

אסטרטגיה

לתכנון אופטימלי

של משק החשמל

צבי אקשטיין, סרגיי סומקין והלה אקסלרד\*

נייר מדיניות 2021.03 / מאי 2021



\* פרופ' צבי אקשטיין הוא ראש מכון אהרן למדיניות כלכלית ודיקן בית ספר טיומקין לכלכלה במרכז הבינתחומי הרצליה, [zeckstein@idc.ac.il](mailto:zeckstein@idc.ac.il). ד"ר סרגיי סומקין וד"ר הלה אקסלרד הם חוקרים בכירים במכון אהרן למדיניות כלכלית.

# מכון אהרן למדיניות כלכלית

## על שם אהרן דוברת ז"ל

חזון מכון אהרן למדיניות כלכלית הוא לתמוך בצמיחה כלכלית ובחזק חברתי בישראל על ידי עיצוב אסטרטגיה והצעות לתוכניות מפורטות למדיניות כלכלית המבוססות על ידע בינלאומי מעודכן.

צמיחה כלכלית הנובעת מגידול בתעסוקה והעלאת הפריון לעובד היא היעד המרכזי של כל המשקים, ובכללם של המשק הישראלי. המדדים המרכזיים לצמיחה כלכלית בת-קיימא – התוצר לנפש, התעסוקה והפריון במשק – נמצאים עדיין ברמה נמוכה מזו המקובלת במדינות המובילות בעולם המפותח. חזון המכון הוא לערוך מחקרים כלכליים אשר יניבו הצעות הן לכלי מדיניות חדשניים והן לרפורמות במשק לקידום הצמיחה, התעסוקה והפריון. מטרת מחקרי המדיניות להשפיע על המדיניות המוניטרית והפיסקלית, תוך גיבוש תוכניות ארוכות טווח שתתמודדנה עם מכלול הבעיות הכלכליות והחברתיות ותתרומנה לצמצום פערים וחזוק החברה והכלכלה. כמו כן, מטרתם להשפיע על השיח המקצועי, לעורר דיון המבוסס על מידע אמין ועל מחקר כלכלי-חברתי ובסופו של דבר להקנות כלים שיתמכו בתוואי של צמיחה ובחוסן החברתי של ישראל.

היעד העיקרי של מכון אהרן למדיניות כלכלית בבית ספר טיומקין לכלכלה הוא בגיבוש אסטרטגיות מדיניות כלכליות אשר מזהות את נקודות החוזק והחולשה של הכלכלה בישראל. על בסיס זה נבנות רפורמות בנושאים רחביים, וכן מחקר המתמקד בענפים שונים כדי לבחון ולהמליץ על שימוש מושכל בכלי מדיניות וסדרי עדיפויות שיגרמו לגידול התעסוקה והפריון בכלל ענפי המשק. במסגרת זו ניתן דגש על חיזוק היתרונות היחסיים של ישראל בחדשנות טכנולוגית, וכן על העצמת ההתייעלות והחדשנות בענפים המסורתיים, ענפי השירותים והסקטור הציבורי. כל זאת נעשה על בסיס מחקרי מוצק והצבת יעדים כמותיים כדי להשיג את חזון המכון.

### ← דירקטוריון:

מר שלמה דוברת (יו"ר), פרופ' מרטין אייכנבאום, גב' יעל אנדורן, פרופ' צבי אקשטיין, גב' דיתה ברוניצקי, מר ארז ויגודמן, גב' ענת לוי, מר צבי לימון, פרופ' רפי מלניק, מר רונן ניר, מר רוני נפתלי, ד"ר טלי רגב, גב' עפרה שטראוס, מר חיים שני.

### ← ראש המכון:

פרופ' צבי אקשטיין.

### ← ועדה מדעית:

פרופ' צבי אקשטיין (יו"ר), פרופ' מרטין אייכנבאום, ד"ר אסף אילת, פרופ' צבי הרקוביץ, ד"ר יניב ידיד לוי, פרופ' עומר מואב, פרופ' רפי מלניק, פרופ' דניאל צידון, ד"ר טלי רגב.

### ← פרטי התקשרות:

המרכז הבינתחומי הרצליה, ת.ד. 167 הרצליה 4610101

טלפון: 09-9602431

דוא"ל: [aaron.economics@idc.ac.il](mailto:aaron.economics@idc.ac.il)

אתר: [www.aiep.idc.ac.il](http://www.aiep.idc.ac.il)

## אסטרטגיה לתכנון אופטימלי של משק החשמל

ביטחון אנרגטי הוא יעד מרכזי במדיניות משק האנרגיה בכל מדינה מפותחת. כדי להשיג ביטחון אנרגטי, תכנון משק החשמל מתמקד בהשגה של שלושה יעדים: אמינות היצע החשמל, תמהיל דלקים מגוון ונקי, ומחיר תחרותי של החשמל. כל שלושת היעדים מגלמים בתוכם את סיכוני אי אספקת החשמל,<sup>1</sup> לכן אי אספקה פיזית של חשמל מהווה מדד מרכזי המשקף ביטחון אנרגטי.

הגדלת שיעור מקורות אנרגיה מתחדשים סירוגיים (שמש ורוח) יוצרת מורכבות בפיתוח וניהול רשת החשמל, מכיוון שמקורות אלה אינם בעלי כושר אספקה רציף, ואינם ניתנים לשליטה מלאה של מנהל המערכת. בהתאם, תכנון משק החשמל לשמירה על הביטחון האנרגטי הופך למורכב יותר, כי יש להבטיח הן עמידה ביעד אמינות אספקת החשמל והן הגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ממקורות סירוגיים. במדינות מפותחות תכנון משק החשמל מתבסס על מודל המאפשר להתייחס בו בזמן לשלושת יעדי משק החשמל: אמינות היצע החשמל, שיעור החשמל שמיוצר מאנרגיות מתחדשות ומחיר תחרותי, ומאפשר לחשב את מחיר החשמל הכלכלי – מחיר המתחשב בתחלופה בין שיעור האנרגיה המתחדשת לאיכות התשתיות ואמינות הרשת. תוצאת התכנון מבוסס מודל של משק החשמל במדינות מפותחות, היא מערכת חשמל עם רמת אמינות גבוהה ואף משתפרת, בד בבד עם שיעור עולה של מקורות אנרגיה מתחדשים.

בישראל עמד בשנת 2019 שיעור אנרגיית השמש והרוח על כ-7%, ויחס הרזרבה הנקוב עמד על כ-33%. יחס רזרבה זה משקף אמינות נמוכה של רשת החשמל, כי הוא נמוך בכ-35 נקודות אחוז בהשוואה ליחס הרזרבה הדרוש לרמה זו של אנרגיות מתחדשות, על פי מדינות האיחוד האירופי.

התוכנית של משרד האנרגיה היא מעבר ל-30% ייצור חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים בשנת 2030, כלומר הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת בכ-23 נקודות אחוז. על פי תוצאות מודל רשות החשמל, העלות העודפת לצרכן החשמל כתוצאה מהגדלת היעד ל-30% אנרגיות מתחדשות (כולל הוספת התועלת מצמצום זיהום האוויר) נעה בין עלות עודפת של כ-2 מיליארדי שקלים לחיסכון של כ-4 מיליארדי שקלים. עם זאת, המודל לא התייחס לתחלופה בין היעדים: החיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת שיעור מקורות אנרגיה מתחדשים אל מול עלות אי אספקת החשמל הנובעת מאמינות הרשת והשקעות בתשתיות. עלות אי אספקה בגין מחסור של הספק מותקן ו/או תקלות ברשת היא עלות משמעותית, אשר בשנתיים האחרונות עומדת על לפחות חצי מיליארד ש"ח בשנה, ונמצאת במגמת עלייה. מכיוון שמחיר החשמל המתקבל במודל של רשות החשמל אינו משקלל בתוכו את עלות אי אספקת החשמל, הרי שהתועלת מהגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ל-30% מוטה כלפי מעלה. מדיניות של הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת, במנותק משיפור אמינות הרשת, עלולה להגדיל את עלות אי האספקה ולהפוך את החיסכון הנובע מצמצום זיהום אוויר ליקר מאוד.

המאפיינים הייחודיים של ישראל – מדינת "אי אנרגטי"<sup>2</sup> עם סיכונים ביטחוניים משמעותיים, איכות ירודה של הרשת (ישנה, עילית), המסתמכת על מקור אנרגיה מתחדשת סירוגי אחד בלבד, מדדים המשקפים רמת אמינות נמוכה – כל אלו מעצימים את אתגרי הניהול של משק החשמל הישראלי, ומגבירים את הצורך ברמת אמינות גבוהה של היצע החשמל, ברזרבה יציבה מספקת, ובפתרונות מוכחים של אגירת חשמל.

<sup>1</sup> מחסור בהספק מותקן, תשתית הולכה/חלוקה רעועה ותנודתיות במחירי הדלקים מסכנים את הביטחון האנרגטי.  
<sup>2</sup> חיבור של ישראל עם מדינות שכנות (חיבור תת-ימי עם קפריסין ויוון) מעלה את הביטחון האנרגטי.

לאור זאת אנו ממליצים לשפר את צעדי המדיניות באופן הבא : 1. לבנות "תוכנית 2030 ואילך" בהתבסס על מודל כמותי למשק החשמל המאפשר לבחון תרחישים שונים של רמת אמינות הרשת, שיעור האנרגיות המתחדשות, עלויות פיתוח, הקמה, תפעול ושדרוג הרשת. מומלץ שיהיה מודל אחד בלבד למשק הישראלי ועל פיו יעבדו כל הגורמים הפעילים בשוק: משרד האנרגיה, רשות החשמל, מנהל המערכת, חברת החשמל, יצרנים ויזמים פרטיים; 2. לבחון את כלל המשמעויות הכלכליות הכרוכות בהצבת יעד של 30% אנרגיות מתחדשות על הביטחון האנרגטי ולחשב את מחיר החשמל תוך התחשבות בתחלופה בין יעדי משק החשמל: חיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת השיעור של מקורות אנרגיה מתחדשים בתמהיל הדלקים מצד אחד, עלות אי אספקת החשמל הנובעת מרמת אמינות הרשת והשקעות בתשתיות ומתקני ייצור מצד שני; 3. לקבוע יעדים מוסכמים ל-2030 לאמינות הרשת ושיעור האנרגיות המתחדשות על ידי בחירה בחלופת השקעה אופטימלית להשגת שלושת היעדים של משק החשמל; 4. להגדיר מדדים מוסכמים ושקופים לצורך מדיניות רציפה להשגת יעדים, ובקרת התפקוד של משק החשמל; 5. להגדיר רגולציה תומכת השגת מדדים והבטחת בקרה, שקיפות ותפקוד יעיל של משק החשמל; 6. להקים מערך בקרה אובייקטיבי הכולל פרסום תקופתי שקוף של מדדים; 7. לקבוע מנגנונים של תמריצים לעמידה של יצרני החשמל ביעדים שנקבעו.

## תוכן העניינים

6	1. סיכום ומסקנות
9	2. תכנון משק החשמל מבוסס מודל כמותי
10	2.1 מודלים לתכנון משק החשמל – המצב בעולם
11	2.2 מודל רשות החשמל
16	3. תחלופה בין תשתיות ואנרגיות מתחדשות לאמינות – ישראל ומדינות מפותחות
16	3.1 תחלופה בין האנרגיות המתחדשות לאמינות במונחי יחס הרזרבה
21	3.2 תחלופה בין האנרגיות המתחדשות לאמינות במונחי דקות אי האספקה
24	4. השפעת עלות אי האספקה על יציבות תוצאות ניתוח עלות-תועלת

## 1. סיכום ומסקנות

ביטחון אנרגטי הוא יעד מרכזי במדיניות משק האנרגיה בכל מדינה מפותחת. ביטחון אנרגטי מוגדר כאספקה רציפה של החשמל לכלל צרכני המשק במחיר תחרותי.<sup>3</sup> כדי להשיג ביטחון אנרגטי, תכנון משק החשמל מתמקד בהשגה של שלושה יעדים: אמינות היצע החשמל, תמהיל דלקים מגוון ונקי ומחיר תחרותי של החשמל. כל שלושת היעדים מגלמים בתוכם את סיכוני אי אספקת החשמל,<sup>4</sup> לכן **אי אספקה פיזית של חשמל מהווה מדד מרכזי המשקף ביטחון אנרגטי.**<sup>5</sup>

בשנים האחרונות היעד של הגדלת שיעור מקורות האנרגיה המתחדשים בתמהיל הדלקים זוכה לחשיבות גבוהה יותר מאשר בעבר. זאת הודות ליתרונות סביבתיים של ייצור החשמל ממקורות אנרגיה נקיים ופיתוחים טכנולוגיים המאפשרים הקמה של מקורות אלה.<sup>6</sup> הגדלת שיעור מקורות אנרגיה מתחדשים סירוגיים (שמש ורוח) יוצרת מורכבות בפיתוח וניהול רשת החשמל, מכיוון שמקורות אלה אינם בעלי כושר אספקה רציף, ואינם ניתנים לשליטה מלאה של מנהל המערכת.<sup>7</sup> בהתאם, תכנון משק החשמל לשמירה על הביטחון האנרגטי הופך למורכב יותר, כי יש להבטיח הן עמידה ביעד אמינות אספקת החשמל והן הגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ממקורות סירוגיים.<sup>8</sup>

בגלל המורכבות התכנונית שמחייבת להתייחס לשלושת יעדי משק החשמל בו בזמן, במדינות מפותחות תכנון משק החשמל מתבסס על מודל כמותי. המודל מאפשר לבחון תרחישים שונים של רמת אמינות הרשת ושיעור האנרגיות המתחדשות, תוך התייחסות לעלויות פיתוח, הקמה, תפעול ושדרוג הרשת. עוד מאפשר המודל לחשב את מחיר החשמל תוך התחשבות בתחלופה בין היעדים: חיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת שיעור מקורות אנרגיה מתחדשים בתמהיל הדלקים מצד אחד, עלות אי אספקת החשמל הנובעת מרמת אמינות הרשת והשקעות בתשתיות ומתקני ייצור מצד שני. השימוש במודל הכמותי מאפשר לבחור חלופת השקעה אופטימלית להשגת שלושת היעדים של משק החשמל בו בזמן ולהגדיר מדדים מוסכמים ושקופים לצורך מדיניות רציפה להשגת יעדים, ובקרה על תפקוד משק החשמל.

**תוצאת התכנון מבוסס מודל של משק החשמל במדינות מפותחות היא מערכת חשמל עם רמת אמינות גבוהה ואף משתפרת, בד בבד עם שיעור עולה של מקורות אנרגיה מתחדשים.**<sup>9</sup> כלומר, הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת ממקורות סירוגיים נעשית במקביל להעלאת אמינות הרשת באמצעות העלאת יחס הרזרבה והורדת דקות אי האספקה.<sup>10</sup> כך לדוגמה בגרמניה שיעור אנרגיית שמש ורוח עלה בכ-20 נקודות אחוז בין השנים 2006–2018, במקביל עלה יחס הרזרבה בכ-100 נקודות אחוז ודקות אי אספקת החשמל ירדו בכ-35%. בדנמרק עלה שיעור אנרגיית שמש ורוח בכ-29 נקודות אחוז, באותן שנים, במקביל עלה יחס הרזרבה ביותר מ-36 נקודות אחוז ודקות אי אספקת החשמל ירדו בכ-30%. בבריטניה עלה שיעור אנרגיית שמש ורוח בכ-20 נקודות אחוז בין 2006 ל-2018, במקביל עלה יחס הרזרבה בכ-16 נקודות אחוז ודקות אי אספקת החשמל ירדו בכ-45%. **בממוצע, עלייה של נקודת אחוז בשיעור אנרגיית שמש ורוח במדינות האיחוד האירופי מתואמת עם עלייה של כ-2.6 נקודות אחוז ביחס הרזרבה הנקוב.**

<sup>3</sup> IEA, <https://www.iea.org/topics/energy-security>, "reliable, affordable access to all fuels and energy sources".

<sup>4</sup> מחסור בהספק מותקן, תשתית הולכה/חלוקה רעועה ותנודתיות במחירי הדלקים מסכנים את הביטחון האנרגטי.

<sup>5</sup> משרד האנרגיה (2020), פרק 15.1, עמ' 150.

<sup>6</sup> דוגמת הידרו, שמש, רוח, ביוגז, ביומאסה.

<sup>7</sup> קיימת הבחנה בין מקורות חשמל אשר זמינותם ודאית באופן יחסי, והם בעלי כושר אספקה רציף שאינו יוצר מורכבות רבה בניהול מערכת החשמל, לבין אנרגיות ממקורות מתחדשים אשר הופעתן סירוגית, לרבות רוח ושמש.

<sup>8</sup> ברוב המדינות המפותחות קיים ניסיון רב בייצור החשמל ממקורות מתחדשים כמו הידרו ואנרגיה גרעינית.

<sup>9</sup> רק בגלל הצורך לשמור על מרכיב היציבות באספקת החשמל על ידי מקורות אנרגיה מתחדשים, יש להעלות את יחס הרזרבה הזמין.

<sup>10</sup> מדד מקור מקובל לבחינת אמינות היצע החשמל הוא יחס הרזרבה. מדד מקובל לבדיקת אמינות האספקה במקטע החלוקה הוא דקות אי האספקה – SAIDI (System Average Interruption Duration Index).

בישראל עמד שיעור אנרגיית השמש והרוח על כ-7% ב-2019, ויחס הרזרבה הנקוב עמד על כ-33%. זהו יחס רזרבה נמוך בכ-35 נקודות אחוז בהשוואה ליחס הרזרבה הדרוש לרמה זו של מתחדשות, על פי מדינות האיחוד האירופי. יחס רזרבה זה מלמד על אמינות נמוכה של רשת החשמל.

התוכנית הנוכחית של משרד האנרגיה היא מעבר ל-30% ייצור חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים בשנת 2030. זוהי, על פי רשות החשמל, מדיניות המאזנת בין: "שאיפותיה של ישראל לעמוד בשורה אחת עם מדינות העולם בהיבטי אנרגיות מתחדשות והצורך להפחית את זיהום האוויר המשקי ובין העלויות, ההשלכות והאתגרים הנובעים מכך".<sup>11</sup>

ואולם, המודל שעל פיו תכננה רשות החשמל את ההגדלה לא התייחס לתחלופה בין היעדים: **החיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת שיעור מקורות אנרגיה מתחדשים אל מול עלות אי אספקת החשמל הנובעת מאמינות הרשת והשקעות בתשתיות**. עלות אי אספקה בגין מחסור של הספק מותקן ו/או תקלות ברשת היא עלות משמעותית, אשר בשנתיים אחרונות עומדת על לפחות חצי מיליארד ש"ח בשנה, ונמצאת במגמת עלייה. מכיוון שמחיר החשמל המתקבל במודל של רשות החשמל אינו משקלל בתוכו את עלות אי אספקת החשמל, הרי שהתועלת מהגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ל-30% מוטה כלפי מעלה. **מדיניות של הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת, במנותק משיפור אמינות הרשת, עלולה להגדיל את עלות אי האספקה ולהפוך את החיסכון הנובע מצמצום זיהום אוויר ליקר מאוד**.

המאפיינים הייחודיים של ישראל – **מדינת "אי אנרגטי" עם סיכונים ביטחוניים משמעותיים, איכות ירודה של הרשת (ישנה, עילית), המסתמכת על מקור אנרגיה מתחדשת סירוגי אחד בלבד, מדדים המשקפים רמת אמינות נמוכה – כל אלו מעצימים את אתגרי ניהול משק החשמל הישראלי, ומגבירים את הצורך ברמת אמינות גבוהה של היצע החשמל, ברזרבה יציבה (קונבנציונלית) מספקת, ובפתרונות מוכחים של אגירת חשמל**.

<sup>11</sup> רשות החשמל (2020), עמ' 8, ס' 27.

## לאור זאת אנו ממליצים לשפר את המודל ולנקוט צעדי מדיניות אלה:

- לבנות "תוכנית 2030 ואילך" בהתבסס על מודל כמותי למשק החשמל המאפשר לבחון תרחישים שונים של רמת אמינות הרשת, שיעור האנרגיות המתחדשות, עלויות פיתוח, הקמה, תפעול ושדרוג הרשת. מומלץ שיהיה מודל אחד בלבד למשק הישראלי ועל פיו יעבדו כל הגורמים הפעילים בשוק: חברת החשמל, יצרנים פרטיים, מנהל המערכת, רשות החשמל ומשרד האנרגיה.
- לבחון את כלל המשמעויות הכלכליות הכרוכות בהצבת יעד 30% אנרגיות מתחדשות (סיכוני הרשת ועלות אי אספקה, מחיר הקרקע, סיכונים רגולטוריים, סיכונים טכנולוגיים, חיסכון בפליטות מזהמים) על הביטחון האנרגטי<sup>12</sup> ולחשב את מחיר החשמל תוך התחשבות בתחלופה בין יעדי משק החשמל: חיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת שיעור מקורות האנרגיה המתחדשים בתמהיל הדלקים מצד אחד, עלות אי אספקת החשמל הנובעת מרמת אמינות הרשת והשקעות בתשתיות ומתקני ייצור מצד שני. נעיר כי על פי ניסיון מדינות ה-EU, הגדלת שיעור החשמל המיוצר ממקורות מתחדשים סירוגיים (רוח ושמש) ב-23 נקודות אחוז, מ-7% ל-30%, מתואמת עם העלאת יחס הרזרבה הנקוב בלפחות כ-60–95 נקודות אחוז והעלאה משמעותית של הספק מותקן בהתאם.<sup>13</sup>
- לקבוע יעדים מוסכמים ל-2030 לאמינות הרשת ושיעור האנרגיות המתחדשות על ידי בחירה בחלופת השקעה אופטימלית להשגת שלושת היעדים של משק החשמל.
- להגדיר מדדים מוסכמים ושקופים לצורך מדיניות רציפה להשגת יעדים ולשם בקרה על התפקוד של משק החשמל.
- להגדיר רגולציה תומכת השגת מדדים והבטחת בקרה, שקיפות ותפקוד יעיל של משק החשמל.
- להקים מערך בקרה אובייקטיבי הכולל פרסום תקופתי שקוף של מדדים.
- לקבוע מנגנונים של תמריצים לעמידה של יצרני החשמל ביעדים שנקבעו.

<sup>12</sup> המלצה דומה נמצאת גם בעבודת יחידת תכנון, פיתוח וטכנולוגיה הנלווית למסמך "הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030" (חברת החשמל, 2020), עמ' 4, בולט 3: נדרשת "בדיקה של תוספת עלויות וחסכון בפליטות מזהמים הנובעות מהגדלת יעד של אנרגיות מתחדשות מ-17% ל-30% בכל אחת מהחלופות שיבדקו". במיוחד, כאשר מתוך 4 חלופות להגדלת שיעור המתחדשות ל-30% שנבחנו על ידי חברת החשמל (עמ' 1):

1. חלופת ייחוס – ללא שילוב של מתקני אגירה בתוכנית הפיתוח;
2. שילוב מתקני אגירה בסוללות בתרחיש עלות גבוהה יחסית;
3. שילוב מתקני אגירה בסוללות בהתאם להנחות רשות החשמל (המניחות בין היתר שעלויות המתקנים נמוכות יחסית);
4. חלופה 2 עם שילוב תוספת מתקני אגירה שאובה.

רק חלופת הפיתוח הראשונה נבדקה באופן מלא הכולל בדיקת יציבות דינמית של מערכת הייצור והגז.

<sup>13</sup> יש לציין כי כל מדינה מתאפיינת באקלים שונה. לכן לכל מדינה יש יכולת שונה לחזות במדויק את שעות הפעילות של מתקני ייצור אנרגיה מתחדשת סירוגית. בהתאם, לכל מדינה נדרש יחס רזרבה שונה לגיבוי ההספק המיוצר על ידי מתקני ייצור באנרגיה מתחדשת סירוגית. מכאן נובע גם קושי למצוא מדינות ייחוס לקביעת מדד יחס הרזרבה.



## 2. תכנון משק החשמל מבוסס מודל כמותי

ביטחון אנרגטי הוא יעד מרכזי במדיניות משק האנרגיה בכל מדינה מפותחת כי להעדרו יש השלכות כלכליות כבדות. ביטחון אנרגטי מוגדר כאספקה רציפה של החשמל לכלל צרכני המשק במחיר תחרותי. כדי להשיג ביטחון אנרגטי, תכנון משק החשמל מתמקד בהשגה של שלושה יעדים: אמינות היצע החשמל, תמהיל דלקים מגוון ונקי, ומחיר תחרותי של החשמל. כל שלושת היעדים מגלמים בתוכם את סיכוני אי אספקת החשמל,<sup>14</sup> לכן **אי אספקה פיזית של חשמל מהווה מדד מרכזי המשקף ביטחון אנרגטי**.<sup>15</sup> בהתאם, תכנון משק החשמל מבוסס על עקרונות מספר: הגדרת יעדי אמינות מוסכמים ורשמיים לגבי הספק זמין בשעות שיא ועלות אי אספקה (VOLL),<sup>16</sup> הבטחת עתודות אסטרטגיות, שיפור המאזן בין ביקוש להיצע באמצעות גיוון תמהיל הדלקים וייעול המסחר, ייעול ניהול הביקושים, שיפור תנאי השקעה בתשתיות, ייצור ומסחר.

אספקה אמינה של חשמל נמצאה תמיד בליבת השיקולים של קובעי המדיניות. אולם, בשנים אחרונות היעד של הגדלת שיעור מקורות האנרגיה המתחדשים זוכה גם הוא לחשיבות גבוהה. בהתאם, תכנון משק החשמל לשמירה על הביטחון האנרגטי הופך למורכב יותר, כי יש להבטיח הן עמידה ביעד האמינות של אספקת החשמל והן הגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ממקורות סירוגיים.<sup>17</sup> בגלל הקושי התכנוני שמחייב להתייחס בו בזמן לכמה יעדים של משק החשמל, אסטרטגיה של תכנון אופטימלי של משק החשמל – הקמת יחידות ייצור חדשות, גריטת יחידות ייצור ישנות, פיתוח ושדרוג רשת החשמל, גיוון תמהיל הדלקים והרחבת השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים – מתבססת על מודל כמותי המאפשר לבחון חלופות השקעה שונות תוך מזעור העלויות הכרוכות בייצור החשמל.

<sup>14</sup> מחסור בהספק מותקן, תשתית הולכה/חלוקה רעועה ותנודתיות במחירי הדלקים מסכנים את הביטחון האנרגטי.  
<sup>15</sup> משרד האנרגיה (2020), פרק 15.1, עמ' 150.

<sup>16</sup> Value of lost load.

<sup>17</sup> ברוב המדינות המפותחות קיים ניסיון רב בייצור החשמל ממקורות מתחדשים כמו הידרו ואנרגיה גרעינית.

## 2.1 מודלים לתכנון משק החשמל – המצב בעולם

לצורך תכנון משק החשמל פותחו מודלים כמותיים המאפשרים לבחור אסטרטגיית תכנון אופטימלית. ישנם שני סוגים עיקריים של מודלים למשק החשמל: א. מודלים של מקסום הרווח ומזעור העלויות (אופטימיזציה) בשיווי משקל עבור יצרן אחד או כמה יצרנים. ב. מודלים של סימולציה כחלופה של פתרון בעיה מורכבת מכדי להיות מטופלת במסגרת מודל שיווי משקל פורמלי.

מודל משק החשמל (The Electricity Market Model - EMMA) הינו מודל שיווי משקל טכנו-כלכלי המשמש ככלי מדיניות לבחינת תרחישים שונים של פיתוח משק החשמל, תחזית למחיר החשמל ובחירה בחלופת השקעה אופטימלית. המודל שפותח עבור שוק החשמל של צפון-מערב אירופה (צרפת, בלגיה, הולנד ולוקסמבורג, גרמניה ופולין)<sup>18</sup> ממקסם רווח וממזער את עלות ייצור החשמל, בכפוף למגבלות רבות ומעריך מחיר חשמל שעת, תוך התחשבות במסחר בין המדינות. המודל כולל שישה מיליון משתנים, מגבלות רבות (כגון קרקע, שטח, מגבלות של תשתיות רשת). המודל כתוב ב-GAMS, ונפתר על ידי Cplex במחשב תוך כעשר דקות. משתני ההחלטה של המודל כוללים את היקף הייצור השעתי מכל טכנולוגיית ייצור, היקף האחסון, היקף הסחר, היקף ההשקעה השנתית בתשתיות וטכנולוגיות הייצור, כולל במקורות אנרגיה מתחדשים. פרמטרים אקסוגניים של ביקוש והיצע במודל כוללים את הביקוש השעתי לחשמל, מספר מתקני הייצור, קיבולת התשתית, תמהיל הדלקים, עלות הדלקים, עלות CO<sub>2</sub> ופליטות אחרות, עלות ההון, עלות התפעול ועלויות קבועות ומשתנות אחרות הכרוכות בייצור, הולכה ואחסון.<sup>19</sup>

גם המודלים שפותחו עבור מדינות מפותחות נוספות דוגמת בריטניה (מדינת אי),<sup>20</sup> אירלנד (מדינת אי),<sup>21</sup> שוודיה, דנמרק ופינלנד בוחנים כיצד תרחישים שונים של פיתוח משק החשמל משפיעים על יעדי משק החשמל – יעדי אמינות, יעדים סביבתיים, יעדי תחרותיות, במחיר תחרותי (Klevnäs, Hansen and Danielsson, 2016). מודלים אלה מאפשרים לתכנן באופן אופטימלי את משק החשמל:

- לבחון תרחישים שונים של רמת אמינות הרשת, תמהיל הדלקים ושיעור האנרגיות המתחדשות, עלויות פיתוח, הקמה, תפעול ושדרוג הרשת.<sup>22</sup>
- לחשב את מחיר החשמל תוך התחשבות בתחלופה בין היעדים: חיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת השיעור של מקורות אנרגיה מתחדשים בתמהיל הדלקים מצד אחד, עלות אי אספקת החשמל הנובעת מרמת אמינות הרשת והשקעות בתשתיות ומתקני ייצור מצד שני.
- לבחור חלופת השקעה אופטימלית להשגת שלושת היעדים של משק החשמל.
- להגדיר מדדים מוסכמים ושקופים לצורך מדיניות רציפה להשגת יעדים ולשם בקרה על תפקוד משק החשמל.

<sup>18</sup> Hirth (2017).

<sup>19</sup> Hu et al. (2016); Ventosa et al. (2005).

<sup>20</sup> Watson et al. (2018).

<sup>21</sup> אירלנד הציבה את הנושא של אמינות היצע החשמל כנושא מרכזי במדיניות משק החשמל וערכה רפורמות בנושא (DCCAE, 2019). מאז שנת 2017 הוצב יעד שאפתני להפחתת פליטות CO<sub>2</sub> יחד עם יעד אמינות היצע החשמל. זאת בגלל העלייה בסיכונים הכרוכים בייצור החשמל מאנרגיה מתחדשת לא יציבה ויכולת אגירה מצומצמת.

<sup>22</sup> במסגרת מדיניות משק החשמל בבריטניה נבחנו ארבעה תרחישים למשק החשמל (Watson et al., 2018).

בנוסף לתכנון מבוסס מודל של משק החשמל, מדינות מפותחות (דנמרק, אירלנד, הולנד, פינלנד ושוודיה, כמו גם בריטניה וגרמניה) משתמשות במנגנון קנסות/תגמולים על עמידה ביעד האמינות.<sup>23</sup> מטרת המנגנון היא לשמור על רמת אמינות גבוהה של אספקת החשמל הן במקטע ההולכה והן במקטע החלוקה, תוך שימוש במדדי אמינות כגון הפרעות ארוכות טווח, מתוכננות ולא מתוכננות, ודקות אי אספקה עבור חברות הולכה וחברות חלוקה.<sup>24</sup> מנגנון התמריצים מבוסס על השוואת עלות ההפרעות בפועל לקריטריון הייחוס. אמינות גבוהה יותר מקריטריון הייחוס מזכה בתגמול, אמינות נמוכה יותר מקריטריון הייחוס מלווה בקנסות. תוצאת התכנון האופטימלי של משק החשמל במדינות מפותחות היא מערכת חשמל עם רמת אמינות גבוהה ואף משתפרת, ושיעור עולה של מקורות אנרגיה מתחדשים.<sup>25</sup>

## 2.2 מודל רשות החשמל<sup>26</sup>

בשנת 2019 עמד אחוז האנרגיה המתחדשת מסך צריכת החשמל בישראל על כ-6.7%, והוא נמוך בהשוואה למדינות אירופה (כ-46% במדינות הסמן וכ-31% במדינות האיחוד האירופי). לבקשת שר האנרגיה בחנה רשות החשמל את האפשרות של הגדלת יעד הייצור מאנרגיות מתחדשות לשנת 2030 מ-17% ל-30%.

### א. סוג המודל ותרשימים שנבדקו

הבחינה התבססה על מודל המאפשר לערוך סימולציות של ניתוח עלות-תועלת עבור חלופות השקעה שונות לפיתוח משק החשמל. בנייתו עלות-תועלת, רשות החשמל בחנה שישה תרחישים: יעד של 17%, 25%, ו-30% אנרגיות מתחדשות, בשני תמהילים של יחידות ייצור: יחידות ייצור מוטות קרקע / יחידות ייצור מוטות שימוש דואלי בדלקים.

### ב. מרכיבים מרכזיים של המודל

מודל רשות החשמל לקח בחשבון מרכיבים חשובים, ביניהם:

- פוטנציאל השטח הדרוש לצורך ייצור 17%/25%/30% חשמל מאנרגיות מתחדשות.
- עלות ההקמה והתפעול של יחידות ייצור חדשות.
- השקעות ברשת החשמל אחרי פריסה של יחידות ייצור החשמל מאנרגיה מתחדשת.
- עלות סביבתית הנובעת מפליטות של גזי חממה ומזהמים.

<sup>23</sup> Council of European Energy Regulators (2016), פרקים 2.7–2.9, עמ' 50–79.

<sup>24</sup> מבוסס על מדד דקות אי אספקה SAIDI – System Average Interruption Duration Index. מדד SAIDI משמש להערכת אמינות האספקה במקטע החלוקה. המדד מחושב באמצעות סכימה של מכפלת ההספק המותקן שהופסק בזמן המחושב להפסקה על פני כל הפסקות החשמל שנרשמו בזמן נתון, חלקי סך ההספק המותקן ברשת (המשמש כקירוב למספר הלקוחות). המדד מחושב על בסיס חודשי או שנתי.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Installed Capacity Interrupted} \cdot \text{Time of Interruption}}{\text{Total Installed Capacity in the System}}$$

להערכת אמינות האספקה במקטע ההולכה משמש מדד Average Interruption Time – AIT, והוא משקף את האנרגיה הבלתי מסופקת במהלך שנה במונחי דקות. המדד מחושב על ידי מכפלה של מספר הדקות בשנה ביחס שבין האנרגיה הבלתי מסופקת לסך הצריכה השנתית.

<sup>25</sup> אקשטיין, סומקין ואקסלרד (2020).

<sup>26</sup> רשות החשמל (2020).

## ג. הנחות המודל

### הנחה לגבי תחזית לקצב הגידול בביקוש

מודל רשות החשמל מניח שקצב הגידול בביקוש לחשמל משנת 2020 ואילך יעמוד על 2.8% בשנה (משמעות ההנחה היא שבשנת 2030 הייצור השנתי של חשמל צפוי לעמוד על כ-98.2 TWh).

נציין כי קצב הגידול בביקוש לחשמל בעשר השנים האחרונות (2009–2019) עמד על כ-3.1% ובחמש השנים האחרונות (2014–2019) על כ-3.4% – גבוה מקצב הביקוש של 2.8% שמונה במודל.<sup>27</sup> אם בשנים 2020–2030 יעמוד קצב הגידול בביקוש לחשמל על כ-3.1% (רק 0.3 נקודות אחוז מעל 2.8%), בשנת 2030 הייצור השנתי של חשמל צפוי לעמוד על כ-101.6 TWh, שהם כ-3.4 TWh יותר מאשר תחת ההנחה של 2.8%.<sup>28</sup> הספק מותקן שנדרש לכסות על תוספת ייצור של 3.4 TWh (לא כולל תוספת של 19% עבור רזרבה) הינו כ-400 MW.<sup>29</sup>

עוד נציין כי בשנת 2010 הוערך כי העמידה ביעד של 10% אנרגיות מתחדשות בשנת 2020 מצריכה הספק מותקן בהיקף של כ-2,760 MW, בעוד שבפועל כיום נדרש הספק מותקן של כ-3,800 MW על מנת להשיג את היעד. אי העמידה ביעד האנרגיות מתחדשות בשנת 2020 נובע בחלקו הגדול מקצב גידול **גבוה מהמצופה** בביקוש לחשמל.

אין מחלוקת כי **הנחה לגבי קצב הגידול בביקוש לחשמל היא קריטית לתכנון אופטימלי של משק החשמל והימנעות ממחסור בחשמל. אי הוודאות לגבי קצב הגידול השנתי בביקוש לחשמל מחייב הצבת יעדים תקופתיים מוסכמים לגבי הספק מותקן משקי, יחס הרזרבה המשקי – המבטחים ביטחון אנרגטי ועונים על צורכי המשק.**

<sup>27</sup> רשות החשמל (2019א).

<sup>28</sup> על פי תחזית הביקוש לחשמל של חברת הייעוץ BDO (הרצוג, 2016) קצב הגידול בביקוש לחשמל בשנים 2020–2030 יעמוד על כ-3.8%. תרחיש "גידול גבוה" של רשות החשמל (2019ב, עמ' 11) מניח קצב גידול שנתי של 3.7% בביקוש לחשמל. בתרחיש זה, בשנת 2030 הייצור השנתי של חשמל צפוי לעמוד על כ-108 TWh, שהם כ-10 TWh יותר מאשר תחת הנחה של 2.8%. הספק מותקן שנדרש לכסות על תוספת ייצור של 10 TWh הינו כ-1,100 MW. **כלומר, הבדל של כ-1% בקצב הגידול בביקוש לחשמל עלול לגרום על פני תקופה של 10 שנים למחסור בהספק מותקן בהיקף שמייצרים 3 מתקני ייצור בעלי הספק של כ-450 MW.**

<sup>29</sup> לצורך ההשוואה: הספק מותקן קונבנציונלי של מתקני הייצור הפרטיים הנמצאים כיום בהקמה עומד על כ-1,481 MW ומורכב מהספק מותקן של: אופיסי חדרה בע"מ (148 MW), תחילת פעילות – יולי 2020, <https://www.opc-energy.com/>, אי.פי.אם באר טוביה בע"מ (451 MW), תחילת פעילות – פברואר 2021, <https://www.themarker.com/dynamo/premium-1.9528806>, אתגל (186 MW), מועד חיבור צפוי – דצמבר 2022, צומת אנרגיה בע"מ (396 MW), מועד חיבור צפוי – פברואר 2023). משך הזמן להקמת מתקן ייצור חשמל הוא ארוך ומוערך בכ-10 שנים ואף יותר, ראו למשל עבור אי.פי.אם באר טוביה בע"מ:

<https://www.themarker.com/dynamo/1.4217059>

[https://www.gov.il/BlobFolder/policy/41607/he/Files\\_Hachlatot\\_41607.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/policy/41607/he/Files_Hachlatot_41607.pdf)

פרק הזמן מסגירה פיננסית עד לחיבור לרשת בלבד הינו כ-3.5 שנים.

**הנחה לגבי הספק מותקן נדרש מאנרגיית שמש כדי לעמוד ביעד אנרגיות מתחדשות של 30%**

בשנים 2012–2019 הוקם בישראל הספק מותקן מאנרגיה מתחדשת (רובה שמש) בהיקף של כ-2,300 MW. בשנת 2020, הספק מותקן מאנרגיה מתחדשת צפוי לעמוד על כ-3,800–3,900 MW. בהנחה שקצב הגידול בביקוש לחשמל יעמוד על 2.8%, כדי לעמוד ביעד אנרגיות מתחדשות של 30% בשנת 2030 נדרש להקים הספק מותקן מאנרגיית שמש בהיקף של כ-15,800 MW. כלומר **בעשור הקרוב יש להקים הספק מותקן מאנרגיית שמש בהיקף של כ-12,000 MW** – פי 3 גבוה יותר מאשר ההספק שהותקן בעשור הקודם. אם קצב הגידול בביקוש לחשמל יעמוד על 3.8% בשנה, כדי לעמוד ביעד אנרגיות מתחדשות של 30% בשנת 2030 יידרש להקים הספק מותקן מאנרגיית שמש בהיקף של 13,600 MW – כמעט פי 4 יותר מאשר ההספק שהותקן בעשור הקודם.

נציין שמכיוון שאנרגיית שמש היא מקור אנרגיה סירוגי (לא יציב) ותלוי מזג אוויר, הקמת הספק מותקן מאנרגיית שמש מחייבת, במקביל, הקמת הספק מותקן קונבנציונלי המגבה את אספקת החשמל ממקור סירוגי בשעות שבהן אין ייצור ו/או פתרונות אגירה מוכחים,<sup>30</sup> וכפועל יוצא הגדלת יחס הרזרבה המשקי. מכאן שגם הגדלת הספק מותקן מאנרגיית שמש מחייבת הצבת יעד מוסכם תקופתי לגבי יחס הרזרבה המשקי.

#### **ד. היקף השטח הנדרש להקמת הספק מותקן מאנרגיית שמש בשיעור 30%**

קביעת יעד שיעור אנרגיות מתחדשות קובעת הספק מותקן נדרש מאנרגיית שמש שמחייב הקצאת שטח בהיקף מספיק. כדי לעמוד ביעד 30% אנרגיה מתחדשת נדרש, כאמור, להקים הספק מותקן מאנרגיית שמש בהיקף של לפחות 12,000 MW – עבורם יש להקצות שטחים בהיקף של מעל 120 אלף דונם.<sup>31</sup> על פי הבחינה של רשות החשמל לגבי השטחים הקרקעיים:

- סך הפוטנציאל הריאלי של שטחים בתוכניות המאושרות מוערך בכ-13,758 דונם.
  - סך הפוטנציאל של שטחים בתוכניות בהליכי תכנון עד שנת 2030 מוערך בכ-21,162 דונם.
- פוטנציאל השטחים הקרקעיים בתוכניות מאושרות ובתוכניות בהליכי תכנון (סה"כ כ-35,000 דונם) מהווה כ-30% מהשטח הנדרש, ומאפשר לעמוד ביעד של כ-17% אנרגיה מתחדשת בשנת 2030.**
- נציין כי האזורים שבהם קיים פוטנציאל קרקעי זמין (מחוץ לדרום) מתאפיינים לרוב בחוסר ביקוש מקומי לחשמל, ונמצאים במרחק רב מאזורי ביקוש. לכן הקמת מתקני ייצור פוטו-וולטאיים מחייבת פיתוח של רשת ההולכה לשם העברת האנרגיה המיוצרת לאזורי הביקוש, בעיקר במרכז הארץ.
- על פי הבחינה של רשות החשמל לגבי שטחים דואליים:
- סך הפוטנציאל של שטחי גגות מבנים לשנת 2030 עומד על כ-42,000 דונם, מהם כ-63% בבנייני מגורים.
  - סך הפוטנציאל של קירווי מאגרי מים ובריכות דגים עומד על כ-46,000 דונם (קירווי של כ-390 מאגרים קיימים יכול לספק כ-21,000 דונם, בנייה של מאגרי מים חדשים בעשור הקרוב וקירווי שלהם יכולים לספק פוטנציאל של כ-21,100 דונם, קירווי בריכות דגים יכול להגדיל עוד יותר את הפוטנציאל).

<sup>30</sup> סך כל ההספק הכולל של מתקני האגירה (ללא מתקנים לשירותים נלווים) בשנת 2030 מוערך בכ-1,000–3,000 MW, תלוי בחלופת השקעות נבחרת (חברת החשמל, 2020, עמ' 2).

<sup>31</sup> מונח כי כיום יחס ההמרה בין שטח להספק מותקן בטכנולוגיה פוטו-וולטאית הוא כ-10 דונם ל-1 MW הספק מותקן (בשטחים קרקעיים כ-11 דונם ל-1 MW מותקן, בשטחים דואליים כ-9 דונם ל-1 MW מותקן).

**מימוש הפוטנציאל של כל השטחים הדואליים – גגות, מאגרי מים, בריכות דגים (המימוש בפועל עד סוף שנת 2020 עומד על הספק קטן מאוד) – כרוך בצעדי מדיניות רציפים להתרת החסמים וקידום ההקמה.** הקצאת שטחים בהיקף של כ-120 אלף דונם לצורך העמידה ביעד של 30% אנרגיה מתחדשת כוללת שטחים קרקעיים בתוכניות בהליכי תכנון ושטחים דואליים שלהכשרתם לא הושלמו הליכים רגולטוריים. השלמת הליכי תכנון והליכים רגולטוריים נמשכת זמן רב ומגלמת אי ודאות לגבי מועד שחרור הקרקע להקמת הספק מותקן מאנרגיות מתחדשות. **לצורך בחינת היתכנות העמידה ביעד של 30% אנרגיות מתחדשות: א. יש להחשב להעריך את הסתברות המימוש של תרחיש שחרור הקרקעות הנדרשות במועד נדרש,<sup>32</sup> ב. יש להתחשב בעלות הקרקעות בחישוב עלות-תועלת, ג. מוצע לקבוע מדדים לשחרור הקרקע עבור הספק מותקן מתחדש, ופיתוח הרשת לקליטת הספק זה.**

#### **ה. אי ודאות הכרוכה בפיתוח רשת החשמל**

בתכנון מערכת הולכת החשמל קיימות אי ודאות לגבי הפרויקטים שיחוברו לרשת – מספרם, היקפם, פריסתם הגאוגרפית, ובמיוחד מועד כניסתם למערכת. אי ודאות זו גדלה עם הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת בגלל ביזור ייצור החשמל. המדדים המשקפים אי ודאות זו הם:

- משך זמן ממוצע של קידום תוכנית מפורטת לקו מתח-על עליון העומד על 9.9 שנים ולקווי מתח עליון העומד על 2.1 שנים.
- משך זמן ממוצע מקבלת החלטה על הצורך בתחנת משנה חדשה ועד להשלמתה הוא כ-10 שנים.

**כיום קצב הפיתוח של מקטע ההולכה נמוך מקצב הפיתוח של מקטע הייצור, ובנוסף "אין הלימה בין אזורי פיתוח מאושרים סטטוטוריים להקמת אנרגיות מתחדשות לבין תוכניות סטטוטוריות לחיבורם לרשת",<sup>33</sup> מה שמוביל למצב שבו לא יתאפשר לחבר אתר ייצור חדש ולא יתאפשר לענות על ביקוש, מה שמגדיל את הסיכון של אי אספקת החשמל. מצב זה מחייב הצבת יעדים מוסכמים של לוחות זמנים לקידום פרויקטים לפיתוח הרשת, להקמת כלל ההספק המותקן החדש, לשחרור השטח והקמת הספק מותקן מתחדש, ליחס הרזרבה ודקות אי אספקה של חשמל.**

#### **ו. תוצאות ניתוח עלות-תועלת של המודל**

על פי תוצאות הניתוח, העלות העודפת לצרכן החשמל כתוצאה מהגדלת היעד ל-30% אנרגיות מתחדשות נעה בין שלושה לתשעה מיליארד שקלים, שהם כ-1% מסך העלויות המוכרות בתעריף החשמל בתקופת המודל. הוספת התועלת מצמצום זיהום האוויר מביאה לטווח של בין עלות עודפת של כ-2 מיליארד שקלים לחיסכון של כ-4 מיליארד שקלים. ביחס ליעד של 25% העלות העודפת לצרכן החשמל נעה בין 200 מיליון לכ-2.5 מיליארד שקלים. תוספת התועלת מצמצום זיהום האוויר מביאה לטווח שנע בין עלות עודפת של כ-2.2 מיליארד שקלים לחיסכון של כ-1 מיליארד שקלים.

לאור תוצאות אלה, עמדת רשות החשמל היא כי "קביעת יעד של 30% ייצור באנרגיה מתחדשת בשנת 2030 היא מדיניות המאזנת בין שאיפותיה של ישראל לעמוד בשורה אחת עם מדינות העולם בהיבטי אנרגיות מתחדשות והצורך להפחית את זיהום האוויר המשקי ובין העלויות, ההשלכות והאתגרים הנובעים מכך".<sup>34</sup>

<sup>32</sup> משרד האנרגיה (2020), פרק 15.3.2, עמ' 155.

<sup>33</sup> בלמס (2020), שקף 39, סעיף 2.

<sup>34</sup> בפגישה 3 של ועדת היגוי "יעדי משק האנרגיה לשנת 2050" שנתקיימה בחודש אוגוסט 2020 עדכן מנכ"ל משרד האנרגיה, אודי אדירי, כי שר האנרגיה אישר את תמהיל הדלקים ל-2030 – אנרגיה מתחדשת 30%, וסגירת תחנות כוח פחמיות.

## ז. מגבלות המודל

מודל הסימולציות של ניתוח עלות-תועלת לא התייחס לתחלופה בין הגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת לאיכות תשתיות מערכת החשמל ואמינות הרשת. בפרט, בניתוח עלות-תועלת לא כומתו או לא הוחזקו כקבועים פרמטרים חשובים המשפיעים באופן משמעותי על אי אספקה של חשמל, כמו:

- גיל הרשת, שיעור הקווים מתחת לפני השטח.
- עלות שדרוג הרשת הקיימת (כגון: הטמנה באדמה, הוספת קווים) הדרושה לשמירה על ביטחון אנרגטי ועמידה ביעד אמינות הרשת.
- עלות הקמת הספק מותקן חדש, שדרוש לעמידה ביעד אמינות הרשת.<sup>35</sup>
- עלויות הפיתוח הנדרשות ברשת החלוקה (במיוחד זו הנדרשת לקליטת האנרגיה המתחדשת).
- עלות הכרוכה בהוספת אמצעים לייצוב המערכת.
- עלויות משתנות של תמהיל הדלקים (מחירים דינמיים של יכולת האגירה, מחירים דינמיים של עלות ייצור החשמל מאנרגיית שמש במתקני ייצור גדולים/בינוניים/קטנים). הרי מחיר אנרגיית שמש אינו אחיד ותלוי במקום הייצור – חווה/גג/קרקע וגודל המתקן).
- עלות אי אספקת החשמל. מצב של אי אספקה הוא לא מצב תאורטי אלא בעל הסתברות חיובית לקרות עקב סיכון אי אספקת חשמל כתוצאה מקצב העלייה בביקוש לחשמל מעל קצב ההקמה של הספק מותקן (הכולל סיכון אי עמידה בלוחות זמנים של הקמת הספק מותקן נדרש קונבנציונלי ומתחדש), סיכון אי אספקת חשמל הקשור לשיבושים בפעילות של יחידת ייצור (למשל בגלל הסתמכות על מקור אנרגיה מתחדשת סירווגי אחד בלבד), סיכון אי אספקת חשמל עקב תת-השקעה ברשת, התיישנות הרשת, אי יציבות הרשת או סיכון ביטחוני. עלות אי אספקה משפיעה מהותית על קבלת החלטות בבחירת חלופה של תמהיל הדלקים.

מחיר החשמל לצרכן נגזר מעלויות ייצור ואספקת החשמל. מכיוון שמחיר החשמל המתקבל במודל הסימולציות של רשות החשמל אינו משקלל בתוכו את סיכונים אי האספקה ועלות אי אספקת החשמל הרי שהתועלת מהגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות ל-30% עלולה להיות מוטת כלפי מעלה ותכנון משק החשמל להשגת יעד זה עלול להיות לא אופטימלי.

נציין עוד כי העקרונות המרכזיים לפיתוח הרשת הם שרידות, אמינות ויתירות המערכת. קריטריונים של התכנון מגדירים את המצבים התפעוליים השונים שהמערכת צריכה להתמודד עימם ולספק את החשמל מבלי לגרום נזק לציוד המערכת והלקוחות. מודל הסימולציות של רשות החשמל אינו מציב יעדי אמינות, ולכן אינו מגלם תמריצים או עונשים על עמידה ביעדים אלה או חריגה מהם.

בפרק הבא אנו מציגים ממצאים מניתוח של רמת התשתיות, אמינות רשת החשמל ושיעור האנרגיות המתחדשות במדינות מפותחות שבהן תכנון משק החשמל נעשה בהתבסס על מודל המאפשר להתייחס בו בזמן לשלושת יעדי משק החשמל: אמינות היצע החשמל, שיעור החשמל שמוצר מאנרגיות מתחדשות ומחיר תחרותי, ולחשב את מחיר החשמל הכלכלי, קרי מחיר החשמל שמתחשב בתחלופה בין שיעור האנרגיה המתחדשת לאיכות התשתיות ואמינות הרשת.

<sup>35</sup> נציין כי תחזית הביקוש לחשמל במודל הסימולציות של רשות החשמל מתבססת על צפי צמיחה בתוצר בשיעור של 3.2% בשנה. קיימים גורמים מספר שעשויים להביא לגידול בביקוש לחשמל בשנים הקרובות, ובראשם המעבר לתחבורה חשמלית.

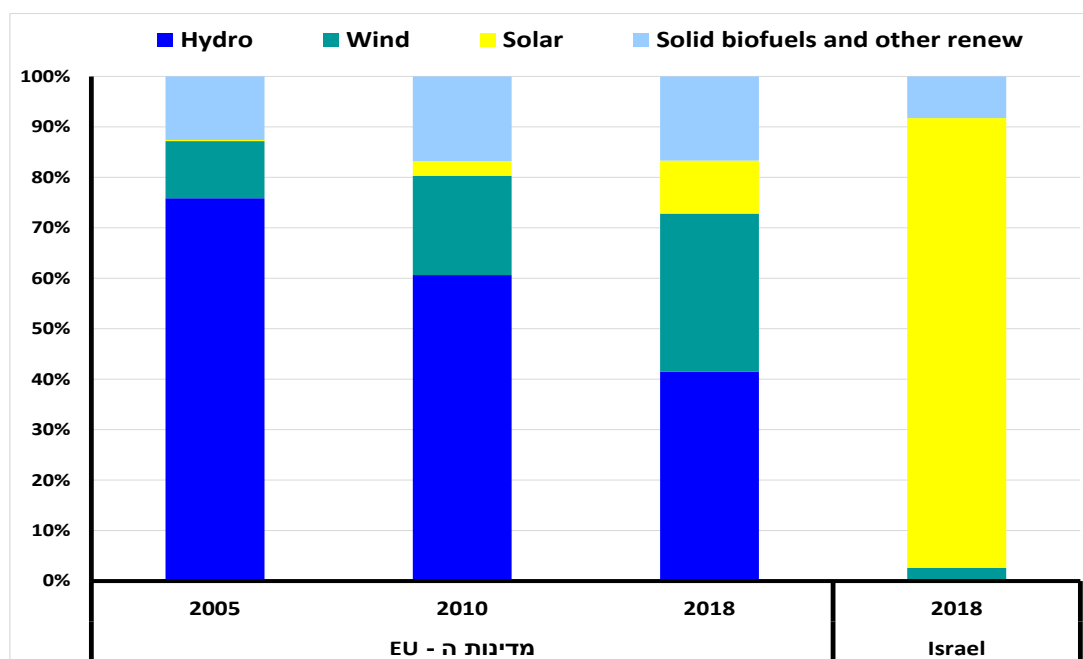
### 3. תחלופה בין תשתיות ואנרגיות מתחדשות לאמינות – ישראל ומדינות

#### מפותחות

#### 3.1 תחלופה בין האנרגיות המתחדשות לאמינות במונחי יחס הרזרבה

אחד ממדדי המקרו המקובלים לבחינת אמינות היצע החשמל הוא מדד יחס הרזרבה – היחס שבין ההספק המותקן לביקוש לחשמל בשעות השיא. על מנת לבחון את השפעת ההגדלה של שיעור האנרגיות המתחדשות על אמינות אספקת החשמל בחנו את השינויים שחלו במדינות מפותחות באירופה בשיעור האנרגיה המתחדשת, יחס הרזרבה ודקות אי אספקת החשמל. יש לציין כי בשונה ממדינות אחרות שנהנות מכמה מקורות של אנרגיה מתחדשת, בישראל לא קיים פוטנציאל לייצור אנרגיה מתחדשת ממקורות קבועים, כגון מקורות הידרו-אלקטריים וגאותרמיים. בישראל, 92% ממקורות האנרגיה המתחדשים אינם יציבים (שמש 89% ורוח 3%), זאת לעומת מדינות האיחוד האירופי שבהן יש תמהיל של מגוון מקורות אנרגיה מתחדשת (אזור 1). לאורך השנים, ההידרו משמש כעוגן יציב ומשמעותי של אנרגיה מתחדשת באיחוד האירופי (76% בשנת 2005, 42% בשנת 2018), ובשנים 2008–2018 חל גידול משמעותי בשימוש באנרגיית רוח (31% בשנת 2018) ואנרגיית שמש (11% בשנת 2018). ישראל לעומת זאת נאלצת להתבסס על מקור אנרגיה מתחדשת אחד שאינו יציב, מה גם שאין ניסיון בינלאומי משמעותי בתחום.

איור 1: מקורות אנרגיה מתחדשת בישראל ובמדינות האיחוד האירופי



מקור: רשות החשמל.



לצורך עמידה ביעד של 30% אנרגיות מתחדשות תיוצר תוספת ההספק שתדרש ברובה המוחלט במתקני ייצור סולריים, מה שיהפוך את ישראל לאחת המדינות המובילות בעולם בכמות הייצור הסולרי מתוך סך הייצור.<sup>36</sup>

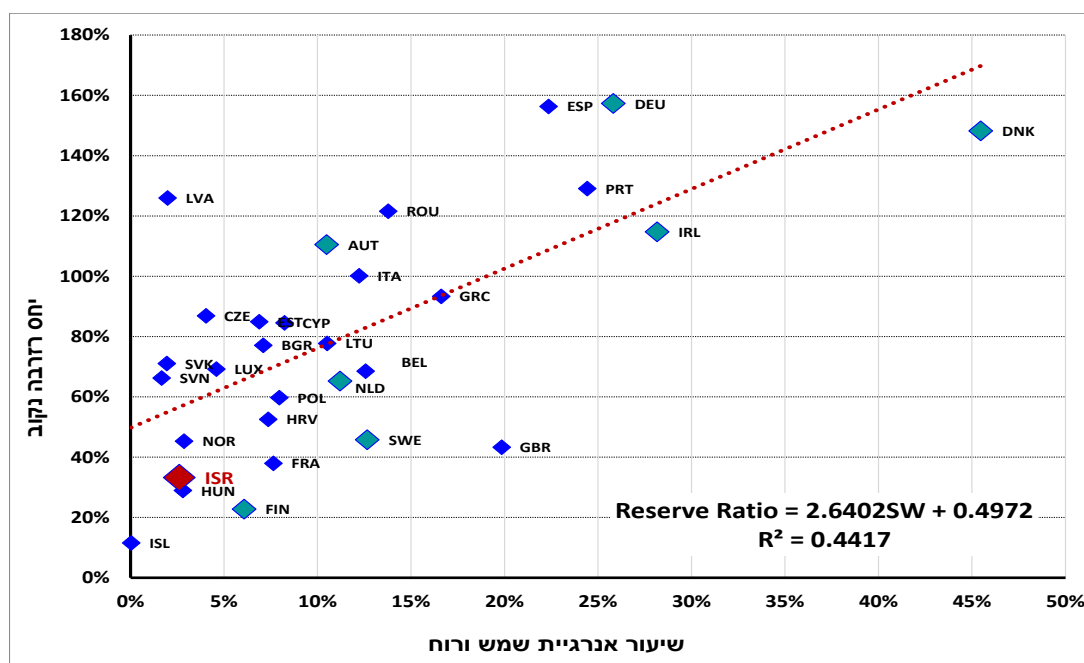
למרות היתרונות הסביבתיים של ייצור החשמל ממקורות שמש ורוח, קיימת מורכבות בפיתוח וניהול רשת חשמל המסתמכת באופן ניכר על מקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים, כאלה שאינם ניתנים לשליטה על ידי מנהל המערכת ואינם בעלי כושר אספקה רציף.<sup>37</sup> זאת הסיבה לכך שהגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת ממקורות לא יציבים נעשית במדינות המפותחות, במקביל להעלאת יעדי האמינות. הרי רק בגלל הצורך לשמור על מרכיב היציבות באספקת החשמל על ידי מקורות אנרגיה מתחדשים יש להעלות את יחס הרזרבה הזמין.<sup>38</sup>

תכנון משק החשמל ברוב המדינות המפותחות מבוסס מודל אשר מותאם לבחינה של תרחישי תחלופה בין שיעור מקורות אנרגיה מתחדשת לאיכות התשתיות ואמינות היצע החשמל. מדדים בינלאומיים מקובלים לבחינת האמינות של היצע החשמל הם:

- מדד יחס הרזרבה – היחס בין ההספק המותקן לביקוש לחשמל בשעות השיא.
- מדד דקות אי האספקה, אשר מראה למשך כמה דקות בשנה הופסק, בממוצע, הלקוח מאספקת החשמל.

איור 2 מציג את הקשר בין שיעור אנרגיית שמש ורוח (שני מקורות אנרגיה לא יציבים) לבין יחס הרזרבה הנקוב עבור ישראל ומדינות ה-EU.

איור 2: תחלופה בין שיעור אנרגיית שמש ורוח ליחס רזרבה נקוב, 2018



מקור: רשות החשמל.

<sup>36</sup> IEA, [https://www.iea.org/data-and-](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=NETHLAND&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel)

<sup>36</sup> IEA, [statistics?country=NETHLAND&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=NETHLAND&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel). למשל באוסטריה 79% אנרגיות מתחדשות ורק 2% מהן מבוססות על שמש, ובהולנד 20% אנרגיות מתחדשות, ורק 5% מהן מבוססות על שמש.

<sup>37</sup> קיימת הבחנה בין מקורות חשמל אשר זמינותם ודאית באופן יחסי והם בעלי כושר אספקה רציף שאינו יוצר מורכבות רבה בניהול מערכת החשמל, לבין אנרגיות ממקורות מתחדשים אשר הופעתן סירונית, לרבות רוח ושמש.

<sup>38</sup> בעיה זו יכולה להיפתר בחלקה על ידי טכנולוגיות של אגירה. לכן יש חשיבות רבה לשימוש בטכנולוגיות אגירה לצורך הגמשת מערך הייצור.

הקשר בין שיעור אנרגיית שמש ורוח (שני מקורות אנרגיה סירוגיים) לבין יחס הרזרבה הנקוב מלמד: א. יחס הרזרבה הנקוב<sup>39</sup> הממוצע למדינה עם שיעור אנרגיית שמש ורוח 7% הינו כ-68%. ב. שעלייה של נקודות אחוז בשיעור אנרגיית שמש ורוח מתואמת עם עלייה של כ-2.64 נקודות אחוז ביחס הרזרבה הנקוב. לעומת זאת בישראל, שבה שיעור אנרגיית השמש והרוח עומד על כ-7%, יחס הרזרבה הנקוב עומד על כ-33% בלבד – כ-35 נקודות אחוז פחות מיחס הרזרבה הממוצע. בהקשר זה ניתן לציין כי צוואר הבקבוק של משק החשמל בישראל הוא בשיא החורף ולא בשיא הקיץ, ובשיא החורף הזמינות של אנרגיות מתחדשות (שמש) נמוכה מזמינותה בקיץ.

בהשוואה בינלאומית, נראה כי יחס הרזרבה הנקוב של ישראל נותן אמינות נמוכה יחסית לרשת החשמל לעומת מדינות אירופה. על פי ניסיון מדינות ה-EU, הגדלת שיעור החשמל המיוצר ממקורות מתחדשים סירוגיים (רוח ושמש) ב-23 נקודות אחוז (בישראל מ-7% ל-30%) מתואמת עם העלאת יחס הרזרבה הנקוב בלפחות 60–95 נקודות אחוז והעלאה משמעותית של הספק מותקן בהתאם.<sup>40</sup>

**המאפיינים הייחודיים של ישראל – מדינת "אי אנרגטי" עם סיכונים ביטחוניים משמעותיים,<sup>41</sup> איכות ירודה של הרשת (ישנה, עילית), הסתמכות על מקור אנרגיה מתחדשת סירוגי אחד בלבד – מעצימים את אתגרי ניהול משק החשמל, מעלים עוד יותר את הצורך א. ברמת אמינות גבוהה מאוד של היצע החשמל, ב. ברזרבה יציבה (קונבנציונלית) מספקת, ג. בפתרונות מוכחים של אגירת חשמל.<sup>42</sup>**

**מכיוון שהמאפיינים הייחודיים של ישראל מקטינים את מידת הגמישות המשקית בקליטת אנרגיות מתחדשות, צעדי מדיניות שמוכוונים להגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת חייבים להיעשות במקביל להגדלת האמינות של היצע החשמל והגדלת גמישות תפעולית עתידית.<sup>43</sup>**

ניתוח נתונים של כמה מדינות אירופאיות מפותחות מעלה כי הגדלת השיעור של מקורות אנרגיה מתחדשים סירוגיים הוא תהליך הנעשה במקביל להגדלת יחס הרזרבה בצורה ניכרת. באיורים 3–5 מוצגים נתונים של גרמניה, דנמרק ובריטניה. בגרמניה עלה שיעור אנרגיית השמש והרוח מ-5.4% בשנת 2006 עד כמעט 26% בשנת 2018. עלייה זו, כמעט פי 5, לוותה בשילוש יחס הרזרבה מרמה של כ-50% לרמה של מעל 150%, על מנת להבטיח עמידה ביעד אמינות ושמירה על ביטחון אנרגטי (איור 3).

<sup>39</sup> מדובר ביחס רזרבה נקוב ולא זמין. יחס רזרבה נקוב אינו לוקח בחשבון יחידות תקולות וישנות שאינן באמת זמינות לספק חשמל בעת הצורך. כלומר, יחס הרזרבה הנקוב אינו משקף באופן מלא את הרזרבה הזמינה בפועל, שעלולה להיות נמוכה יותר.

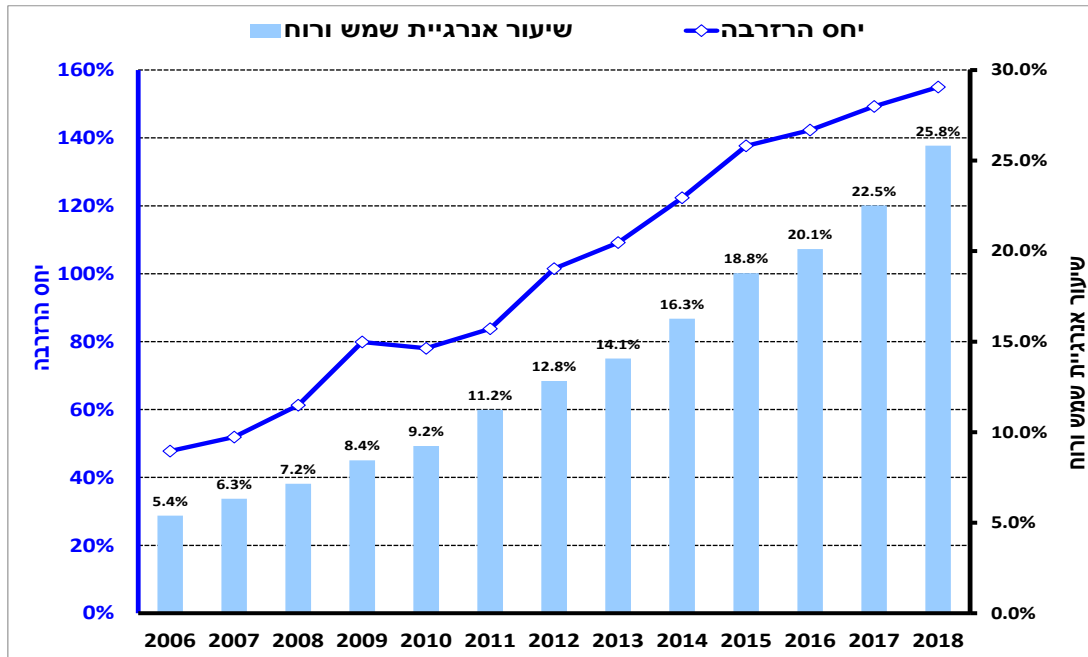
<sup>40</sup> יש לציין כי כל מדינה מתאפיינת באקלים שונה, לכן לכל מדינה יש יכולת שונה לחזות במדויק את שעות הפעילות של מתקני ייצור באנרגיה מתחדשת סירוגית. בהתאם, לכל מדינה נדרש יחס רזרבה שונה לגיבוי ההספק המיוצר על ידי מתקני ייצור באנרגיה מתחדשת סירוגית. מכאן נובע גם קושי למצוא מדינות ייחוס לקביעת מדד יחס הרזרבה.

<sup>41</sup> חיבור של רשת החשמל לרשתות של מדינות שכנות מאפשר העברת עודפי חשמל (כולל בשעות שבהן הייצור באנרגיות מתחדשות עולה על הביקוש), ומנגד קליטת חשמל בשעות מחסור שבהן הביקוש לחשמל עולה על ההיצע.

<sup>42</sup> קיומם של מגוון מקורות מתחדשים בכלל ומקורות סירוגיים בפרט מקל על בעיית אמינות היצע החשמל ועל שילובן של אנרגיות מתחדשות במשק. העדר הגיוון במקורות אנרגיה מתחדשת והסתמכות על מקור אנרגיה מתחדשת סירוגי אחד בלבד חושפים את משק החשמל לבעיית אספקה לא רציפה של חשמל על פני שעות היממה ועונות השנה.

<sup>43</sup> חברת החשמל (2020), עמ' 3, סי' 1.4.

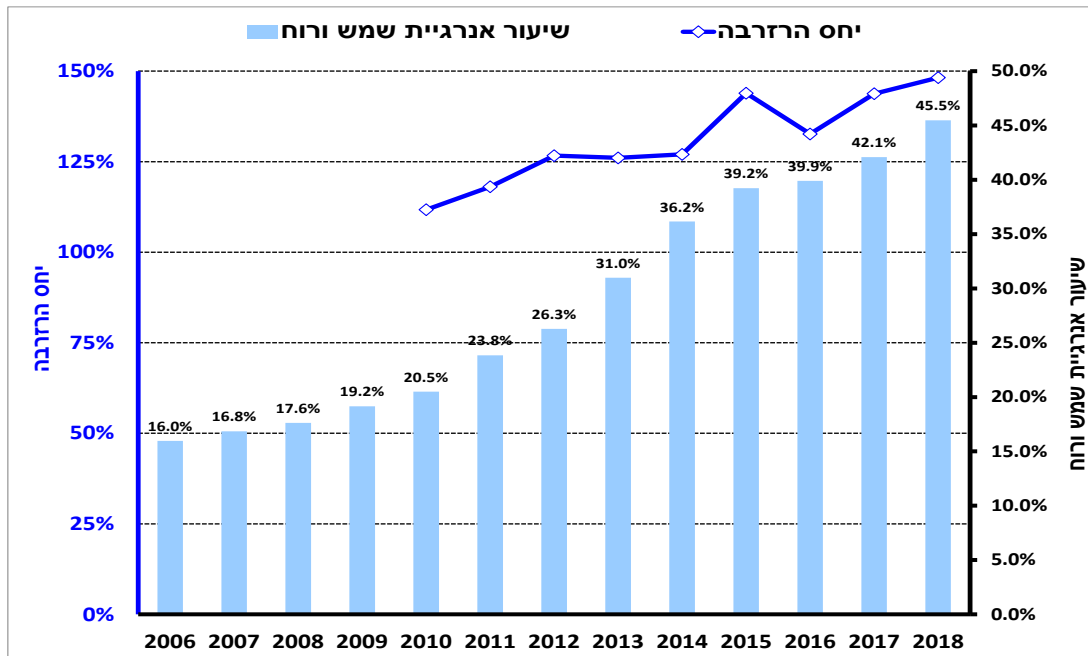
איור 3: גרמניה, יחס הרזרבה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: EU (Eurostat), EU-entsoe.

בדנמרק שיעור אנרגיית שמש ורוח של 46% בשנת 2018 מלווה ביחס רזרבה של כמעט 150%, על מנת להבטיח עמידה ביעד אמינות ושמירה על ביטחון אנרגטי (איור 4).

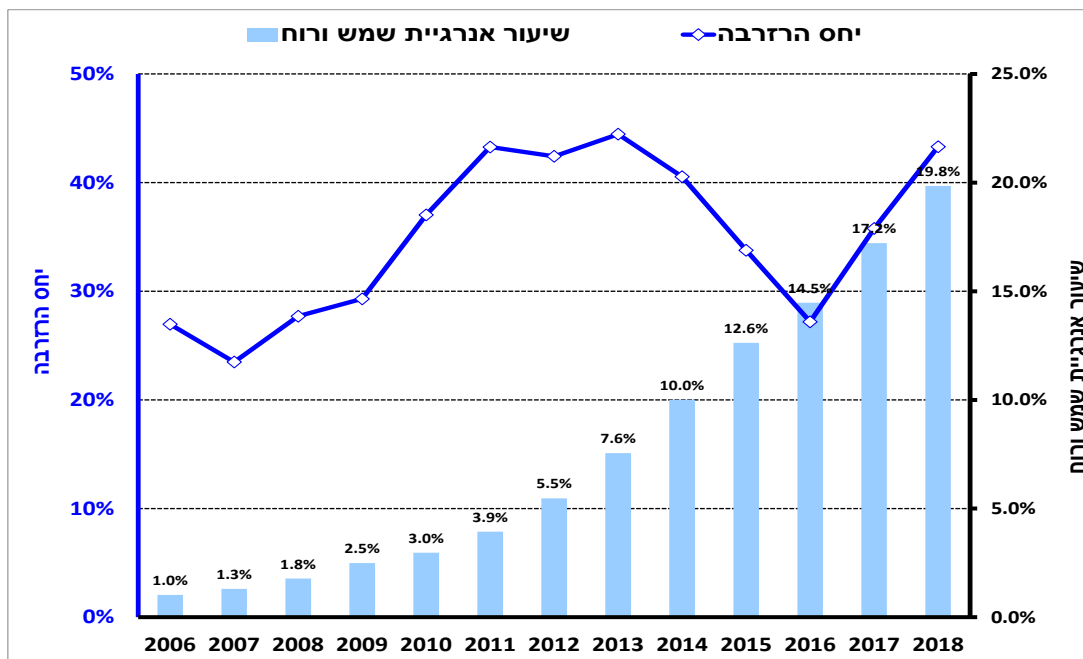
איור 4: דנמרק, יחס הרזרבה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: EU (Eurostat), EU-entsoe, Danish Energy Association.

בבריטניה שיעור אנרגיית השמש והרוח היה כ-15% בשנת 2016, אז חלה צניחה ביחס הרזרבה לרמה של כ-38%. עם העלייה בשיעור האנרגיות המתחדשות עד 20% בשנת 2018 חלה עלייה של יחס הרזרבה לכ-45% (איור 5).

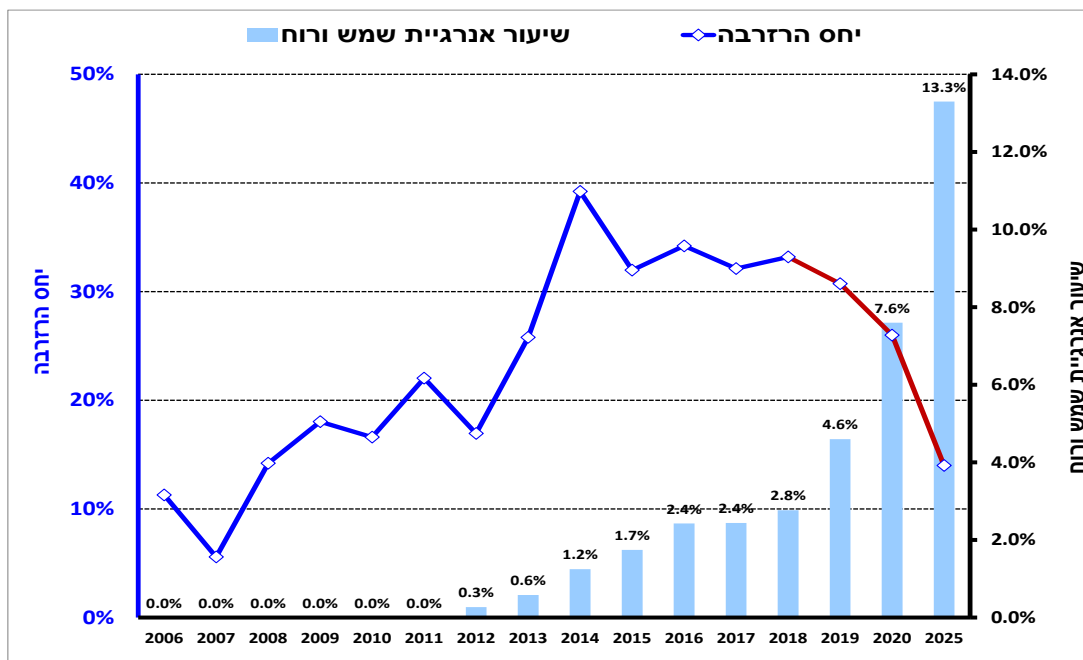
איור 5: בריטניה, יחס הרזרבה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: EU : Eurostat, EU-entsoe, Digest of UK Energy Statistics (DUKES): electricity

לעומת מדינות אלה, בישראל ניתן לראות שעם העלייה בשיעור אנרגיית השמש מאז 2012 הייתה עלייה מסוימת בשיעור יחס הרזרבה עד שנת 2014, ומשנה זו יחס הרזרבה יורד וצפוי להמשיך לרדת, על פי המודל הנוכחי, גם בשנים הקרובות (איור 6, תחזית ירידה ביחס הרזרבה עד שנת 2025).

איור 6: ישראל, יחס הרזרבה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים

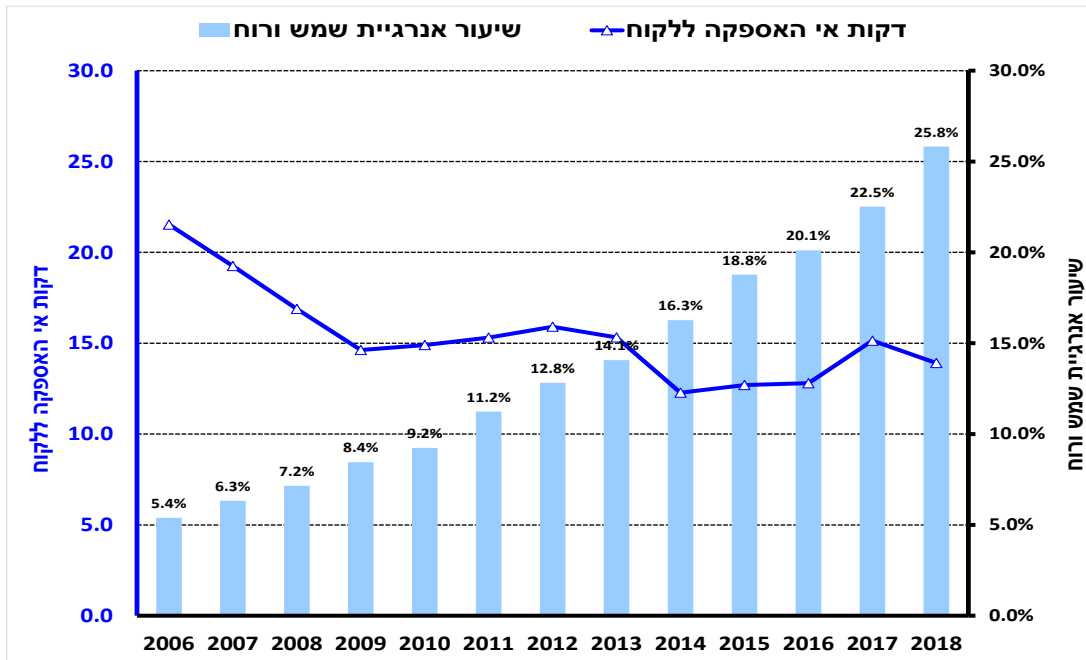


מקור: רשות החשמל.

### 3.2 תחלופה בין האנרגיות המתחדשות לאמינות במונחי דקות אי האספקה

כשמתבוננים על נתוני דקות אי אספקה, רואים מגמה דומה לזו שהוצגה במדד יחס הרזרבה. מדד דקות אי אספקה מחושב כממוצע ללקוח, ונחשב מדד מקובל ליעד האמינות. הנתונים עבור המדינות גרמניה, דנמרק ובריטניה המוצגים באיורים 7–9 מראים שמדיניות משולבת של הגדלת השיעור של מקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים נעשית במקביל לשיפור מדד דקות אי האספקה. כך בגרמניה, העלייה מ-5.4% אנרגיית שמש ורוח בשנת 2006 עד כמעט 26% בשנת 2018 לוותה בירידה מ-23 ל-14 דקות אי אספקה בממוצע ללקוח (איור 7).

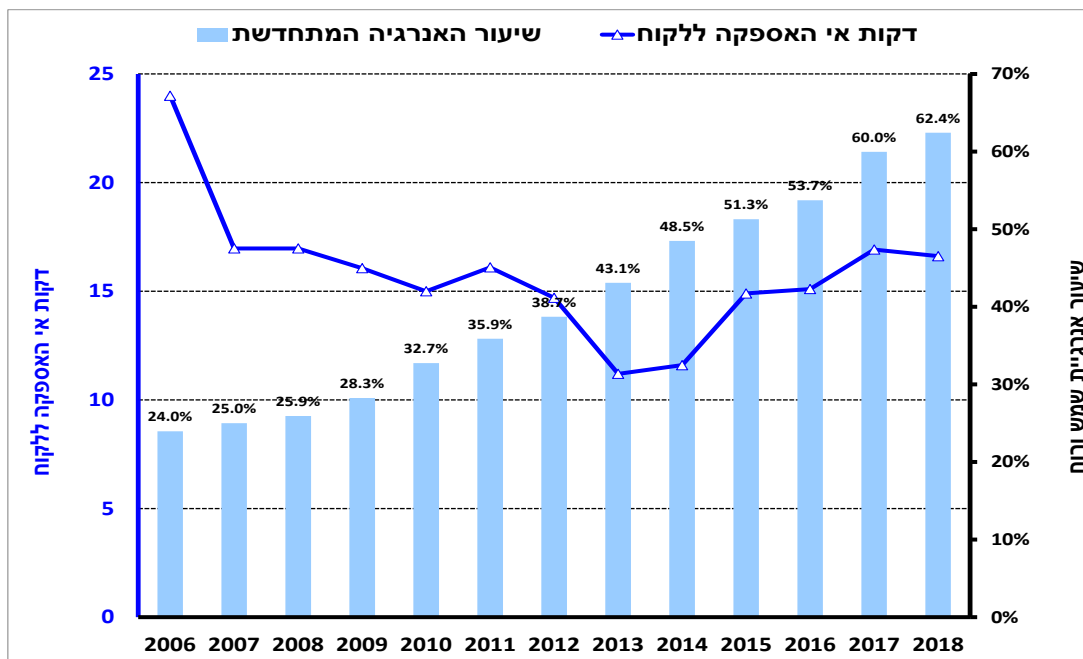
איור 7: גרמניה, דקות אי אספקה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: CEER, (Electricity networks - supply interruption figures) Bundesnetzagentur, (Eurostat) EU

בדנמרק, העלייה מ-24% אנרגיית שמש ורוח בשנת 2006 עד מעל 62% בשנת 2018, לוותה בירידה מ-24 ל-17 דקות אי אספקה בממוצע ללקוח (איור 8).

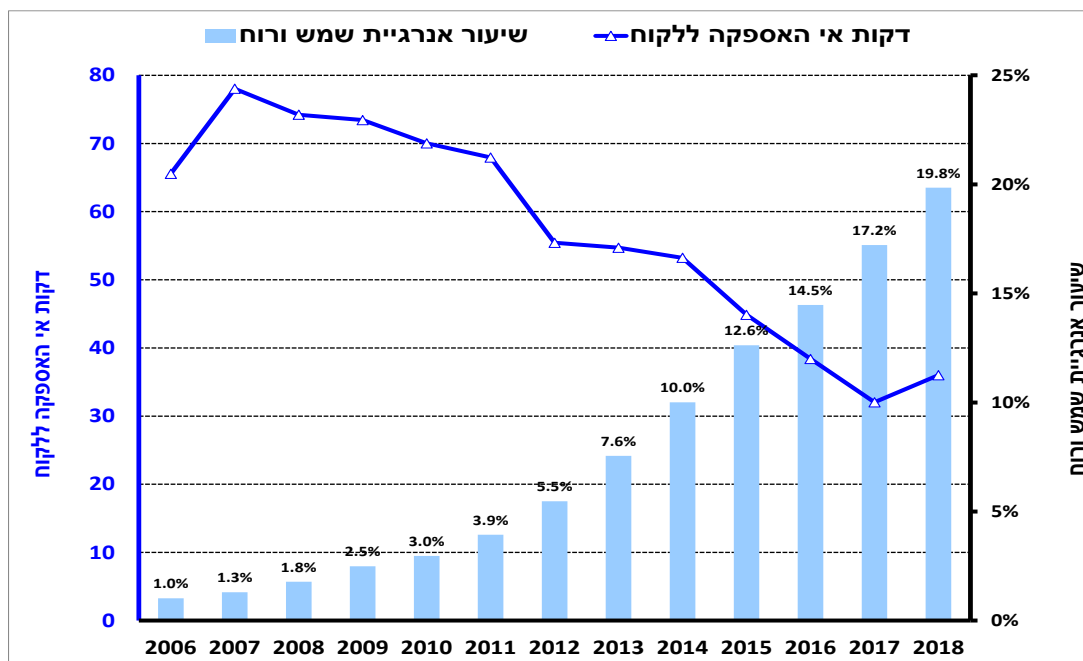
איור 8: דנמרק, דקות אי אספקה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: CEER, Danish Energy Association, (Eurostat) EU.

לבסוף, בבריטניה, העלייה מ-1% אנרגיית שמש ורוח בשנת 2006 עד כמעט 20% בשנת 2018, לוותה בצניחה של כ-50%, מרמות של כ-70-80 דקות אי אספקה בממוצע ללקוח לרמות של פחות מארבעים (איור 9).

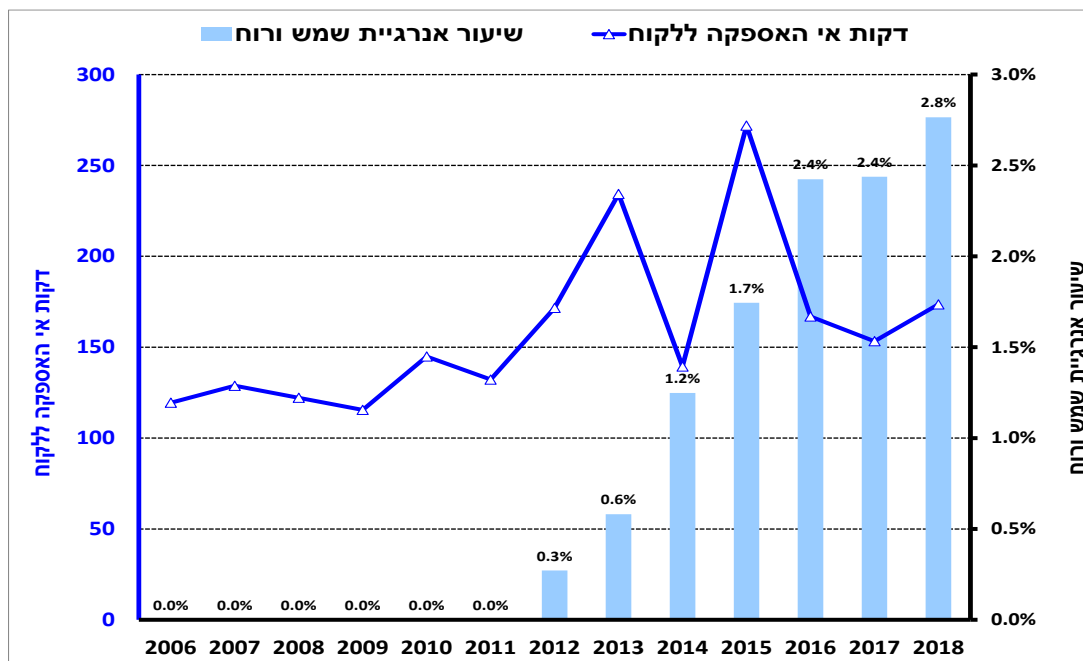
איור 9: בריטניה, דקות אי אספקה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: CEER, Digest of UK Energy Statistics (DUKES): electricity, (Eurostat) EU.

בישראל עמד בשנת 2018 מספר דקות אי האספקה על כ-174 (ברמת אנרגיות מתחדשות רוח וشمש של כ-3%), והוא גבוה משמעותית מהמדינות המפותחות. הסיכון הוא שערכי מדד דקות אי האספקה צפויים לעלות בשנים הקרובות, סיכון שמתגבר עם הגדלת אחוז האנרגיות המתחדשות (איור 10).

איור 10: ישראל, דקות אי אספקה ומקורות אנרגיה מתחדשים לא יציבים



מקור: רשות החשמל.

הממצאים לעיל מלמדים כי מדינות הנוקטות מדיניות של הגדלת האחוז של מקורות הייצור הסירוגיים פועלות במקביל לשיפור תשתיות הרשת ושמירה, ואף הגדלה, של יחס הרזרבה.<sup>44</sup>

<sup>44</sup> בנוסף לצעדים אלה, לצורך הטמעת מקורות אנרגיה סירוגיים ננקטים צעדים כגון ייצור מנגנונים לניהול גמיש של הביקוש וההיצע, קידום פיתוח טכנולוגיות של אגירת אנרגיה ואמצעים לייצוב הרשת.

#### 4. השפעת עלות אי האספקה על יציבות תוצאות ניתוח עלות-תועלת

בפרק זה נבחן את היציבות של תוצאות ניתוח עלות-תועלת במודל רשות החשמל ביחס לתרחיש של אי אספקת חשמל.

בהיות החשמל גורם ייצור חשוב, עלות של אי אספקת חשמל עלולה להיות לא זניחה. לכן פגיעה באספקת החשמל עלולה להסב נזקים גדולים, כלכליים ואחרים, לצרכני החשמל. אי אספקה של חשמל מתרחשת כאשר הביקוש לחשמל גבוה יותר מהיצע החשמל. אי אספקה של חשמל יכולה להיגרם בגלל שתי סיבות עיקריות:

- **מחסור בהספק מותקן** – מצב שבו אין מספיק הספק מותקן זמין כדי לענות על צורכי הביקוש. מצב זה עלול להתרחש כאשר קצב ההקמה והחיבור של הספק מותקן אינו מותאם לקצב הגידול בביקוש לחשמל, קצב הפיתוח של רשת ההולכה ו/או החלוקה נמוך יותר מקצב הפיתוח של מתקני ייצור.
- **תקלות ברשת ההולכה או החלוקה** – מצב שבו יש מספיק הספק מותקן כדי לענות על צורכי הביקוש אולם התקלות ברשת ההולכה או החלוקה (למשל בשל התיישנות הרשת, שיעור גבוה של רשת עילית ועוד) גורמות לאי אספקה של חשמל.

המצב של אי אספקת חשמל אינו מצב תאורטי אלא בעל הסתברות חיובית לקרות עקב אי ודאות בקצב הגידול בביקוש לחשמל, אי הודאות לגבי העמידה בלוחות זמנים של הקמה וחיבור של הספק מותקן חדש, התיישנות הרשת ואי יציבות הרשת הקשורה להגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת.

האומדן של משרד האנרגיה לעלות אנרגיה בלתי מסופקת עודכן בפעם האחרונה בשנת 2011. על פי עדכון זה העלות המשוקללת לקוטי"ש בלתי מסופק היא 121 ש"ח בגין עלייה בתדירות ההפסקות, ו-111 ש"ח בגין עלייה במשך זמן אי האספקה.<sup>45</sup> העלות המעודכנת (בעזרת מדד המחירים לצרכן) של משרד האנרגיה לשנת 2020 עומדת על 127 ש"ח בגין עלייה בתדירות הפסקות החשמל, ו-117 ש"ח לקוטי"ש בגין עלייה במשך זמן אי האספקה.<sup>46</sup>

#### אומדן לעלות אי אספקה בגין מחסור בהספק מותקן

המשמעות של הבדל של 1% בתחזית לגבי קצב הגידול בביקוש לחשמל על פני תקופה של 10 שנים הוא מחסור אפשרי בהספק מותקן זמין בהיקף של כ-1,200 MW. מכאן שניתן להעריך את העלות המשקית מאי אספקת החשמל כתוצאה ממחסור בהספק מותקן זמין: כ-152 מיליון ש"ח עבור שעת אי אספקה אחת, וכ-53 מיליארד ש"ח עבור 365 שעות אי אספקה.<sup>47</sup>

#### אומדן לעלות אי אספקה עודפת בגין דקות אי אספקה שמקורן תקלות ברשת

העלות העודפת בגין אי אספקת חשמל כתוצאה מתקלות ברשת מחושבת על פי הסטייה בכל שנה של האנרגיה הבלתי מסופקת מיעד אמינות האספקה. יעד האמינות שבו נעשה שימוש עבור משק החשמל עומד על 140 דקות אי אספקה, והוא לא עודכן מאז שנת 2002.<sup>48</sup>

<sup>45</sup> לאחר הצמדה למדד המחירים לצרכן – בשנת 2020 עמדה העלות המשוקללת לקוטי"ש בלתי מסופק על כ-134 ש"ח בגין עלייה בתדירות ההפסקות, וכ-123 ש"ח בגין עלייה במשך זמן אי האספקה.

<sup>46</sup> משרד האנרגיה (2020), פרק 15.1, עמ' 158.

<sup>47</sup> חישוב עבור שעה אחת: 1,200 MW כפול 126 ש"ח לקוטי"ש לא מסופק. חישוב עבור 365 שעות: 1,200 MW כפול 126 ש"ח לקוטי"ש לא מסופק וכפול 365 שעות.

<sup>48</sup> מבקר המדינה (2018), עמ' 428–437.



לוח 1: אומדן עלות אי אספקת חשמל

שנה	עלות ריאלית בגין אי אספקה של 1 קוט"ש (121 ש"ח בשנת 2011)	דקות אי אספקה	דקות אי אספקה עודפות (ביחס ליעד אמינות 140 דקות)	אנרגיה בלתי מסופקת עודפת (מיליוני קוט"ש) <sup>49</sup>	עלות עודפת בגין דקות אי אספקה עודפות (מיליארדי ש"ח)
2010	117	145	5	538	63
2011	121	132	-8	-857	-104
2012	123	172	32	3,472	427
2013	125	234	94	10,362	1,295
2014	126	139	-1	-66	-8
2015	125	272	132	14,494	1,808
2016	124	167	27	2,956	367
2017	124	153	13	1,461	182
2018	125	174	34	3,692	463
2019	126	184	44	4,846	613

מקור: רשות החשמל ועיבודי מכון אהרן.

**העלות המצטברת הישירה<sup>50</sup> בשל העלייה בהיקף האנרגיה הבלתי מסופקת** (מעבר ל-140 דקות) בשנים 2010–2019 נאמדת בכ-4 מיליארד ש"ח. קרוב ל-30% מעלות זאת היא בגין העלייה בדקות אי האספקה בשנתיים האחרונות.

על פי תוצאות הניתוח העלות העודפת לצרכן החשמל כתוצאה מהגדלת היעד ל-30% אנרגיות מתחדשות (כולל הוספת התועלת מצמצום זיהום האוויר) נעה בין עלות עודפת של כ-2 מיליארדי שקלים לחיסכון של כ-4 מיליארדי שקלים.

אולם ניתוח העלות-תועלת לא התייחס לתחלופה בין החיסכון בפליטות מזהמים הנובע מהגדלת השיעור של מקורות אנרגיה מתחדשים בתמהיל הדלקים לבין עלות אי אספקת החשמל כתוצאה מרמה נמוכה של אמינות הרשת והשקעות בתשתיות. עלות אי אספקה בגין מחסור של הספק מותקן ותקלות ברשת היא עלות משמעותית אשר בשנתיים אחרונות עומדת על כ-0.5 מיליארד ש"ח ונמצאת במגמת עלייה. מכאן שהגדלת שיעור האנרגיה המתחדשת, ללא שיפור אמינות הרשת, עלולה להגדיל עוד יותר את עלות אי האספקה, ולהפוך את החיסכון הנובע מצמצום זיהום האוויר ליקר מאוד.

<sup>49</sup> 190 דקות אי אספקה שוות ערך לכ-20,878 מיליוני קוט"ש בלתי מסופקים. מכאן שדקת אי אספקה אחת שוות ערך לכ-110 מיליוני קוט"ש בלתי מסופקים (מבקר המדינה, 2018, עמ' 433).

<sup>50</sup> העלות הישירה בגין הגידול באנרגיה הבלתי מסופקת.

## מקורות

1. אקשטיין, צ', סי' סומקין וה' אקסלרד (2020), "אתגרי משק האנרגיה 2030", מכון אהרן למדיניות כלכלית, <https://www.idc.ac.il/he/research/aiep/pages/energy-2030.aspx>.
2. בלמס, י' (2020), "פיתוח רשת החשמל של ישראל", מצגת חברת החשמל, <https://www.youtube.com/watch?v=o89wj13gvjA>.
3. הרצוג, חן (2016), "תחזית הביקוש לחשמל 2017–2030", חברת BDO Consulting Group, <https://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2016/11/%D7%AA%D7%97%D7%96%D7%99%D7%AA-%D7%94%D7%91%D7%99%D7%A7%D7%95%D7%A9-%D7%9C%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-BDO.pdf>.
4. חברת החשמל (2020), "הגדלת יעדי הייצור באנרגיה מתחדשת ל-30% בשנת 2030", [https://www.gov.il/BlobFolder/reports/2030\\_final/he/Files\\_pirsumim\\_nilve\\_yehidat\\_ta\\_pat\\_hahi.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/reports/2030_final/he/Files_pirsumim_nilve_yehidat_ta_pat_hahi.pdf).
5. מבקר המדינה (2018), "חברת החשמל לישראל בע"מ, פיתוח רשת החשמל ותחזוקתה", <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/69a/2018-69a-303-Chashmal.pdf>.
6. משרד האנרגיה (2020), "מתודולוגיה לבדיקות כלכליות במשק האנרגיה", [https://www.gov.il/he/departments/publications/Call\\_for\\_bids/methodology\\_economic](https://www.gov.il/he/departments/publications/Call_for_bids/methodology_economic).
7. רשות החשמל (2019א), "דוח מצב משק החשמל לשנת 2019".
8. רשות החשמל (2019ב), "מפת דרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל 2018–2030", [https://www.gov.il/he/departments/general/mapat\\_derech](https://www.gov.il/he/departments/general/mapat_derech).
9. רשות החשמל (2020), "הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030", [https://www.gov.il/BlobFolder/reports/2030\\_final/he/Files\\_pirsumim\\_2030\\_f\\_10.08.20\\_20\\_paper.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/reports/2030_final/he/Files_pirsumim_2030_f_10.08.20_20_paper.pdf).
10. Council of European Energy Regulators (2016), "6th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply", <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/d064733a-9614-e320-a068-2086ed27be7f>.
11. DCCAE (2019), "Implementation Plan for Ireland, to Meet the Requirements of the Recast Electricity Market Regulation 2019/94", prepared for DG ENER Opinion, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/market\\_reform\\_plan\\_ireland.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/market_reform_plan_ireland.pdf).
12. Hirth, L. (2017), "The European Electricity Market Model EMMA Model Documentation", Neon Neue Energieökonomik GmbH, 1–17, <https://neon.energy/emma-documentation.pdf>.

13. Hu, Y., Z. Bie, T. Ding and Y. Lin (2016), “An NSGA-II Based Multi-objective Optimization for Combined Gas and Electricity Network Expansion Planning”, *Applied energy* 167, 280–293.
14. Klevnäs, P., M. B. Hansen, and C. V. U. Danielsson (2016), “Electricity Market Design for a Reliable Swedish Power System”, Copenhagen Econ.
15. Ventosa, M., A. Baillo, A. Ramos and M. Rivier (2005), “Electricity Market Modeling Trends”, *Energy policy* 33(7), 897–913,  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.013>.
16. Watson, J., I. Ketsopoulou, P. Dodds, M. Chaudry, S. Tindemans, M. Woolf and G. Strbac (2018), “The Security of UK Energy Futures”, UKERC Research Report.