פגיעה אנושה.

אציין כי בשנים האחרונות נחשפה פגיעותן של חלק מהמערכות שלעיל לעוסקים בתחום, אם כי לא עד כדי פגיעה באספקה. למשל, בעת עימותים עם חמאס קיים חשש לפגיעה ארוכת טווח באסדות הגז. בחורפים האחרונים, בעת מזג אוויר סוער נחסם יבוא הגז מ"גז בישול) בנמלים, ונוצר מחסור אל מול צריכה מקומית מוגברת. לעומת זאת, ייצור סולארי מבוזר בעשרות אלפי אתרים (ואפילו מאות אלפים, אם נביא בחשבון בתים פרטיים) אינו פגיע ברמה הארצית. אפילו השדות הסולאריים הגדולים ישרדו ככל הנראה גם אם תהיה פגיעה חלקית בלוחות, מכיוון שהם בנויים

מאלפי יחידות בסיס ויוכלו לתפקד באופן חלקי (אם כי ייתכן שצריך יהיה לבצע פעולות תחזוקה).

לאנרגיה מתחדשת ובפרט לחשמל אגור בסוללות יש גם יתרון משמעותי על פני האמצעים הקונוונציונליים בתרחישים של עלטה מוחלטת, משום שבעזרתם ניתן להשיב לפעולה את משק החשמל (black start).

## אי אנרגטי

ישראל היא כיום אי אנרגטי במשק החשמל, שאינו מחובר לאף מדינה אחרת. דבר זה מקשה על הניהול השוטף שלו, משום שנדרש לאזן את הביקוש וההיצע בכל רגע. לא ניתן להעביר עודפים או להשלים חוסרים ממקורות חיצוניים. אולם יש לכך גם היבט של הפחתה בביטחון האנרגטי, משום שלא ניתן לגבות תקלה במשק המקומי באמצעות מקור חיצוני מרוחק, שייתכן כי לא נחשף לתקלה. כך למשל, במקרה של רעידת אדמה שבה נפגעו אמצעי ייצור באזור אחד, ניתן לפצות על כך על ידי הולכת חשמל ממקומות מרוחקים, למשל ממדינות אחרות, אם קיים אליהם חיבור.

בעולם של חדירת אנרגיה מתחדשת באחוזים גבוהים יש לקשר החיצוני חשיבות מוגברת. האיחוד האירופי קבע יעד של 10 אחוזי חיבור למדינות שכנות עד שנת 2020, ו-15 אחוזים עד שנת 2030.<sup>11</sup> כיום, מדינות שבהן שיעור גבוה של אנרגיה מתחדשת בלתי יציבה מסתמכות על חיבורים הדוקים מאוד עם מדינות שבהן יש מקורות אנרגיה יציבים וזמינים תמיד. למשל דנמרק, שבה כ-50 אחוזים מהחשמל מיוצרים מהרוח, מסתמכת על חיבורים עם נורווגיה, שוודיה וגרמניה כדי לחפות על ימים או שעות שבהם אין רוח.<sup>12</sup> בישראל, בגלל חוסר היציבות של הייצור הסולארי המקומי, יש יתרון חשוב למקורות חשמל מרוחקים. למשל כאשר הארץ מעוננת, ייתכן שבמקום מרוחק יש פחות עננים ולכן ניתן לפצות על החוסר בחשמל סולארי ממקור חיצוני. שנית, ישראל היא מדינה קטנה וצפופה והאנרגיה הסולארית היא צרכנית שטח גדולה מאוד. אחד האתגרים המרכזיים במימוש חזון האנרגיה המתחדשת הוא מציאת השטחים לקליטת האנרגיה הסולארית.

לפיכך, שיתוף פעולה עם מדינה שכנה יכול לפתור כמה בעיות בעת ובעונה אחת. בימים אלה בוחנים במשרד האנרגיה את האפשרות לחיבור קו חשמל לאירופה דרך קפריסין. קו כזה יכול לתת מענה הן לבעיות איזון יומיות של צריכה וביקוש והן למצוקה בשעת חירום. חיבור עם קפריסין בלבד הוא חלש. זו מדינה קטנה הן בשטחה והן במספר תושביה, שהיא עצמה אי אנרגטי, ולכן לא ניתן יהיה להגדיל את החיבור איתה כנדרש, למשל לפי דרישות האיחוד האירופי לעיל. אי לכך נדרש חיבור עם היבשת עצמה, אם כי חיבור בין נקודה אחת בישראל לנקודה אחת ביוון אינו מספיק ואינו דומה לחיבורים בין מדינות אירופה, המחוברות בנקודות רבות וכמעט

תמיד למספר מדינות שכנות. אף שטרם נעשתה עבודה רצינית בעניין, ניתן להעריך את עלויות החיבור ליוון בסכום של כשלושה מיליארד אירו ל-1,000 מגוואט. בהתחשב בכך שבשנת 2030 יידרש לישראל חיבור של 4,000 מגוואט לפחות, לפי הנחיות האיחוד האירופי,<sup>13</sup> הרי מדובר בהוצאה אדירה ובלתי סבירה של יותר מחמישה מיליארד אירו. לאור זאת נותרה האפשרות השנייה – שיתוף פעולה עם מדינות שכנות כגון ירדן. נראה שחיבור כזה ישים במידה רבה יותר ויכול אף לתת מענה לנושא המחסור בשטח. ייצור חשמל סולארי במדבר הירדני יכול לספק כמויות חשמל גדולות לישראל בכלל, ולתושבי יהודה ושומרון בפרט. חיבור החשמל הנדרש לכך גם יאפשר את האיזון בין הצריכה לביקוש באופן טוב יותר לטובת שני הצדדים, וכן את המענה לצרכים בשעת חירום. ירדן גדולה מקפריסין פי עשרה, הן בשטחה והן במספר תושביה, לפיכך חיבור אליה יכול להיות הרבה יותר משמעותי. מבחינת עלויות, חיבור לירדן – רצוי בשתי נקודות לפחות – הוא חיבור יבשתי באורך של עשרות עד מאות אחדות של קילומטרים, לפיכך עלותו דומה לעלויות הפיתוח במשק החשמל הישראלי עצמו, וניתן להצדיק את ההשקעה כחלק מפיתוח האנרגיה המתחדשת בישראל.

אומנם ניתן לטעון כי הדבר ייצור תלות במקור אנרגיה זר, ובכך יגביר את הסיכונים ויפחית את הביטחון האנרגטי, אולם לדעתי אפשר לפתור את הקושי הזה על ידי הסכם משולב של אספקת מים מותפלים לירדן. כיוון שלצורך ההתפלה נדרש חשמל, הרי ניתן להתנות את אספקת המים לירדן באספקת החשמל ממנה. הדבר יוצר תלות הדדית שקשה לנתק אותה. נוסף על כך, לשיתוף פעולה כזה יתרונות כלכליים גיאופוליטיים ברורים, שכוללים השפעה עקיפה נוספת על הביטחון האנרגטי, תוך צמצום הסיכון לחיכוך אזורי.

התחממות היחסים עם מדינות המפרץ (והיתכנות לכך גם עם ערב הסעודית) מרחיבה מאוד את מגוון החיבורים האפשרי, כך שחיבור לשכנים ייראה דומה יותר לחיבורים בין מדינות אירופה, ולא קו יחיד למרחקים. זאת ועוד, יחסים חמים עם שכנותיה של ישראל מדורס-מזרח יאפשרו לה לשמש בעתיד גשר ביניהן לבין אירופה, בהתאם לחזון האירופי של ייצור סולארי מתחדש בארצות שטופות שמש, המרתו למימן והעברה של זה בצנרת לאירופה. אם חזון זה יתגשם, נוכל גם אנחנו ליהנות מהמימן שזורם בצינור בשגרה ובשעת חירום. אף שחזון זה נראה רחוק, הרי העברת אנרגיה מהמזרח התיכון לאירופה מתרחשת גם היום, וסביר שתתרחש גם בעידן הסולארי בצורה כזו או אחרת. ישראל נמצאת במקום טוב בדרך ותוכל, אם תנקוט אסטרטגיה נכונה מבעוד מועד, ליהנות ממצאות זו.

ניתן אם כן לומר כי עולם האנרגיות המתחדשות פותח פתח חדש לשיתוף פעולה אזורי, לתועלת ולביטחון של כולם.

## סיכום

מעבר למשק חשמל שבו שיעור גבוה של אנרגיה מתחדשת יגדיל באופן ניכר את החוסן הלאומי באנרגיה:

1. הפחתת התלות במקורות אנרגיה זרים, ומעבר למקורות אנרגיה מקומיים.
2. תוספת מקור אנרגיה אמין למגוון המקורות המסורתיים.<sup>14</sup>
3. ביזור הייצור וצימודו לצריכה יכול לאפשר חוסן מקומי גם כאשר מערכות מרכזיות נפגעות.
4. אגירת אנרגיה מקומית כהשלמה לייצור הסולארי מחזקת מאוד את החוסן המקומי.
5. דרישות האיוון והשטחים של האנרגיה המתחדשת יעודדו הקמת שיתופי פעולה עם מדינות שכנות, שיגבירו את הביטחון האנרגטי ואת היציבות הכלכלית.

## הערות

1. ראו למשל: ווקס, 2019; מוסד שמואל נאמן, 2011.
2. על פי תוצאות המכרז (רשות החשמל, 2020), ותחשיב שערכתי בעצמי.
3. עם זאת קיימות גם טורבינות קטנות בהספק של קילואטסים ספורים (עדיין פי 10 מלוח סולארי), אלא שזמיינות הרוח מוגבלת במקומות רבים, בעוד שהשמש זורחת בכל רחבי הארץ.
4. ההבחנה בין מחיר חשמל זול למחיר נגיש נוגעת בעיקר להבדל בין עלות נמוכה ליחידת אנרגיה (קו"ט"ש) לבין עלות כוללת של צריכת החשמל. כך למשל, אם סך הצריכה נמוך יותר, ייתכן שסכום חשבון החשמל יהיה נמוך יותר גם אם עלות החשמל גבוהה מעט. כך ניתן באמצעות מחיר החשמל לתמוך במימוש צעדים להתייעלות אנרגטית, שיפחיתו בסופו של דבר את עלות חשבון החשמל.
5. הגדרה זו מתבססת על ההגדרה של ה־IEA – ארגון האנרגיה של מדינות ה־OECD.
6. כאמור, מובן שתוספת מקור אנרגיה (זו של השמש) היא יתרון בפני עצמו, אולם למרות שהשמש זורחת מדי יום, ניתן לדמיין תקלות מהותיות גם בעניין זה. למשל, ידוע שהתפרצות עזה של הרי געש יכולה להשפיע על הקרינה הגלובלית. עם זאת ההשפעה מוגבלת, לפרק זמן של כשנה. לכן גם במובן זה, עדיף היה להגדיל את חלקה של הרוח כאנרגיה מתחדשת נוספת.
7. על פי אתר Statista.
8. על פי "הספר הירוק" של המשרד להגנת הסביבה.
9. עלות לוח בגודל שני מ"ר היא כמה מאות שקלים.
10. יצוין כי המערכות הוקמו לפני שנים רבות, עוד קודם לירידת המחירים התלולה הן באגירה והן במערכות הסולאריות, על כן מרכזים אלה הם בעלי יכולת מוגבלת מאוד ביחס למה שניתן להשיג כיום. ראו למשל (Clean Energy Group, n.d.).
11. האיחוד הקים ועדת מומחים לנושא זה, שקבעה שיטה שונה למדידת החיבוריות. המספרים בהמשך מתייחסים לשיטת המדידה הישנה. הוועדה הוציאה עד כה שני דוחות: Commission Expert Group on electricity interconnection targets, 2017; 2018).
12. לדנמרק חיבורים חיצוניים בהיקף של 50 אחוזים מסך ההספק המותקן בה (Danish Energy Agency, 2018).
13. לישראל אין מחויבות בעניין, ואני משתמש בהנחיות כמדריך לגודל חיבור רצוי.
14. אם בסופו של דבר חלקה של אנרגיית הרוח יהיה גדול יותר מהצפי, למשל אם ניתן יהיה להפיק אותה מטורבינות צפות בים, זה יהיה מקור אנרגיה שונה וחשוב שנוסף על האנרגיה הסולארית.

## מקורות

- ווקס, ר' (2019, 22 ביוני). למה אין בישראל תחנת כוח גרעינית? זווית – סוכנות ידיעות למדע ולסביבה. <https://www.zavit.org.il/> /למדנו-מאסון-צרנוביל/
- מוסד שמואל נאמן (2011, 14 בנובמבר). תחנת כוח גרעינית בישראל – סיכום והמלצות דיון פורום האנרגיה מס' 22. [https://www.neaman.org.il/Files/Nuclear\\_Forum%20final%20Report\\_a.pdf](https://www.neaman.org.il/Files/Nuclear_Forum%20final%20Report_a.pdf)
- משרד האוצר (2019, 13 ביוני). שיא חדש במחיר לקוויט"ש בייצור חשמל: נבחר זוכה במכרז להקמת תחנת כוח סולארית רביעית באשלים. הודעות לעיתונות. [https://www.gov.il/he/Departments/news/press\\_13062019](https://www.gov.il/he/Departments/news/press_13062019)
- רשות החשמל (2020, 14 ביולי). העתיד החשמלי בפתח – ישראל צפויה להכניס מתקני אגירה למשל החשמל! הודעה לעיתונות. [https://www.gov.il/he/departments/news/pv\\_agira](https://www.gov.il/he/departments/news/pv_agira)
- Clean Energy Group (n.d.). SunSmart emergency shelters program. <https://www.cleangroup.org/ceg-projects/resilient-power-project/featured-installations/sunsmart-emergency-shelters-program/>
- Commission Expert Group on electricity interconnection targets. (2017). *Towards a sustainable and integrated Europe*. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report\\_of\\_the\\_commission\\_expert\\_group\\_on\\_electricity\\_interconnection\\_targets.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report_of_the_commission_expert_group_on_electricity_interconnection_targets.pdf)
- Commission Expert Group on electricity interconnection targets (2019). *Electricity interconnections with neighbouring countries*. Publication Office of the EU. [https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/785f224b-93cd-11e9-9369-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc\\_id=Searchresult&WT.ria\\_c=37085&WT.ria\\_f=3608&WT.ria\\_ev=search](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/785f224b-93cd-11e9-9369-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=37085&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search)
- Danish Energy Agency (2018). *Model analysis of flexibility of the Danish power system*. [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications\\_reports\\_papers/model\\_analysis\\_of\\_flexibility\\_of\\_the\\_danish\\_power\\_system.2018.05.15.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications_reports_papers/model_analysis_of_flexibility_of_the_danish_power_system.2018.05.15.pdf)
- IPCC (2019). *Global warming of 1.5°C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- The Tesla Team (2019, July 29). Introducing Megapack: Utility-scale energy storage. Tesla Blog. <https://www.tesla.com/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage>
- Weaver, J. (2020, May 1). Top ten list of lowest solar power prices in the world – updated August 31, 2020. Commercial Solar Guy. <https://commercialsolarguy.com/2020/05/01/lowest-solar-power-prices-in-the-world/>