

# ביטחון אנרגטי לישראל

שלמה ולד<sup>228</sup>

במאמר זה יוצג המונח "ביטחון אנרגיה", עיקרי המתודולוגיה לבחינת מידת הביטחון האנרגטי בישראל והתייחסות המחבר לגבי הנדרש לקיומו בעתיד.

## ביטחון אנרגיה מהו?

האנרגיה היא המטבע של הטבע. לכל דבר, עצמים, פעולות ותהליכים, יש ערך אנרגטי הניתן להמרה. לעיתים פעולת ההמרה כרוכה בתשלום, "עמלה", שגם לה יש ערך אנרגטי. כלל זה חל גם על כל פעולה אנושית. בעבר הרחוק, האדם הפיק את האנרגיה הדרושה לקיומו ממקורות ראשוניים<sup>229</sup> שהיו בסביבתו: קישוש עצים להבערת מדורה, הנעת אבני ריחיים באמצעות המרת האנרגיה הקינטית של זרם מים במפל, ניצול ישיר של אנרגיית השמש לחקלאות ועוד. **כיום אין בסביבתנו די מקורות ראשוניים "לצריכה עצמית" לכן, בחברה מודרנית, המדינה מחויבת לספק אנרגיה לתושביה כמוצר צריכה הכרחי וקיומי.**

המדינה עושה זאת באספקת תוצרי אנרגיה הניתנים לחלוקה ולהפצה. התוצר העיקרי הוא אנרגיה חשמלית. המקור השכיח לצורכי תחבורה יבשתית, ימית ואווירית הוא עדיין דלקים מאובנים המשווקים כבנזין, סולר ומזוט. במדינות רבות יש גם אספקת אנרגיה תרמית בצורת קיטור או מים חמים. לעיתים מופצים גם מקורות אנרגיה ראשוניים כגון גז טבעי בצנרת. האזרח ממיר תוצרי אנרגיה אלו לאחרים לפי צרכיו, למשל לתאורה, מיזוג אוויר, קירור/חימום מזון, הפעלת מנועים, ציוד תקשורת ומחשבים, תחבורה ועוד.

מאחר שאספקת האנרגיה לצרכנים היא הכרח קיומי שזמינותו מוטלת על המדינה, המושג **"ביטחון אנרגיה" מתייחס בראייתו למחויבות המדינה להבטיח את אספקת צורכי האנרגיה שלה, בכל עת, בשגרה ובחירום.**

הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה, IEA, שמושבה בפריז, הוקמה בעקבות חרם הנפט של איגוד המדינות המייצאות נפט, OPEC, ב-1973 במטרה להבטיח את ביטחון האנרגטי של המדינות השותפות, בהן ישראל. הגדרת ה-**AEI** לביטחון אנרגטי היא:<sup>230</sup> "The uninterrupted availability of energy sources at an affordable price". כלומר "הבטחת זמינות, ללא הפרעה, של מקורות אנרגיה במחיר נסבל". הגדרה זו כורכת את המחיר הכלכלי כשיקול מרכזי במרכיבי הביטחון. לאיחוד האירופאי יש הגדרה דומה:<sup>231</sup> "Ensuring secure and affordable supplies of energy to Europeans".

228 ד"ר שלמה ולד – לשעבר המדען הראשי של משרד התשתיות הלאומיות, המים והאנרגיה.  
229 מקורות אנרגיה ראשוניים (Primary Energy Resources - PER) הם משאבי טבע שניתן להמירם בשיטות ידועות, ביעילות סבירה, לאנרגיה חשמלית, תרמית או מכנית. דוגמאות: פחם, נפט, גז טבעי, אורניום, מקורות מתחדשים: שמש, רוח, הידרו.

230 IEA: Energy Security. <https://bit.ly/2X6rgAx>.

231 European Commission: Energy Strategy. <https://bit.ly/2LFRl4c>.

מדיניות ביטחון האנרגיה הבריטית היא המפורטת והנחקרת ביותר מבין אלה המוכרות למחבר מסמך זה וחלק מהמתודולוגיה הבריטית יצוטט במאמר. ההגדרה הבריטית מעוגנת מהחלטת ממשלת בריטניה מספר 154 משנת 2017 המצוטטת כלשונה:

“Energy security is about ensuring secure, reliable, uninterrupted supplies to consumers, and having a system that can effectively and efficiently respond and adapt to changes and shocks. It is made up of three characteristics: flexibility, adequacy and resilience.”

חשיבות רבה יש להגדרה ממוקדת של המונח “ביטחון האנרגיה”, שכן היא אמורה לשמש מצפן לקובעי המדיניות. בפועל, **במדינת ישראל לא קיימת הגדרה רשמית של המונח**, לא כל שכן חוק, אף שהמושג מוזכר פעמים רבות בפרסומים רשמיים של המדינה. מהאזכורים הרבים של המונח ומהעבודות שנעשו בפועל ניכר כי **הדגש ב”ביטחון אנרגיה” בישראל מתמצה כיום בביטחון הפיזי של מערכות ובנגישות למקורות אנרגיה ראשוניים**, הגדרה מצומצמת בהשוואה להגדרת הביטחון האנרגטי ומעמדו בתפיסות הביטחון של ארה”ב, אירופה ומדינות מפותחות כגון סינגפור ובריטניה.

### **הנגזרות מהגדרת המונח “ביטחון אנרגיה”:**

**“מחויבות המדינה להבטיח את אספקת צורכי האנרגיה שלה, בכל עת, בשגרה ובחירום.”**

בהגדרה המהודקת שאני מציע למונח ביטחון אנרגטי יש חשיבות לכל מילה ומילה:

**הבטחת “צורכי” האנרגיה ולא “דרישות” האנרגיה** (בשונה מההגדרות הזרות המצוטטות לעיל). אספקת צורכי האנרגיה היא מושג פרשני: מה הם הצרכים שלהם מחויבת המדינה? מי הם הצרכנים שהמדינה מחויבת להם? האם המחויבות היא רק לצרכים הקיומיים של התושבים או גם לתנאים הנדרשים לקיום המערכות המדיניות כגון המשק והכלכלה? מה הם תוצרי האנרגיה שהמדינה אחראית לספק? האם אספקת המקורות הראשוניים נדרשת רק לספקי השירותים או גם ישירות לצרכנים? על מי מוטלת האחריות לרשת אספקת תוצרי האנרגיה כגון חשמל? האם בכלל יש צורך ברשת?

**השימוש במונח “צרכים” מיתר את הדרישה ל”מחיר סביר”** המצוינת בהגדרות ה־IEA והאיחוד האירופאי, משום שמדובר בצרכים שחייבים לספקם. כמובן שנעשים מאמצים להפחתת העלויות אך את הצרכים יש לספק ומחירם הוא אילוץ למתכנן.

**המושג “בכל עת” מתייחס לא רק להווה, אלא גם למחויבות המדינה להבטיח את האספקה לעתיד**, בטווח של עשרות שנים קדימה.

**ההבחנה בין שגרה לחירום מהותית**. הצרכים בשגרה ובחירום עשויים להיות שונים עם סדרי עדיפויות שונים לאספקה. המושג חירום דורש אף הוא הגדרה וייתכנו כמה מצבי חירום נבדלים. האם בחירום נדרשת “רציפות תפקודית” (כדרישת ה־IEA ל־“uninterrupted availability”) או

שוא ניתן להסתפק ב"זמן התאוששות" סביר?

מרבית הקביעות לעיל אינן טכנולוגיות אלא מבטאות תפיסות מדיניות, חברתיות וסביבתיות. אך כל קביעה מיתרגמת לכלים טכנולוגיים שבלעדיהם אין המדיניות ניתנת למימוש.

ביטחון האנרגיה משפיע ומותנה בו זמנית בקיום ביטחון במגזרים הכרחיים אחרים ובעיקר מים, מזון ושירותי סביבה. מים, למשל, הם מוצר צריכה קיומי שלהפקתו וחלוקתו נדרשים עשרות אחוזים מכלל תפוקת האנרגיה המדינית. בה בעת, משק האנרגיה עצמו הוא אחד הצרכנים המרכזיים של מים. אלו נדרשים לקירור ולהפקת קיטור בתחנות פחם, סולר, גז וגרעין, לשטיפה ולעיתים לאקלום של מערכות אנרגיה סולרית וכולי.

הזיקה ההדדית בין המגזרים היא מושא למחקר המתנהל בעולם וגם בישראל. מטרת המחקר היא לבנות מודלים המתכללים לפחות את מגזרי המים, האנרגיה, המזון ושירותי הסביבה. המודלים נועדו להצביע על דרכי פעולה טכנולוגיות אפשריות למימוש התפיסות של קובעי המדיניות. מחקרים אלה מצביעים שאין די בטכנולוגיות הקיימות כדי להבטיח קיימות החברה האנושית אפילו עד סוף המאה הנוכחית, בקצב גידול האוכלוסין הנוכחי, העלייה ברמת החיים ובפרט לאור השפעות שינויי האקלים. לכן **נדרש מחקר ופיתוח רצוף ואינטנסיבי שיאפשר זמינות טכנולוגיות חדשות בעת שתידרשנה.**

למימוש האמצעים הטכנולוגיים להשגת ביטחון אנרגטי נדרש זמן רב עבור מו"פ והסדרות סטטוטוריות שנמשכות שנים. מכאן שלהיבטים הטכנו-כלכליים של הביטחון האנרגטי יש "שעון" שכל פעימה שלו היא כעשור שנים. מנגד, לתפיסות המדיניות, שמהן אמורה להיגזר הטכנולוגיה, יש שעון שהשינויים בו חלים בפעימות של שנה ונקבעות על ידי הזמן בין בחירות, חילופי שרים, שינויים בסדרי העדיפות במשרדי ממשלה, הכנסת יעדים מזדמנים, למשל של הצגת "הישגים" בפרק זמן קצר. שעונים אלה, לדאבון המתכננים, אינם ניתנים תמיד לסנכרון.

## **הערכת הביטחון האנרגטי**

**ביטחון אנרגטי מותנה בהבטחת כל "שרשרת הערך":** (א) קיום מקורות האנרגיה הראשוניים, (ב) אמצעי ייצור של מופעי האנרגיה המסופקים לצרכנים (בעיקר חשמל) ולבסוף (ג) מערכת השינוע - ההולכה והחלוקה מהיצרנים ללקוחות.

בהשאלה מהמתודולוגיה הבריטית,<sup>232</sup> כל אחד משלבי השרשרת נבחן בכמה מישורים: **זמינות** (availability), **אמינות** (reliability), **נגישות** (accessibility), **היתכנות** כלכלית (affordability), תרגום שונה לעומת הגדרה הבריטית ככדאיות), **קיימות** (sustainability) **וקבילות** (acceptability) ציבורית.

כל שירות כגון אספקת חשמל, דלקים לתחבורה יבשתית, ימית ואווירית, אספקת דלקים

The Security of UK Energy Futures, UKERC Research Report, Jim Watson, Ioanna Ketsopoulou, Paul Dodds, Modassar Chaudry, Simon Tindemans, Matt Woolf and Goran Strbac, March 2018. <https://bit.ly/3g2EiYz>

לתעשייה, אספקת אנרגיה תרמית לצרכנים (גז בישול, גז טבעי, קיטור), צריך להיות מנותח בנפרד, כאשר כל שלב בשרשרת יש לבחון מבחינת הסיכונים הצפויים, מקורות הסיכונים ורמת הסיכון.

### סיכונים ל:

1. רציפות האספקה של מוצרי הצריכה (מקורות ראשוניים ותוצרים כגון חשמל ודלקים).
2. רציפות האספקה של השירות לצרכן (מערכות הייצור והשינוע של המוצרים לצרכנים).
3. רציפות התפקוד של הכלכלה (משמעות של אי-אספקה על תפקוד המערכות הכלכליות).
4. נזקים לסביבה ולחברה (זיהום, הרס מערכות אקולוגיות, פגיעה במגוון הביולוגי, פגיעה באיכות החיים ובביטחון בקהילה).

### מקורות הסיכונים

1. טכניים - תלות הדדית בין תשתיות פיזיות, כשל מכני של מערכת, כשל סביבתי כגון פליטות חריגות.
2. אנושיים - חריגה בדרישות, השקעה בחסר בתשתיות ובאגירה אסטרטגית, חבלה וטרור, אי-יציבות פוליטית, סיכונים גיאופוליטיים.
3. טבעיים - אספקה לא יציבה או לא צפויה של מקורות בגין התדלדלות מקורות, אסונות טבע וכולי.

### מסננים לקביעת רמת הסיכון

1. תדירות הופעת תרחיש הייחוס.
2. עיתוי הנזק ביחס להתממשות תרחיש ייחוס.
3. משך הנזק: זמני, מתמשך, קבוע.
4. התפשטות הנזק: מקומי, לאומי, גלובלי.
5. הסתברות הנזק: אירוע ייחודי, לעיתים רחוקות, לעיתים מזומנות.

העדיפות בהתארגנות למניעת סיכונים נקבעת בדרך כלל על פי מכפלה של הסתברות הנזק בערך הכלכלי של הנזק. שיטה זו נהוגה גם בישראל, אך דווקא בישראל היא עלולה להיות הרסנית. ישנם סיכונים ייחודיים, בעיקר כאלה שמקורם במעשי זדון, העלולים להיות טרמינליים לקיום החברה והכלכלה. התארגנות מולם עלולה לעלות כסף רב ותוספת אחריות כבדה על כתפי הגורם המגן, ועל כן הגופים השונים שואפים להתנער מהאחריות להם. בעולם נהוג להתייחס לאיומים ייחודיים כאלה ולבצע מבחני לחץ (stress tests) למערכות דוגמת כורים גרעיניים. בארץ, ככל שידוע למחבר, ההיערכות לאיומים מסוג זה זניחה ביחס לאירועים הסתברותיים.

### תרחישים ככלי עבודה

כדי להיערך למתן שירות רציף של המערכות בהווה ובעתיד, נדרש להניח תרחישים עתידיים לגבי רמות הצריכה של כל מקור ותוצר אנרגיה לאורך זמן של 30–50 שנה לפחות. כלומר 2–3 דורות של פרקי הזמן הנדרשים לביצוע שינויים טכנולוגיים לשדרוג המערכות.

את התרחישים יש לעדכן תקופתית, כל חמש שנים בערך, ועל בסיסם לבחון ולעדכן את דרכי

הפעולה. תהליך שכזה חיוני כדי לאפשר שינויים תכנוניים בתוך מעבר בין מצבי שיווי המשקל של המערכות, ולא, לא ניתן לשמור על רציפות תפקודית. תרחישים עתידיים של רמות הצריכה צריכים לשקלל שינויים דמוגרפיים, סביבתיים, חברתיים וכן את הסיכונים שצוינו לעיל. באירופה, למשל, הציר המרכזי בקביעת התרחישים הוא הערכת ההשפעה של שינויי אקלים, תחת הנחות שונות. בתרחישים האירופאיים נלקחות בחשבון זיקות הדדיות והשלכות רוחב בתחומי החקלאות והמזון, המים, התחבורה היבשתית, האווירית והימית, וכן השפעות חברתיות מרחיקות לכת לגבי התנהגות, צורת חיים, זרם פליטים ועוד.

בבריטניה נוספו תרחישים בעקבות היתכנות הברקזיט. אלה השפיעו, למשל, על סל הדלקים העתידי. דרישה לשימוש מרבי במקורות ראשוניים מקומיים תצריך שימוש בפחם. אך לאור המחויבות של בריטניה להתמודדות עם שינויי אקלים, פתרון שכזה יצריך, למשל, הפעלת טכנולוגיות שעדיין אינן מפותחות מספיק ואינן כלכליות לעת עתה.

בישראל התקבלה ב-2018 החלטת ממשלה שעיקרה אינו התמודדות עם שינויי האקלים אלא הסתגלות לשינויים. ואכן, כמדינה קטנה יכולתנו להשפיע על ההתמודדות הגלובלית מוגבלת, אך התוצאות של שינויי האקלים מרחיקות לכת ונחוש בהן היטב. המשרד להגנת הסביבה מוביל תהליך בנושא ההסתגלות, אך תהליך כזה מחייב התבססות על תרחישי ייחוס, חלקם מחמירים, כמוצא לתכנון ולקביעת מדיניות גם בהקשרי ביטחון אנרגיה.

**ישראל נדרשת למדיניות סדורה בנושאים העקרוניים להגדרת צורכי האנרגיה העתידיים נוכח תרחישי ייחוס במגוון מגזרים משיקיים.** למשל, בתחום ביטחון המזון. אומנם יש החלטות לגבי רמת מלאי של מזון לאדם ובהמה (דגנים וכולי), אך חסרות החלטות עקרוניות לגבי היקף מקורות החלבון מן החי שנדרש שיהיו מתוצרת מקומית או כמות הגידולים החקלאיים המקומיים ביחס למיובאים שיש להבטיח. לאלה השלכה מיידית על תכנון משק המים ולכן גם על כמויות האנרגיה שתידרשנה. החלטות כאלו ישפיעו לכאן או לכאן בשיעור של עשרות אחוזים על הצריכה הכללית. התרחישים הישראליים מתבססים בעיקר על נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה לגבי גידול האוכלוסין, אך הרגלים חברתיים והתנהגות המגזרים הכלכליים ומגזר השירותים נלקחים לפי הערכות שנעשות במידה רבה באופן אינטואיטיבי.

## מדדים

אין מדד יחיד עבור "ביטחון אנרגטי". הערכה מפוכחת מחייבת התבוננות על מדדים שונים. דומה הדבר לנהג הקובע את מצב הרכב על ידי תפיסה כוללת של קריאת מחוונים שונים שעל גבי לוח המחוונים: דלק, טמפרטורת המנוע, לחץ האוויר בצמיגים וכולי. העזר שלהלן ממפה את התפיסה הבריטית.

## איור 1: מדדים לביטחון האנרגטי בבריטניה<sup>233</sup>



מרכיביה של התפיסה הבריטית עונים על מצבי משבר קצר טווח (זרבה קצרת טווח) ולמצוקות מתמשכות (אגירה וחיבור בין מערכות של מדינות שכנות), ומתייחסים למדדים כמותיים (איבוד עומס ברשת) כמו גם איכותיים (הסכמת הציבור). בישראל קיימים בעיקר מדדים של זמינות (Availability) ושל אמינות (Reliability). העיסוק במדדי ההיתכנות הכלכלית ומדדי הקיימות לוקה בחסר. נוסף על כך חישוב המדדים בארץ נעשה על ידי גופים שונים - חברת החשמל, רשות החשמל, רשות הגז ועוד. אין במדינת ישראל כיום, ככל שידוע למחבר, גוף אחד שמרכז את הנתונים של כל "לוח המכוונים" ומייצר הערכה תקופתית של מידת ביטחון האנרגיה לפי ההגדרה שלעיל.

### מודלים

מרכיב מרכזי במתודולוגיה הוא הערכת דרכי פעולה אפשריות במענה לתרחישים השונים בעזרת מודלים. המודלים אמורים לאפשר חישוב המדדים השונים בכל תרחיש ובכל דרך פעולה נמדדת לאורך התקופה עליה מתבצעת הסימולציה. עקב קשיים חישוביים וסיבות היסטוריות, המודלים הקיימים בישראל ייעודיים לנתח מסוים של משק האנרגיה, ואילו נתונים אחרים כגון גידול אוכלוסין, צריכת מזון מים, היקף תחבורה וכולי, מוזנים כתנאי התחלה או אילוצים למערכת

Cox, E. (2018). Assessing long-term energy security: The case of electricity in the United Kingdom. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82(3): 2287-2299. <https://bit.ly/2zQbYru>.  
 ראשי תיבות: REE); resting energy expenditure (REE); loss of load expectation (LOLE); Short term operating reserve (STOR); levelized cost of electricity (LCOE).

החישובית. נוסף על כך רוב המודלים הם "מהכלל לפרט" (Top-Down) כי אלה פשוטים יותר לחישוב.

הבידול (silo) בין המדדים מזניח את הזיקה ההדדית החזקה (nexus) בין מגזרים שונים במשק ואינו אופטימלי. בארץ ובעולם, ראוי להשקיע במודלים חדשים המבוססים על למידה עמוקה (Deep Learning). שיטות מתקדמות של רשת נוירונים Convolutional Neural - CNN (network) או RNN - Recursive Neural Network עשויות להניב מודלים טובים יותר לדרכי פעולה אפשריות של מערכות מורכבות לא ליניאריות בסביבה עם חוסר ודאות גבוה.<sup>234</sup> בישראל, יכולת מידול חישובית משמעותית נמצאת כיום בעיקר בידי חברת החשמל ומעט בידי רשויות החשמל והגז. בחברת החשמל קיימים הכוח המקצועי ומודלים לבצע תכנון והערכה של מערכות החשמל ונדרש להבטיח כי יכולות אלו לא יישחקו עקב השינוי המבני בחברת החשמל.

## "שרשרת הערך" של הביטחון האנרגטי

נרחיב את הדיון בכל אחד משלבי מערכת הבטחת הביטחון האנרגטי.

### מקורות האנרגיה הראשוניים

זמינות מקורות האנרגיה הראשוניים מותנית במשאבי הטבע שבתחומי המדינה, באלה שיש צורך לייבא, וכן ביכולת "קציר" האנרגיה מהמקורות אלה ובאגירתם. בחירת "סל האנרגיה" הלאומי של המקורות הראשוניים מאתגרת, משום שהבחירה אינה בין מקורות שווי ערך וחליפיים. במערכת החשמל, לדוגמה, יש עומס בסיסי קבוע ועליו נוספים עומסים משתנים התלויים בשעות היום ובעונות השנה. העומס הבסיסי וכן שינויים ממוצעים עונתיים יכולים להיות מסופקים על ידי פחם, נפט, גז ואורניום במידה שווה. האילוצים הם רק של זמינות ומחיר. עם זאת, העומסים המשתנים בפרקי זמן קצרים אינם מאפשרים שימוש בפחם, למשל, ומצריכים תחנות כוח ייחודיות. אף שתרומתם של תחנות אלו לכמות הכללית של אנרגיה נמוכה, עדיין חייבים להתחשב בקיומן כחסם תחתון לנתח המקורות הזמינים לצורך זה כגון גז וסולר.

במסגרת האילוצים בחישוב הנתח היחסי של מקורות האנרגיה, יש להתחשב גם ביכולת האחסון והאגירה שלהם. נפט גולמי מיובא כולו. אירוע מתמשך של מצור ימי, אי-יציבות באספקה וכולי, מחייבים אגירה מקומית של נפט או מוצריו לכיסוי הזמן הצפוי של אי-האספקה. קביעת רמות המלאי ואגירה במציאות הישראלית הן בעייתיות במיוחד ונחשבות סוד מדינה.

במשק הישראלי ישנן ארבע משפחות של מקורות אנרגיה ראשוניים: (1) פחם, (2) נפט ומוצרו, (3) גז טבעי ו- (4) מה שמכונה "אנרגיה מתחדשת", הכוללת בעיקר אנרגיה סולרית, רוח, הידרו. לעיתים כוללים בקטגוריה זו מוצרים המתקבלים ממחזור פסולת אורגנית. בעולם גם האורניום ממלא תפקיד חשוב כמקור ראשוני לאנרגיה גרעינית.

234 במסגרת הקיים, בבריטניה משתמשים במודל טכנו-כלכלי בשם UK TIMES model שהוא מודל bottom-up. במדינות אירופה השונות, באיחוד האירופי ובארה"ב, יש מודלים פחות או יותר מקבילים. כל מודל שבה כולל בתוכו מספר רב של תתי-מודלים למשקים השונים של חשמל, גז, דלקים וכולי המכסים את הצדדים הטכנולוגיים והכלכליים.

**טבלה 1 - מקורות אנרגיה ראשוניים**

מקור אנרגיה ראשוני	מקור אספקה	אגירה	שימושים	השפעה על הסביבה <sup>235</sup>	רגישות בטחונית
פחם	יבוא	בעירום קרקעי לשנים	חשמלי ותרמי	זיהום כבד	נמוכה
נפט ונגזרתיו	יבוא	במיכלים שונים	תחבורה, חשמל, תרמי, מוצרי פטרוכימיה	זיהום בינוני-גבוה	בינונית
גז טבעי	מקומי	אין – רק הגז שבצנרת ההולכה	חשמל, תרמי, מוצרי פטרוכימיה	זיהום בינוני	גבוהה
אורניום	יבוא	כמות הדלק בתוך כור מספיקה לעשר שנים	חשמל	זיהום נמוך	נמוכה
שמש	מקומי	אין	חשמל, תרמי	נמוך	נמוכה
רוח	מקומי	אין	חשמל	זיהום נמוך	נמוכה
הידרו	מקומי	אגירה שאובה בכמות של יום	חשמל	זיהום נמוך	בינונית
פסולות	מקומי	בעירום בכמות של חודש	תרמי, חשמל	זיהום בינוני	נמוכה

**פחם**, בכמות של מיליוני טונות, נמצא בעירום קרקעי. מבחינת ביטחון פיזי, הפגיעות של עירום פחם נמוכה. עיקר האיום בפחם קשור להיבטי זיהום האוויר והקרקע באזורי האגירה.

**הנפט ומוצריו** נמצאים בדרך כלל במצב נוזלי באגירה במכלים. רוב הנפט מיובא ארצה בצורה גולמית, אך נאגרות בעיקר נגזרות הנפט: בנזין, סולר, ומוצרי פטרוכימיה, המופקים בבתי הזיקוק בארץ. לבתי הזיקוק פגיעות גבוהה והם גם תורמים לזיהום האוויר והקרקע. הערכת הסיכון הביטחוני תלויה בהגדרה של מצב החירום שאליו מתכוננים. הפריסה של אמצעי האגירה וכמותם היא כזו שרמת פגיעותם ניתנת להגדרה כבינונית. בחירום, במקרה של פגיעה בבתי הזיקוק, ניתן לייבא ישירות את מוצרי הנפט. כמוכן, היבוא מחייב הובלה ימית מתפקדת שאיננה מובטחת

<sup>235</sup> ההשפעה על הסביבה בטבלה 1 מתייחסת רק למקור הראשוני, בעת שהוא נמצא באזור גיאוגרפי המשפיע על מדינת ישראל.



בחירום. בקביעת ההסתברות, מקובל להגדיר עדיין את הסיכון כבינוני, על אף קיומו של גז טבעי מקומי. כמו כן, חשוב לציין שעתה וגם בשנים הקרובות, מוצרי הנפט הם המקור הכמעט בלעדי לאנרגיה לתחבורה לסוגיה.

**אורניים** אינו משמש בישראל כמקור אנרגיה ראשוני. אם ישמש בעתיד, הוא יופק בטכנולוגיה של כורי הדור 3½ או 4. כורים אלה בנויים על מנגנון "בטיחות מובנית", כמות הדלק שבתוכם זעומה ומספיקה לשנים רבות. לכורי כוח על בסיס אורניים יש רגישות ציבורית גבוהה מאוד ובעקבותיה תפיסה "אינטואיטיבית" מחמירה של סיכונים סביבה וסיכונים ביטחון מעל ומעבר לנתונים העובדתיים.

שאר המקורות בטבלה נקראים "**מקורות מתחדשים**". שם זה מטעה (במכוון), שכן השמש אינה מתחדשת. המאפיין מקורות אלה הוא שהם אינם בשליטה. השמש זורחת כפי שהטבע קבע וגם הרוח, שהיא מוצר לוואי של השמש, אינה נשלטת. כמות המשקעים המזינים את מקורות המים אינם בשליטתנו ולכל היותר ניתן לבנות מאגרים ולווסת קמעה את משטר הזרימה וכמות האנרגיה המופקת. עם זאת, כשהשמש זורחת וקרינתה אינה מוסתרת על ידי אבק, אובך ועננות, היא זמינה לכול. אם איננו עושים שימוש בקרינה, זה נתפס כ"בזבז" לכאורה.

ישראל משופעת בשמש בכמות שעשויה לספק את כל צורכי המדינה עתה ואף במהלך שנים רבות בעתיד. עם זאת, קציר אנרגיית השמש ובפרט אגירתה, הם בעייתיים. אגירה מתבצעת בדרך כלל כאנרגיה תרמית (כחום) או כאנרגיה כימית לאחר שלב ביניים של הפקת חשמל (במצברים, למשל). כל שיטות האגירה הקיימות יעילותן נמוכה, עלותן גבוהה ואמינותן בינונית. כמו כן, קציר האנרגיה הסולרית מצריך שטחים נרחבים.

הטענה שלפיה ניתן לנצל רק "שטחים מופרים", קרי שטח שבוצעה הפרעה, כגון גגות בתים ומפעלים, כדי לייצר את כל כמות האנרגיה החשמלית הנדרשת, אינה עומדת במבחני החישוב. בפועל, גם אם נשעבד את כל גגות הבתים בישראל, כולל אלו שייבנו בשני העשורים הבאים, להפקת אנרגיה סולרית, הפוטנציאל שקול רק לתוספת האנרגיה שתידרש במהלך כשנתיים-שלוש. מכאן, ששימוש משמעותי באנרגיה סולרית מצריך ניצול שטחים שאינם מופרעים, ולכך יש מחירים - על חשבון חקלאות או על חשבון ערכי הטבע. לבסוף, בשל בעיות האגירה, האנרגיה המתחדשת, ובפרט הסולרית, נחשבת כמקור שפעיל לסירוגין ולא זמין בכל עת.

אנרגיית רוח ניתר לקצור בכמות מסחרית רק במקומות מסוימים בארץ וההערכה של שיא ההספק של מקור זה היא כ-2 ג'יגה-ואט, כמות השקולה לתחנת כוח גדולה אחת או שתיים, הפועלת רק כמה שעות ביממה עם תפוקה לסירוגין ושאינה זמינה בכל עת.

מבחינת הביטחון הפיזי, הפריסה הרחבה של מקורות מתחדשים מקטינה את הרגישות הביטחונית שלהן, אך מבחינת השפעה על הסביבה, גם לאנרגיה המתחדשת יש היבטים שליליים - אובדן שטחי טבע וחקלאות, פגיעה בבעלי כנף בפרט עופות גדולים שישראל נמצאת על נתיב נדידתם מאירופה לאפריקה. יש גם הפרעות אקוסטיות ועוד. כך, שאין בנמצא מקור אנרגיה נטול השפעה על הסביבה והערכת אותה השפעה על שירותי הסביבה אינה נתון חד-משמעי.

**הגז הטבעי** הוא כיום המקור הראשוני החשוב ביותר, וכנראה יהיה כך בעשורים הקרובים. יתרונו הגדול בכך שהוא נמצא בתחום המים הכלכליים של ישראל. חסרונו בכך שהקידוחים הם בעומק רב מאוד (כ-3,000 מטר), ובמרחק רב מהחוף (כ-100 ק"מ). הגז מצריך טיפול ראשוני להרחקת מים ופחמן דו-חמצני ולאחר הטיפול הוא מוזרם בצנרת למתקן קליטה בחוף ומשם הולכה וחלוקה לצרכנים בצנרת. אסדת הפקה או רכזת תת-ימית הן מתקנים יקרים מאוד ומורכבים שפגיעותם גדולה, זמן השיקום שלהם גדול מאוד (שנים), והנזק לסביבה גדול גם הוא. לישראל כמה אסדות בקידוחים השונים, כולן אסדות צפות,<sup>236</sup> והן מקושרות למתקן חופי יחיד לעת עתה באשדוד בניור כפול יחיד, האחד לגז והאחר לנוזלי העיבוי (גם הוא דלק שימושי).<sup>237</sup>

ישראל אינה אוגרת כיום את הגז בסמוך לצרכנים. למעשה, ה"אגירה" היחידה היא בצנרת ההולכה והחלוקה בלבד והיא מספיקה לזמן קצר (שעות). מכאן, הפגיעות הביטחונית של משאב הגז גדולה עקב השימוש בניור כניסה יחיד, נוסף על הקשיים במיגון האסדות הגדולות והרכזות התת-ימיות הסטטיות. מתקנים אלה נמצאים מחוץ למים הטריטוריאליים של ישראל, באזור הכלכלי הבלעדי (EEZ) שבו יש תנועה חופשית לכל כלי שיט ולכן קשה למגנם. בכל המתקנים בעולם, האחריות על ביטחון ובטיחות המתקנים היא על המפעילים, אך בישראל היא מוטלת על המדינה ומתבצעת על ידי חיל הים.

**נתח הגז בסל הדלקים לאנרגיה בישראל הוא הגבוה בעולם, כ-60%**. המדינה שהכי מתקרבת לאחוז כזה היא סינגפור, שבה יש ארבעה צינורות הזנה בלתי תלויים, ואף על פי כן היא סובלת מאחוז גבוה ביותר של החשכות חשמל.<sup>238</sup> הסיבה שישראל לא נפגעה עד כה מהחשכות רציניות היא בזכות הדרישה הרגולטורית מכל תחנות הכוח המשמעותיות להיות דו-דלקיות ולעבוד זמן מה עם סולר ממאגר הצמוד לתחנה. אופציה זו נוצלה כמה פעמים, על ההשלכות הסביבתיות והכלכליות הנובעות מכך. הפעלה רצופה בסולר היא מקור לבעיות ביטחון נוספות של הולכת סולר ממאגרים מדינתיים לתחנות הכוח לאורך זמן. כך, גם אם ייבנה צינור הזנה נוסף, ביטחון האספקה יגדל, אך הסיכון הביטחוני יישאר גבוה.

לפתרון חלקי של בעיית האגירה בגז הוקם בחדרה מתקן גיוז להתמרה של גז טבעי מנוזל (LNG – Liquefied Natural Gas), למצב גזי בעת הצורך. הגז המנוזל נשמר בטמפרטורה נמוכה בספינה, שמטבע הדברים מהווה מקור מוגבל מבחינת קיבולת והפתרון מצריך קבלת גז מנוזל מיובא ויקר. נוסף על כך גם מתקן חיוני זה הוא סטטי ומהווה מטרה מרכזית לפגיעה פיזית.

### הפקת חשמל

חשמל הוא תוצר האנרגיה המרכזי המחולק לצרכנים דרך רשתות החלוקה וההולכה. מרבית החשמל נוצר במכונות חום סובבות, המופעלות בדרך כלל בטורבינת קיטור, שהקיטור בה נוצר משריפת דלקים כגון פחם, נפט או גז או מחום המתקבל בתהליכי ביקוע גרעיני של אורניום.

236 האסדה הראשונה של ישראל, מאיר-B, מוקמה על קרקע הים בעומק כ-200 מטר מול חופי אשדוד/אשקלון וחזלה לתפקד כאסדת הפקה עם התרוקנות המאגר. כיום היא משמשת כנקודת מעבר לאשדוד ובשאיפה גם לאגירת גז טבעי.

237 סביר להניח שעד עת פרסום מאמר זה תפתח כניסת גז נוספת ממתקן הטיפול הימי של מאגר לויתן המוצב כ-9 ק"מ מהחוף מול זכרון יעקב.

238 שיחה עם שר האנרגיה של סינגפור ב-2011.

בתחנות רוח, הרוח היא זו המסובבת את הסליל. ביציאה של כל מקור חשמלי מותאמת האנרגיה לסטנדרטים המאפיינים את הרשת אליה הוא מחובר: המתח והתדירות. למשל, תחנות כוח גדולות מחוברות לרשת ההולכה במתח על עליון של 400KV (קילוואט) ותדר של 50Hz (הרץ או פעימות לשנייה). דיוק המתח והתדר חייב להיות גבוה, והתדר צריך להיות מסונכרן עם התדרים של התחנות האחרות המחוברות לרשת, ולא, תהיה איכות החשמל ללקוחות נמוכה והפסדי האנרגיה ברשת גבוהים.

מכפלת הזרם במתח בכל עת נותנת את ההספק החשמלי המסופק (ביחידות של וואט המבטאות כמות אנרגיה ליחידת זמן). תחנות הכוח הגדולות עשויות להפיק אנרגיה בהספק של 1GW (גיגה-ואט). התחנות מבוססות גז טבעי הן בגודל של מאות MW (מגה וואט שווה לאלפית גיגה-ואט).

לתחנות הכוח הגדולות נדרש זמן ארוך להפעלה ולתגובה לשינויים בעומס שעל הרשת. לשם ייצוב המערכת, פועלות כמה תחנות בהספקים בינוניים המופעלות כל העת כ"זרזרה סובבת" או תחנות שיש להן זמן תגובה מהיר. לאלה מצטרפות גם תחנות כוח של מפעלים גדולים, בתי חולים, מחנות צבא וכולי המחברים לרשת הכללית. זו משמשת להן גיבוי, ובמקביל גם הן משמשות גיבוי לרשת הכללית. תחנות כוח של אנרגיה מתחדשת הן בהספקים נמוכים של כמה KW (קילוואט) ממתקנים על גגות בתים ומפעלים, או בינוניים עד 100MW (מהתקנות משטחים גדולים דוגמת אלה שבאתר אשלים, בתמנע ועוד). אלו מחוברות לרשת החלוקה או לרשתות המתח הגבוה.

**יש שתי תפיסות הפעלה של מערכת החשמל ולהן משמעות כבדה לביטחון האנרגיה.** התפיסה הראשונה מדברת על יצור מרוכז בהספקים גדולים בתחנות בודדות. התפיסה השנייה מדברת על ייצור מבוזר ככל האפשר במספר רב של תחנות הסמוכות לצרכנים, לצד תמיכה בצרכנים שהם גם יצרנים ("Prosumer"). המגמה במרבית מדינות העולם, וגם בישראל, היא ללכת לתפיסה הביזורית, אך שוק החשמל הישראלי, הנשלט על ידי חברת החשמל, עדיין מתנהל לפי התפיסה הראשונה.

כיום, תחנות הכוח הגדולות הן קריטיות מבחינת ביטחון האנרגיה בישראל. תקלה באחת מהן עלולה, בעיקר בשעות עומס, להפיל את כל רשת החשמל. הסיכון הביטחוני גדול, שכן תחנות אלה הן מטרות קבועות וגדולות פיזית ובתוכן נקודות קריטיות לתפעולן. המיגון הפיזי של אלה, להבטחת רציפות תפקודית, קשה, יקר, אך הכרחי. נוסף על כך שריפה בתחנת כוח גדולה היא גם אסון אקולוגי משמעותי מאוד המחייב היערכות יקרה ומורכבת מראש. התחנות הקטנות/בינוניות קשות יותר לפגיעה ונפילת חלק מהן יכולה להיות מגובה על ידי יתר תחנות הרשת. ועדיין, איום סייבר, למשל, עלול להפוך גם חשיפה של תחנות קטנות לבעיה גדולה לרשת כולה, למשל על ידי פגיעה בתפקוד הממירים כך שהרשת תזון במתח ותדר לא מתואמים.

ההספק השיאי של ייצור החשמל המותקן צריך לענות על דרישות החשמל בתנאי קיצון, למשל בתנאי מזג אוויר חריגים שבהם מופעל ציוד חשמלי רב לאקלום. נוסף על כך תנאי קיצון גורמים לשינויים גדולים גם ביעילות תחנות הכוח (בעיקר גז טבעי וסולריות) שיעילותן פוחתת מאוד עם

עליית הטמפרטורה.<sup>239</sup> גם לאנרגיית הרוח מגבלות התלויות במהירות הרוח.<sup>240</sup> מכאן, החשיבות של שקלול שינויי אקלים המאופיינים בעלייה ניכרת של אירועי קיצון, בתרחישי הייחוס. הסתמכות יתרה על PV או רוח, שתלותם גבוהה יותר בתנאי קיצון מתחנות אחרות, עלולה להביא לאי־יכולת אספקה דווקא בזמן שהצריכה מגיעה לשיא.

לסיכום, סך התחנות צריכות לספק את כלל הצרכים הרגועים והמתמשכים של הצרכנים בכל עת ובכל תנאי. פריסתם של היצרנים וגודל כל יחידת ייצור נקבע על סמך הקרבה לצרכנים, הקשר הפיזי אליהם, היחס בין מתקנים גדולים, בינוניים וקטנים ומגוון מקורות האנרגיה הראשוניים הזמינים.

### שינוע והפצה לצרכנים - רשת החשמל

**הצורך ברשת יעילה מהותי לביטחון האנרגטי בהיבטי הרציפות התפקודית גם בשגרה.** רשת מאפשרת ויסות של הייצור ביחס לצריכה וגיבוי הדדי בין היצרנים והספקים. אי־אפשר שכל צרכן יספק את צרכיו לעצמו, שכן מדובר בבזבז משאבים עצום, מטלה טכנית לא מבוטלת על הספק. נוסף על כך חשיבותה של הרשת היא ביכולת לגייס משאבים זמינים שיש לצרכנים/יצרנים אחרים בהינתן תקלה. **השאלה היא מה גודל הרשת האופטימלי מבחינה כלכלית ומהבחינה התפעולית.**

העולם המערבי נוטה כיום לגישה של מערכות מבוזרות המנוהלות עד כמה שאפשר באופן אוטומטי. גישה זו היא הבסיס לתפיסה הנקראת כיום "רשת חכמה" (Smart Grid), המבוססת על תקשורת נתונים בזמן אמת של כלל היצרנים וכלל הספקים וקבלת החלטות - טכניות ומסחריות - באופן אוטומטי ככל האפשר. בכך אין כמובן לומר שעד כה הרשת הייתה "טיפשה" שכן מידת התחכום והטכנולוגיות המשולבות ברשת הריכוזית הקיימת מרשימה ביותר.

**תחנות המשנה הן רכיב קריטי ונקודת כשל אפשרית למערכת הולכת החשמל.** רשת החשמל בנויה בשני מדרגים בסיסיים - שדרה מרכזית במתח על עליון ועליון שנקראת "רשת ההולכה", ומתחתיה, במתחים נמוכים יותר, "רשת החלוקה" המסתעפת בתחנות משנה ושנאים המוצבים לאורך רשת ההולכה ומתווכים את החשמל ללקוחות. זרם החילופין שמיוצר בתחנות הכוח הגדולות מיוצב ומועלה למתח על עליון ומסופק בשלושה מופעים (תלת־פאזי). קרוב לריכוזי אוכלוסייה או תעשייה מוצבות תחנות המשנה הכוללות שנאים להורדת המתח לרמה נמוכה יותר ומערכות המייצבות ומתאמות את המתח והתדר ומפחיתות הפרעות.

הגישה המבוזרת מדברת על יצירת רשתות מקומיות קטנות, אזוריות, של יצרנים/צרכנים. רשתות מקומיות אלה יכולות ליהנות מגיבוי הדדי של רשתות מקומיות שכנות על ידי חיבור הרשתות המקומיות לרשתות רחבות יותר. בכך יש אומנם חזרה לדרישה לקיום רשת ריכוזית של הולכה וחלוקה, אך ההבדל יהיה ביכולות ההולכה של כל רשת ובשיטת הבקרה על הספקים והצרכנים.

239 בטורבינות גז ההספק המותקן מוגדר בטמפרטורה של 15°C צלסיוס. בטמפרטורה של 40°C היעילות צונחת ביותר מ-20%. כלומר תחנה גזית של 100MW תייצר פחות מ-80MW בטמפרטורה של 40°C (מצב שכוח בישראל). בלוחות סולריים היעילות פוחתת בכ-3% עם עלייה של כל מעלה מעבר ל-20°C. ב-40°C יספק הלוחות פחות ממחצית מהספקן המותקן.

240 ההספק המותקן של טורבינה מחושב במהירות רוח של 14km/h. הספק זה יצב עד מהירות של כ-25 קמ"ש. במהירות רוח גבוהה יותר, הטורבינה עלולה ליפול, ולכן חייבים להטותה במקביל לכיוון הרוח ולהוציאה מכלל פעולה כדי שתשרוד.

בפועל זו היררכיה של רשתות חכמות: מיקרו־גרید, מיני־גרید ורשת מרכזית שהיא עמוד השדרה של המערכת.

כדי שהרשת תתפקד ברציפות וללא תקלות ובאופן מיטבי מבחינה כלכלית, היא חייבת להיות מנוהלת על ידי מערכות בקרה עם ממשק אנושי או בלעדיו. ניהול המערכת הוא מלאכה מורכבת מאוד של התאמת הייצור לעומסים, והיא מתבצעת בעזרת מערכות בקרה ומחשבים קריטיות. יש בה מספר רב של החלטות שאינן בהכרח טכניות אלא ניהוליות וכלכליות. למשל, בעת צריכה נמוכה, מאילו יצרנים לרכוש חשמל ומאילו לא. ובאופן הפוך, כאשר הצריכה עולה על שיא כושר הייצור, את מי מהצרכנים להשיל מהרשת ואת מי להשאיר. לכן יש למנהל המערכת השפעה מרכזית על ההתנהלות הכלכלית והתפקודית של היצרנים ושל הלקוחות.

ברשתות המבוזרות, רשת החלוקה אמורה להיות מחולקת למיקרו־רשתות שינוהלו על ידי "מאגדים" (aggregators). אלה יעזרו לצרכן הסופי בתכנון הצריכה, כך שאפשר יהיה להגיע להתייעלות אנרגטית, לבחירה תחרותית של הספקים וכן למכירה במחיר אופטימלי של יצור חשמל על ידי היצרן/צרכן – prosumer לרשת. ברשת הריכוזית, מנהל המערכת קונה את כל כושר הייצור של היצרנים ומוכר את כל הנדרש לצרכנים. במקרה של יצרן/צרכן, הקיזוז בין הצריכה למכירה לרשת נעשה על פי המונים שבידי היצרנים/צרכנים.

רשת הולכה ריכוזית מנוהלת על ידי "מנהל המערכת" (TSO-Transmission System Operator) ורשתות החלוקה מנוהלות על ידי "מנהל המערכת האזורי" (DSO-District System Operator). בישראל, שתי מערכות הניהול נעשו על ידי חברת החשמל. כעת, במסגרת הרפורמה במשק החשמל, ה־TSO למסגרת מופרד עצמאית, אך ה־DSO ימשיכו להימצא גם להבאת תחת כנפיה של חברת החשמל, באופן שסותר את התפיסה הביזורית.

### **הסכנות לאספקת החשמל הנובעות מרשת ההולכה והחלוקה**

1. ביטחון פיזי של תחנות המשנה (וקווי ההולכה בשדרה המרכזית של הרשת).
2. סיכון אלקטרו־מגנטי להפרעות עד כדי הרס מוחלט של שנאים וקווי הולכה.
3. סיכון אלקטרו־מגנטי למערכות בקרה ושליטה.
4. סיכון סייבר למערכות השליטה והבקרה.

סיכון אלקטרו־מגנטי חמור אפשרי באופן טבעי מסערות מגנטיות של השמש הנפוצות בתדירות של כל 11 שנים והשפעתן שכיחה יותר ליד הקטבים של כדור הארץ. גם בסביבות קו המשווה צפויות סערות משמעותיות בתדירות של כ־150 שנים. סערה אלקטרו־מגנטית יכולה לגרום לשרפה של שנאים מרכזיים ברשת. קווי ההולכה הארוכים מהווים "אנטנה" מעולה להפרעות אלה. פגיעה בשנאים המרכזיים היא עניין משמעותי ביותר לרשת - הזמנה של שנאי מרכזי עלולה לקחת שנים אחדות. תקלה במספר מועט של שנאים ברשת ההולכה עלולה להשבית את כל רשת החשמל לזמן ארוך מאוד.

דפקים אלקטרו־מגנטיים יכולים לקרות גם באירוע זדון. פיצוץ גרעיני בגובה רב (40–400 ק"מ)

המכונה EMP (Electro-magnetic pulse) הוא מתכון לכשל רב-מערכתי, בו זמני, של כל מערכות הבקרה והמחשבים, בשטח גיאוגרפי המכסה את כל מדינת ישראל. גם אירוע סייבר משמעותי יכול לגרום לכשל רב-מערכתי, בו זמני, בשטחים נרחבים. ככל שהרשת "חכמה" יותר, פגיעותה גדולה יותר. לנפילת רשת החשמל יש השפעות רחב על כלל המשקים הקריטיים כגון מים, מזון, מערכות ציבוריות כבנקים ומוסדות ועוד. תקלה ממושכת יכולה להוות סכנה קיומית למדינה.

### שינוע והפצה לצרכנים - רשת הגז הטבעי

מאסדות ההפקה מועבר הגז וכן נוזלי העיבוי (condensate) בצנרת כפולה למתקן טיפול. כיום, כאמור, יש מתקן טיפול יחיד באשדוד ומתקן ימי נמצא בהקמה מול חוף דור. מערכת ההולכה הארצית מתחילה בתחנות קבלת הגז ופרושה במקטע ימי ובמקטעים קרקעיים. הזרימה נשלטת על ידי הלחצים בצנרת. בצמתים מרכזיים נקלט הגז במתקני הפחתת לחץ, ומשם הוא מוזרם לרשת החלוקה בפריסה ארצית. לאורך הצנרת ישנם מגופים לסגירה של קטעים במקרה של תקלה. התקלות המרכזיות הן פיזיות, קרי דליפות עקב פגיעה בצנרת. כמות הדליפה המקסימלית היא הגז הכלוא בין שני מגופים עוקבים.

הפריסה הקרקעית של צנרת ההולכה רחבה אך אינה מאפשרת גיבויים מספיקים במקרה של תקלה. תיקון תקלה במקטע היבשתי הוא פעולה מורכבת אך קצרה יחסית. תיקונים במקטע הימי ובפרט בצנרת בעומק רב מהאסדות למתקני הטיפול הם קשים, ואין קבלני ביצוע מקומיים זמינים. תקלה בצינור כזה משמעותית ויכולה להימשך כמה חודשים. כמות הגז שבצנרת מספיקה ללקוחות למשך שעות מספר ולא יותר. לכן היצרנים נדרשים למתקנים דו-דלקיים כדי לצלוח תקלות ברשת חלוקת הגז.

### הפצה של מוצרי נפט

קביעת היקף מאגרי הדלקים (נפט גולמי, בנזין, סולר, מזוט וגפ"מ) היא האתגר המרכזי בהבטחת ביטחון האנרגיה לתחבורה ולתחנות הכוח הפוסיליות. את המאגרים ניתן ורצוי לבזר, למגנם פיזית מפני אירועי זדון ולחברם ברשת צנרת למקורות האספקה בבתי הזיקוק. רשת שכזו מספקת ברגיעה ויכולה להיות מגובה בהובלה יבשתית במכליות וצוברים. במצבי חירום נדרשת יכולת הזנה ישירה בצנרת לתחנות הכוח העיקריות. במקרה של תקלה משמעותית, כלל-ארצית, במערכת הגז, שתימשך מעבר לזמן האספקה העצמית של סולר בתחנות דו-דלקיות, עלול ביטחון האנרגיה להיפגע בשל חוסר היכולת לשנע את הסולר לתחנות.

### משימות לעתיד

מהאמור לעיל ניכר הצורך בקביעת מדיניות סדורה לטווח ארוך, ריכוז המידע בידי מקבלי ההחלטות, יכולת ניתוח ובחינה כמותית לגבי הנדרש לביטחון אנרגיה בישראל ופיקוח מקצועי על מימוש ההחלטות. משימות יש להציב בצמוד לסדר קדימויות ועדיפויות.

לדעתי, המכשלה הראשונה במעלה שבה יש לטפל היא העדר הגדרה מחייבת של הביטחון האנרגטי,

למשל על ידי אימוץ הנוסח המוצע לעיל. בהכרח, יש לתת תשובה לכל הנושאים שהצגתי כבעלי אופי פרשני בהגדרה. מאחר שעיקר הסוגיות בהגדרה הן סביב העדיפויות הלאומיות בנושאי חברה, כלכלה, סביבה וביטחון, משימה זו צריכה להיות מטופלת על ידי הדרג המדיני בתוך תמיכה מקצועית בהבנה של ההשלכות של כל החלטה. את ההגדרה יש לעגן בחקיקה ובאסדרה. מניסיון העבר, אני מטיל ספק ביכולת הדרג המדיני להירתם למשימה זו. כמו כן, כפי שנאמר לעיל, מקורות התמיכה המקצועית למשימה מבוזרים וחלקם העיקרי נמצא בידי גורמים אינטרסנטיים.

לאחר התגברות על מכשלה מרכזית זו, יש להציב לדרג המקצועי יעד להמלצה על דרכי פעולה אפשריות למימוש הביטחון האנרגטי באופן רציף ובר קיימא. דבר זה כולל את הגדרת "לוח המחוננים" הלאומי שלפיו יימדד כמותית מצב הביטחון, בניית מודלים לחישוב דרכי הפעולה האפשריות, הגדרת פערים טכניים ואחרים וקביעת צעדים לגשר עליהם. אלה כוללים את קביעת סל מקורות האנרגיה הראשוניים העתידיים, חלוקה בין משק ריכוזי ומבוזר, אגירה ורזרבות נדרשות, מבנה רשתות ההזנה לצרכנים וניהולן וכולי. כלומר כל הנושאים בהם דן מאמר זה.

**המשימות חייבות להיעשות על ידי המדינה על ידי גוף מקצועי ממשלתי ולא על ידי גופים שמחוץ למערכת,** כדי להגיע לדרכי פעולה אפשריות שבהן באים לידי ביטוי סדרי העדיפויות של המדינה, כפי שתוגדרנה במסגרת המשימה הראשונה. כמו כן, יש לפקח על מימוש הדרך שנבחרה. חייב גם להיות תהליך עיתי וסדור של ריענון התוכניות. הגוף המקצועי הממשלתי יבטיח "זיכרון ארגוני" ארוך טווח, דבר שאינו נמצא באקדמיה, שכן זו מבצעת מחקרים מונחי סקרנות ולא מונחי משימה.

**משימה מרכזית של גוף זה היא איסוף וניתוח המידע על מגמות בתחום האנרגיה,** על מרכיביו המגוונים (ייצור, צריכה, אגירה, הובלה, תחליפי אנרגיה וכדומה), ועל תרחישי ייחוס לצורך פיתוח ידע הנדרש לבחינה של התפיסה הלאומית בתחום הביטחון האנרגטי והאסטרטגיות למימושה.

**אני ממליץ על הקמת מרכז לאומי לאנרגיה,** כיחידת סמך ממשלתית, שתאגד בתוכה את הידע והכלים המדעיים, הטכנולוגיים והכלכליים הנדרשים. בהעדר גורמים מדיניים המסוגלים לבצע את המטלה הראשונה במעלה של קביעת המדיניות, ניתן להיעזר בגוף שיכין תוכנית עבודה והצעות הולמות לדרג המדיני כדי שהאחרון יוכל לממש את מחויבותו ולהשלים את היעד המרכזי.

גופים דומים קיימים ברוב המדינות המתוקנות. הצעות מעשיות להקמת מרכז לאומי לאנרגיה בישראל, שנסמכו על לימוד הנעשה בעולם ובארץ, הוצגו פעמים אחדות בפני הדרג המדיני על ידי מחבר מאמר זה ואחרים. אך עד כה לא מומשה ולו אחת מהן. סיבה פופולרית לדחייה הניתנת על ידי הפוליטיקאים היא רצונם לצמצם את השירות הממלכתי ואת מספר עובדי המדינה. ברוח זו הופרטו בעבר מעבדות לאומיות שהיו קיימות בישראל. לדעתי, ניתן למצוא איזון בין היקף המרכז בתוך ביצוע כל הפעילות הנדרשת בהישענות חלקית על מקורות מהאקדמיה והתעשייה. כמו כן ניתן למצוא את נקודת הזמן והקונסטלציה הקוסמית בממשלת ישראל שבה ניתן לבצע צעד חיוני זה.

## סיכום

**הביטחון האנרגטי מתייחס ליכולת המדינה לספק את צורכי האנרגיה שלה, בכל עת, בשגרה ובחירום.** הגדרה זו אינה מעוגנת בחקיקה, בהחלטת ממשלה או בהסדרים, אלא מתבטאת במעשים המתבצעים בפועל ביוזמות של גופים שונים במקטעים השונים של מגזר האנרגיה. תרחישי הייחוס מולם נערכת ישראל כיום חשובים מאוד לטווח הקצר והבינוני ומועילים בחיזוק הביטחון האנרגטי בכל הנוגע לזמינות ולאמינות המערכות.

**במקביל, נדרש גם תכנון ב־ר־קיימא לטווח הארוך.** תכנון כזה מחייב התייחסות לתרחישי ייחוס מתחומים משיקים (לדוגמה, שינויי האקלים) ויכולת עבודה באמצעות מודלים מורכבים המשקללים תרחישים אלה. בידוד של מרכיבי המערכת האנרגטית משמעותו הזנחת הזיקה ההדדית בין מגזרים שונים כרכיב חיוני בתכנון, ועל כן תכנון חסר. בהיעדר "לוח מחוונים" לאומי, לא ניתן להעריך בפשטות את ביטחון האנרגיה של המדינה בדגש על טווחי הזמן הרחוקים יותר. הבעיה האחרונה היא סוגיה גלובלית המהווה אתגר בפני מתכנני כל העולם.

במאמר נסקרו עיקרי "שרשרת הערך" של מערכות האנרגיה עם השיקולים המרכזיים למתודולוגיה של תכנון לביטחון האנרגיה:

- **לגבי מקורות האנרגיה הראשוניים, חיוני לבנות סל מקורות מגוון ובהיקף המבטיח אספקה בכל עת, בשגרה ובחירום.** אי־אפשר להתבסס על הגז בלבד, אך גם לא על מקורות אנרגיה מתחדשת בלבד. העולם, ובפרט ישראל כ"אי אנרגטי", לא ייפרדו כנראה ממקורות אנרגיה פוסיליים עד סוף המאה לפחות. כותב המאמר יצא בעבר נגד תוכניות היצוא המסיביות של גז טבעי (ועדת צמח).
- **ביטחון האספקה של מערכת הגז הטבעי** – ככלל, צינור כניסה יחיד (ובעתיד שניים), מתקן טיפול יחיד (ובעתיד שניים), אינם מספיקים. ייתכן גם שיקשה לשפר זאת מסיבות כלכליות או עקב התנגדות ציבורית. לכן יש חשיבות קרדינלית למערכות אנרגיה דו־דלקיות. ברקע, אתגרי המיגון הפיזי של מתקני הגז התתי־ימיים ב־EEZ.
- **ביזור אמצעי היצור של תוצרי אנרגיה ומעבר לרשתות חשמל חכמות בניהול אוטומטי** הם יעדים חשובים לשיפור הביטחון האנרגטי, אך גם מציבים אתגרים לא שגרתיים לבקרה וחישוב, ובפרט לביטחון מפני התקפות סייבר או דפקים (pulse) אלקטרו־מגנטיים.

ביטחון האנרגיה מצריך עקרונית בניית יתרות ורזרבות גדולות של מתקנים, משאבי טבע ומשאבים של כוח אדם מקצועי. עודפים הם מעמסה כלכלית שמתנגשת בדרישה של "מחיר בר־השגה" של מוצרי אנרגיה כפי שמוגדר במושג "ביטחון האנרגיה" על ידי IEA ואחרים. התנאי של "מחיר בר־השגה" הושמט מהגדרתי שכן התייחסתי רק לצורכי האנרגיה ולא לדרישות האנרגיה, אך אין להתעלם מההכרח ל־affordability. **בתכנון המבקש להשיג ביטחון אנרגטי נדרש לבנות תוכנית במקביל של "פתרונות אי־חרטה" (non-regret solutions).** למשל, הפניית עודפי ייצור של אנרגיה לעודפי ייצור של מים מותפלים. המים ניתנים לאגירה, הם מתחזקים



את האקוויפרים, ופותרים בעיות מחסור בשנות בצורת קשות. זו דוגמה לפתרונות רבים שלהם תרומה חיובית למשק והמפחיתים את ההפסדים בגין השקעות כבדות ברזרבות גדולות.

מבחינה פרקטית, יכולת תכנון משולבת עם פתרונות אי־חרטה וכן עם הזיקה למגזרים נוספים מחייבת קיום מודלים מורכבים שאינם עתה בנמצא. המלצתי במאמר זה על פיתוח מודלים המבוססים על למידה עמוקה ויכולות חישוביות מתקדמות של נתוני עתק (big-data). נוסף על כך חיוני לקיים מו"פ מתמשך בתחום האנרגיה כדי לתת מענה לצרכים עתידיים.<sup>241</sup>

על בסיס מאמר זה ניתן ליזום מהלך לקביעת מתודולוגיה לאומית, בתוך שילוב בעלי העניין ובעלי היכולת, לתכנון מערכות אנרגיה המספקות ביטחון אנרגטי לישראל באופן בר קיימא. פעולה זו חייבת להיות מונהגת על ידי הדרג המדיני, קרי משרד האנרגיה. אך עקב ביזור הידע המקצועי בין גופים שרבים מהם נגועים בניגוד עניינים ביניהם לבין צורכי המדינה, או שאינם יכולים לקיים רציפות תפקודית ושמירת הזיכרון הארגוני, יש להקים מרכז לאומי לאנרגיה שירכז את הנושא ויהווה כלי תומך לדרג המדיני בכל החלטה המבוססת על ידע, מדע וטכנולוגיה.

---

241 לדוגמה, אחת האפשרויות, שאיננה נבדקת לדעתי כראוי בארץ ובעולם (פרט לדרום קוריאה), היא להמיר את הגז הטבעי בגז מעובה המתנזל בטמפרטורות נמוכות, ידיוותי לסביבה ויכול לשמש מיידית כתחליף לסולר. גז כזה ניתן לאגירה יבשתית בהיקף גדול. פתרון זה עדיף לדעתי על הנזלה של גז טבעי (LNG) מבחינה תפעולית ובטיחותית.