

אכפס

פליטות פחמן

בישראל

חזון למשק האנרגיה בשנת 2040 | הסבת משק
החשמל של ישראל לנטול פליטות גזי חממה



ד"ר שחר דולב, נועם סגל, יעל כהן-פארן, גדי רוזנטל, דנה גבאי

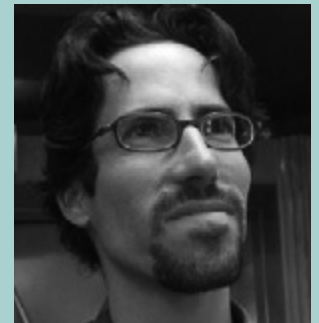
אוקטובר 2013

הפורום הישראלי לאנרגיה

המחקר מוקדש לזכרו של חנן עינבילוי, מן הפעילים הבולטים בישראל למען הסביבה בכלל, ובתחום האנרגיה המתחדשת בפרט, חבר ושותף לדרך. חנן הלך לעולמו בטרם עת, ב־31 בדצמבר 2012.

בשנים האחרונות סבו חייו של חנן סביב תחום האנרגיה המתחדשת. עוד בהיותו סטודנט להנדסת אווירונאוטיקה וחלל בטכניון בנה חנן טיסן סולארי, הראשון בישראל. בהמשך פעל וקידם יזמות רבות בתחום האנרגיה המתחדשת: הקמת טורבינות רוח זעירות מעשה ידיו, שבבנייתן החל לפני יותר מעשור, בניית אופניים חשמליים נטענים מלוחות סולאריים, ומערכת הגברה סולארית לשימוש באירועים "נטולי פליטות פחמן". בשנת 2010 יצא לפרו במסגרת פעילות של ארגון WindAid, והקים שם טורבינת רוח בכפר שאינו מחובר לרשת החשמל.

חנן היה ממייסדי הקואופרטיב לאנרגיות מתחדשות וכיהן כיו"ר הוועד המנהל, וממייסדי מפלגת "התנועה הירוקה", שבה היה פעיל. נוסף לכל אלו היה מעורב בארגון "מהנדסים ללא גבולות" לקידום אנרגיה מתחדשת. חנן היה שותף למחקר זה, ותרם לפיתוחה של הסימולציה שהיא לבו של המחקר.



על תרומתו הרבה של חנן לקידום האנרגיה המתחדשת בישראל יעידו רבים מהעוסקים בתחום, שהכירו והוקירו אותו.

תודות

למחקר תרמו רבים נוספים מידיעותיהם ומזמנם, ואנו מבקשים להודות להם: ד"ר ארז סברדלוב מחברת "חושבה לתכנון"; מר גדי הראלי מהאגודה הישראלית לאנרגיית רוח; ד"ר דוד אלמקיס, סמנכ"ל חברת החשמל; אדר' חן שליטא; מר חנן עינבילוי ז"ל; ד"ר יואב להן; ד"ר יואל כהן (לשעבר) ממשרד האנרגיה והמים; גב' יונת שוורץ; מר יונתן פרום; גב' יעל שרצר; מר משה בכר, (לשעבר) המשנה למנכ"ל חברת החשמל; מר נועם אילן.

כמו כן אנו מבקשים להודות לחברת Arava Power Company ולחברת "שיכון ובינוי אנרגיה מתחדשת", על סיוען בהעברת נתוני אמת מהמערכות הסולאריות שהן מפעילות. נתונים אלה סיפקו מידע חשוב לסימולציה שהופעלה.

מחקר זה הוא פרי יזמה של הפורום הישראלי לאנרגיה - ארגון ללא כוונת רווח, הפועל לקידום משק אנרגיה בר-קיימה בישראל. זהו תוצר של חשיבה ובחינה משותפת של הפורום הישראלי לאנרגיה ושל חברת הייעוץ "כיוון - אסטרטגיה, כלכלה, ופיתוח עסקי". את המחקר כתבו וערכו ד"ר שחר דולב, ראש תחום המחקר בפורום, נועם סגל, מנהל תחום המדיניות של הפורום, ויעל כהן-פארן - מנכ"ל הפורום. פיתוח המודלים הכלכליים נעשה על ידי גדי רוזנטל - מנכ"ל חברת "כיוון", ודנה גבאי, אשר תרמו רבות להשלמת המחקר. פרופ' דיויד פרלמוטר ומוראל וייסטל, מהמחלקה לאדריכלות ביו-אקלימית במכון לחקר המדבר של אוניברסיטת בן-גוריון, ערכו את המחקר בנושא השפעת תחום הבנייה על צריכת האנרגיה העתידית בישראל, בתרחישי ההתייעלות השונים.

הכנתו של מחקר זה התאפשרה בתמיכתה הנדיבה של קרן ברכה

B E R E A R C H A

הפורום הישראלי לאנרגיה מבקש להודות לקרן היינריך בל ולקרן לטביבה ירוקה, התומכות בפעילותו.



תוכן עניינים

פתח דבר 9

תקציר מנהלים 10

מרכיבי המחקר 11

פרק א: רקע 16

משק האנרגיה על פרשת דרכים 15

אתגרי משק החשמל 16

המענה לאתגרים 17

מחקרים ועבודת מטה בסוגיות האקלים

ומשק האנרגיה 19

החלטות הממשלה בעניין צמצום הפליטה

של גזי החממה 20

תכנית האב למשק האנרגיה 20

תגליות הגז הטבעי ועתיד משק האנרגיה 20

הגז הטבעי בישראל 20

שינוי דרמטי במשק החשמל 21

הגז הטבעי מול התייעלות אנרגטית

ואנרגיות מתחדשות 21

פרק ב: מתודולוגיה 23

פרק ג: צמצום הביקוש לאנרגיה 27

תחזית הביקוש לחשמל 29

תחזית הביקוש לחשמל בחלוקה מגזרית 29

שאיבה והתפלת מים 30

מאפייני השימוש בחשמל בחלוקה מגזרית 30

משקי בית 30

מגזר מסחרי וציבורי 32

מגזר התעשייה 32

האמצעים לצמצום פליטת גזי החממה 33

התייעלות בצריכת האנרגיה במבנים 33

חימום מים 34

אקלום 34

תאורה 36

אוטומציה 37

שינויים התנהגותיים לחיסכון בחשמל

על ידי הצרכנים 37

התייעלות במגזרים הנוספים במשק 38

סיכום: הפוטנציאל לצמצום השימוש

בחשמל 38

פרק ד: הפוטנציאל להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים 43

הנחות יסוד 44

הפקת אנרגיית רוח ביבשה 44

הפקת אנרגיית רוח בים 44

הפקת אנרגיה מפסולת 46

הפקת אנרגיה מגלי הים התיכון 46

הפקת אנרגיה סולארית 46

אגירת אנרגיה 46

פרק ה: הנחות כלכליות 49

הנחות שבבסיס תחשיב העלויות 49

מרכיבי עלות הפקת החשמל 50

עלות ייצור החשמל 50

עלות ההתייעלות בשימוש בחשמל 51

פרק ו: הפוטנציאל לתפוקת החשמל ממקורות מתחדשים 55

מהלך האופטימיזציה 55

המתאם בין מקורות האנרגיה המתחדשים לבין הביקוש היומי 57

ניתוח כלכלי של התוצאות 60

עלות הייצור הכוללת 60

בדיקות רגישות 67

סיכום ומסקנות 72

פרק ז: המלצות עקרוניות 75

לקראת אפס פליטות פחמן בישראל: האם הדבר אפשרי? 77

המלצות מבניות ותכנוניות 78

המלצות לקידום התרחיש המוצע 78

רשימת נספחים 80

רשימת מקורות 81

רשימת תרשימים

- תרשים 1: התפתחות ייצור האנרגיה ממקורות מתחדשים **13**
- תרשים 2: התפתחות הביקוש לחשמל במשק בחלוקה למגזרים בשנים 2002-2011 **28**
- תרשים 3: התפתחות הביקוש לחשמל במשק **28**
- תרשים 4: התפתחות הביקוש לחשמל במשק **28**
- תרשים 5: הצמיחה היחסית בביקוש לחשמל במגזרים השונים ביחס לשנת 2002 **29**
- תרשים 6: סיום בנייה במגזרי הציבור, העסקים וההארכה, בשנים 1950-2011 **29**
- תרשים 7: תחזית הביקוש לחשמל על פי מגזרים **30**
- תרשים 8: התפלגות השימוש בחשמל במשק בית ממוצע **31**
- תרשים 9: התפלגות השימוש בחשמל במגזר המסחרי/ציבורי בחלוקה למגזרים **32**
- תרשים 10: התפלגות השימוש בחשמל במגזר התעשייה **32**
- תרשים 11: תחזית הביקוש לחשמל בחלוקה למגזרים ולשימושים השונים **33**
- תרשים 12: תוצאות הסימולציות שמראות את סה"כ הפוטנציאל לחיסכון האפשרי באנרגיה **33**
- תרשים 13: חיסכון יחסי באנרגיה המושג על ידי שיפור פרמטרים תכנוניים **34**
- תרשים 14: היעילות האורית של טכנולוגיות תאורה שונות **36**
- תרשים 15: הביקוש לחשמל במגזרים השונים ובשימושים השונים **39**
- תרשים 16: מגזרי החיסכון במגזרים השונים **39**
- תרשים 17: הערכת מהירות הרוח בישראל **45**
- תרשים 18: דוגמא לתוצרי הסימולציה **57**
- תרשים 19: ממצאי האופטימיזציה להגדלת שיעור התפוקה מאנרגיות מתחדשות, מ-0% ולקראת 100% **58**
- תרשים 20: המתאם בין עקומת הביקוש היומית לבין עקומות התפוקה של מקורות האנרגיה השונים **59**
- תרשים 21: עלות הפקת החשמל במשק כתלות בשיעור החדירה של מקורות האנרגיה המתחדשת **62**
- תרשים 22: עלות קוט"ש שולי המוסב ממקורות מחצביים למתחדשים, ללא התייעלות **63**
- תרשים 23: עלות קוט"ש שולי המוסב ממקורות מתכלים למתחדשים, בהנחת התייעלות מקסימלית **63**
- תרשים 24: עלות ייצור החשמל בשיעורי משתנים של אנרגיות מתחדשות **64**
- תרשים 25: ההספק המותקן המומלץ על ידי האופטימיזציה עבור המקורות המתחדשים השונים **65**
- תרשים 26: עלויות הייצור לקוט"ש נצרך בטכנולוגיות השונות, בשנת 2040 **65**
- תרשים 27: סך העלויות לייצור חשמל בטכנולוגיות השונות בשנת 2040 **65**
- תרשים 28: העלות לקוט"ש מיוצר, על פי תוצאות הסימולציה, בפירוט לפי רכיבים **66**
- תרשים 29: תוצאות הסימולציה ללא מגבלת ייצור חשמל מרוח בים **69**
- תרשים 30: תוצאות הסימולציה ללא מגבלת אגירת אנרגיה חשמלית **69**
- תרשים 31: קצב היישום הנדרש עבור המקורות המתחדשים **76**
- תרשים 32: התפתחות ייצור האנרגיה ממקורות מתחדשים אל מול הקטנת הייצור ממקורות פוסיליים **77**

רשימת טבלאות

- טבלה 1: השימוש בחשמל במגזר משקי הבית, בחלוקה לקטגוריות, לצורך חישוב השוואתי **30**
- טבלה 2: הערכת מרכיבי השימוש בחשמל במשקי הבית **31**
- טבלה 3: פירוט השימושים בחשמל במגזר התעשייה וחלוקתם לקטגוריות לצורכי חישוב השוואתי **32**
- טבלה 4: השוואה בין התקנת מזגן ושימוש בחשמל המופק בקולט PV לבין קליטת חום ומיזוג ספיגה **35**
- טבלה 5: הפוטנציאל לחיסכון בצריכת החשמל הניתן להשגה באמצעות שינוי התנהגות צרכנים **37**
- טבלה 6: פוטנציאל צמצום השימוש בחשמל בחלוקה מגזרית **40**
- טבלה 7: פוטנציאל הפקת החשמל מטורבינות רוח בים **46**
- טבלה 8: הערכה של פוטנציאל הפקת החשמל ממקורות מתחדשים בישראל עד לשנת 2040 **47**
- טבלה 9: רכיבי העלות אנרגיות מתחדשות **50**
- טבלה 10: אפיון מקורות האנרגיה המתחדשים – תרחיש בסיס **51**
- טבלה 11: אומדן עלויות ייצור חשמל מדלקים פוסיליים **52**
- טבלה 12: עלויות חיצוניות של חשמל פוסילי **52**
- טבלה 13: עלות יישום אמצעים להתייעלות אנרגטית **52**
- טבלה 14: ההנחות ומקורות המידע שהוזנו לסימולציה **56**
- טבלה 15: תוצאות הסימולציה – העלות הכוללת של הפקת החשמל והפרש עלות הייצור **61**
- טבלה 16: עלות לקוט"ש נצרך **62**
- טבלה 17: מקורות החשמל השונים המומלצים על ידי האופטימיזציה במצב של 80% מתחדשות **66**
- טבלה 18: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של התייקרות מחירי הדלקים **68**
- טבלה 19: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של הוזלת מחירי הדלק **70**
- טבלה 20: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של הוזלת מחירי האנרגיה המתחדשת **70**
- טבלה 21: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של התייקרות מחירי הדלק והוזלת מחירי האנרגיה המתחדשת **71**
- טבלה 22: הפרש עלויות ועלות שנתית של ייצור חשמל בשנת 2040, ללא מגבלת ייצור חשמל מרוח בים **71**
- טבלה 23: הפרש עלויות ועלות שנתית של ייצור חשמל בשנת 2040, ללא מגבלת אגירת אנרגיה חשמלית **73**



שפיתחנו. זוהי הפעם הראשונה שמוצגת לציבור בישראל חלופה בתמימוש למשק אנרגיה עתידי, בר־קיימה בישראל. אנו מקווים כי המחקר ירחיב את השיח הציבורי באשר למשק האנרגיה, וישמש את מקבלי ההחלטות; הפורום יפעל בקרב בעלי העניין השונים כדי לקדם את יישום המלצותיו. פליטת גזי החממה בישראל מקורה במגזרים שונים: משק החשמל; ענף התחבורה; התעשייה; החקלאות והפסולת. בשל המסגרת המוגבלת שעמדה לרשותנו מתמקד המחקר בשלב זה במשק החשמל, שהוא המקור העיקרי לפליטות גזי חממה ולזיהום האוויר בישראל. אנו מקווים להרחיב ולעדכן עבודה זו בעתיד, ולכלול בה ניתוח של צמצום הפליטות במגזר התחבורה ובמגזרים נוספים.

אנרגיה זולה וזמינה היא המשאב הבסיסי והחיוני ביותר לתפקוד החברה והכלכלה המודרניות ולביטחון הלאומי. אולם ספק אם יש תחום שבו הידע ותשומת הלב הציבוריים מצויים ביחס הפוך לחשיבותו כמו במשק זה. הפורום הישראלי לאנרגיה פועל מאז שנת 2007 להרחיב, להעמיק ולפתח את השיח הציבורי בתחום האנרגיה, במטרה לקדם משק אנרגיה בר־קיימה לישראל. המחקר שלהלן הוא חלק חשוב ממאמץ זה.

משק האנרגיה של ישראל מצוי בעיצומה של מהפכה דרמטית, אשר תשנה לחלוטין את פניו בשנים הקרובות. במהפכה זו גלומים יתרונות גדולים עבור כל אחד ואחת מתושבי ישראל, אך מימושם מחייב חזון מוגדר וארוך טווח למשק זה. ההחלטות המתקבלות בימים אלו בשורה של נושאים הנוגעים למשק האנרגיה יעצבו את פניו לעשורים הבאים; אולם למצער, החלטות אלו מתקבלות לאורה של מדיניות ממשלתית שמרנית, שאינה הולמת את המציאות במשק האנרגיה העולמי והישראלי.

האם אכן אפשר להסב את משק האנרגיה של ישראל למשק מתקדם, שיבטיח לתושבי ישראל ביטחון אנרגטי ובתוך כך לצמצם את פליטות גזי החממה ואת זיהום הסביבה? האם אפשר לספק את הביקוש הגדל לאנרגיה בישראל ממקורות מתחדשים בני־קיימה? מהי העלות הכרוכה בכך? מטרתו של המחקר "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל" היא לתת תשובות יסודיות ומעמיקות לשאלות אלו, ולהציב בפני הציבור ומקבלי ההחלטות חזון בר־מימוש למשק אנרגיה בר־קיימה בישראל.

בעשור החולף פורסמו מחקרים אחדים מטעם הממשלה וגורמים חוץ־ממשלתיים, אשר בחנו את סוגיית הפקת האנרגיה ממקורות מתחדשים בישראל, כחלק מהמאבק במשבר האקלים. עם זאת, מחקרים אלו היו תאורטיים במהותם, ללא ההתאמות הנדרשות לתנאי משק האנרגיה הישראלי, וללא הסתכלות רחבה על מכלול מרכיבי משק האנרגיה המקומי והעולמי, ובפרט על השילוב הנדרש בין הפקת האנרגיה לבין ייעול השימוש בה.

מחקר ייחודי זה נערך בהשראת עבודות דומות שנערכו בבריטניה, באוסטרליה ובמדינות נוספות, אשר בהכנתן היו מעורבים מאות חוקרים ואנשי אקדמיה מן השורה הראשונה. התאמנו את המחקר למאפייניו ולצרכיו הייחודיים של משק האנרגיה בישראל, והשתמשנו במתודולוגיה

תקציר מנהלים

2. פליטת מזהמים והשפעה שלילית על הסביבה ועל בריאות הציבור.
3. השינוי המבני הנדרש במשק החשמל כדי שיוכל להמשיך ולממש את יעדיו באופן המיטבי.

בלב המחקר ניצבת סימולציה רב־ממדית הבוחנת את מרחב האפשרויות שבין שני תרחישי קצה הפוכים לפיתוח משק החשמל העתידי. האחד, תרחיש "עסקים כרגיל", משקף את התפתחותו של משק החשמל בעשורים הבאים על בסיס מדיניות הממשלה במתווה הנוכחי של "חזה וספק", והתבססות על דלקים מחצביים. השני מציג חלופה שבה צרכי החשמל במשק מסופקים באמצעות שילוב בין צמצום מרבי בצריכת החשמל מחד־גיסא, לבין הגדלה של הפקת חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים בני־קיימה למקסימום האפשרי, מאידך־גיסא. כמו כן, אופטימיזציה כלכלית של תוצרי הסימולציה מלמדת כי לא זו בלבד שתרחיש זה הוא בר־מימוש, אלא שעלותו למשק אינה יקרה יותר מתרחיש "עסקים כרגיל".

לצורך ביצוע הסימולציה נבחנה השפעתם של המרכיבים העיקריים במשק האנרגיה: הגורמים האחראים לפליטת גזי החממה במגזרי המשק השונים בצד הפוטנציאל להפחיתם, ותחזית הביקוש לחשמל בשנת 2040 בצד הפוטנציאל להפקת החשמל ממקורות מתחדשים ובני־קיימה. המחקר סוקר אפוא את האמצעים הפוטנציאליים, ובראשם אנרגיית רוח ואנרגיית השמש, ודן בפירוט במידת ישימותם במסגרת מגבלותיה הטבעיות של ישראל.

מחקר זה אינו מחליף את תכנית האב הממשלתית למשק החשמל והאנרגיה, הן מבחינת היקף המשימות הן מבחינת המשאבים – ובפרט הנתונים – שעמדו לרשותנו. עם זאת, החזון ארוך הטווח שהוא מציב מתבסס על מתודולוגיה ועל יסודות טכנולוגיים מוצקים, ומציג גישה חדשה ויעדים טכנולוגיים חלופיים עבור משק החשמל – חלקם אף מרחיקי לכת.

מרכיבי המחקר

כדי שאפשר יהיה לספק את חלק הארי של תצרוכת החשמל של ישראל ממקורות מתחדשים בני־קיימה, ובעלות סבירה, יש לצמצם באופן ניכר את הביקוש לחשמל במשק באמצעות התייעלות אנרגטית. ניתוח מגמות הביקוש לחשמל בישראל בעשרים השנים האחרונות מלמד כי בתרחיש

משק החשמל של ישראל ניצב בימים אלה על פרשת דרכים. משק זה עובר בשנים האחרונות שינוי דרמטי, אשר כמותו לא ידע מאז שנוצקו יסודותיו לפני יותר מתשעים שנה. בעקבות תגליות הגז בים התיכון עומד לרשות ישראל, לראשונה מאז הקמתה, מקור אנרגיה מקומי, המקנה לה אפשרות ממשית לעצמאות אנרגטית במשק זה בעשורים הקרובים. לאחר שנים של משבר מתמשך צפויה הסבתו של משק החשמל לגז טבעי להביא ליציבות, להפחתת עלויות השימוש באנרגיה לציבור ולצמצום מסוים בזיהום הסביבתי. נוסף לכך, זמינותו של הגז מאפשרת את פעילותם של יצרני חשמל פרטיים, ואת הוצאתה לפועל של תכנית הממשלה להפרטה ולשינוי מבני במשק החשמל.

לכאורה, מצבו של משק האנרגיה בישראל וביטחונם האנרגטי של תושביה מעולם לא היו טובים יותר. אולם בפני משק האנרגיה של ישראל ניצבים אתגרים רבים מורכבים, וההחלטות שיקבלו בשנים הקרובות קובעי המדיניות ישפיעו במידה רבה על עתידה הכלכלי, הביטחוני והחברתי של מדינת ישראל. על אף יתרונותיו הרבים, הגז הטבעי הוא דלק מחצבי (פוסילי) מתכלה ומוגבל בכמותו, ושרפתו מביאה לפליטת מזהמים וגזי חממה. כמו כן, הפרטת המואצת של המקטעים השונים במשק החשמל על פי מתווה שגובש לפני יותר משני עשורים, ובמנותק משיקולים מקצועיים הקשורים לצרכי האנרגיה של ישראל, עלולה להחליש את חוסנו של משק זה ולהגביל את יכולתו להתמודד עם אתגרי העתיד.

על רקע משבר אנרגיה עולמי ומתמשך, אשר צפוי להחריף, והמאבק בהתחממות כדור הארץ, חסרונה של מדיניות אנרגיה לאומית רחבה וארוכת טווח עלול להעמיד את ישראל בתוך כשני עשורים בפני שוקת שבורה. מחקר "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל" מתמקד, כאמור, במשק החשמל, האחראי לחלק הארי של פליטת גזי החממה בישראל. המחקר ומנסה להשיב על השאלות שלהלן: האם וכיצד אפשר לצמצם את פליטת גזי החממה במשק החשמל של ישראל לכדי אפס פליטות עד לשנת 2040¹ ובתוך כך לשמור על אמינות האספקה ועל יציבותה? מהי העלות הכרוכה בכך? כדי להשיב לשאלה זו יש למפות את האתגרים העיקריים הניצבים בפניו, ואת המענה הנדרש לכל אחד מהם:

1. הביקוש הגדל לחשמל במשק.

1 הסתכלות ארוכת טווח אל שנת 2040 מאפשרת לשרטט מחדש את פניו של משק האנרגיה של ישראל, במנותק ממערך תחנות הכוח הקיים (אשר צפויות לצאת מכלל שימוש עד לשנה 2040). עם זאת, מבחינת תכנון משק האנרגיה, שנת 2040 היא אופק התכנון הממשי. לא זו בלבד, אלא שהחלטות המדיניות והתכנון שיתקבלו בעשור הקרוב ישפיעו על הכיוון שמשק האנרגיה של ישראל יעדר בו ועל יכולתה של המדינה להגיע לחזון המתואר כאן ב־2040.

2 בקירוב רב, על פי אקסטרופולציה של נתוני הצריכה בעבר, ועד היום.



תרמוסולארית (כולל אגירת אנרגיה);⁶ הפקת אנרגיה מרוח באמצעות טורבינות המוצבות ביבשה ובים (הנתונים על אודות עצמת הרוח בים נאספו מנתוני לוויינים); הפקת אנרגיה מגלי הים, מפסולת ומביומסה; ואגירת אנרגיה באמצעות מתקנים לאגירה שאובה ושימוש בסוללות המותקנות בכלי רכב חשמליים.

אופטימיזציה כלכלית של תמהיל הפקת האנרגיה ממקורות מתחדשים, כפי שהציגה הסימולציה, מאפשרת לבחור בכל רגע נתון את מקור האנרגיה המתחדשת הזמין והזול ביותר למשק⁷ – אך לא יותר ממגבלת התפוקה המקסימלית לכל מקור אנרגיה, בהתאם ליכולת לעשות בו שימוש בישראל. כן מובא בחשבון באופטימיזציה הגיבוי הנדרש (מתבסס על דלקים מחצביים), ומופנמת עלות הבזוז הנוצר כאשר האנרגיה המתחדשת המופקת לא נצרכת במלואה (לדוגמה, בשעות הצהריים שבהן קרינת השמש בשיאה), או בשל עלות ההון של מערכות הגיבוי בדלקים מחצביים, המשמשות לעתים רחוקות בלבד.

האופטימיזציה מציגת את תמהיל הפקת האנרגיה המיטבי למשק החשמל העתידי של ישראל בהתבסס על הרחבת השימוש במקורות מתחדשים (תרשים 1). במילים אחרות, האופטימיזציה מחשבת את ההספק המותקן הרצוי בכל אחד מהמקורות המתחדשים השונים הזמינים (על בסיס הטכנולוגיות הנמצאות בשימוש), וכן את ההספק הנדרש לגיבוי ממקורות מחצביים, כדי לענות על הביקוש בכל שעה על פני השנה, ובעלות מינימלית למשק, וזאת באחוזים הולכים וגדלים של שימוש במקורות מתחדשים.

האופטימיזציה בוחנת את ההשפעה שיש להרחבתה של תפוקת האנרגיה ממקורות מתחדשים במהלך של 100 צעדים, בתרחיש שאינו כולל התייעלות אנרגטית (צריכת חשמל שנתית של 101 מיליארד קוט"ש); בתרחיש של התייעלות חלקית (צריכת חשמל שנתית של 82 מיליארד קוט"ש בשנה); ובתרחיש של התייעלות מקסימלית (צריכת חשמל שנתית של 63 מיליארד קוט"ש). כמו כן נערכו בדיקות רגישות באמצעות תרחישים נוספים שבהם שונו מחירי הדלקים המחצביים, עלות הטכנולוגיות השונות והמגבלות

"עסקים כרגיל" (קרי, ללא מאמצי חיטון והתייעלות מיוחדים), ימשיך הביקוש לגדול באופן לינארי² ויעמוד בשנת 2040 על 101 מיליארד קוט"ש. זהו גידול של 74% בביקוש ביחס לשנת 2012, שבה עמד הביקוש על 58 מיליארד קוט"ש. על פי תחזית זו קצב הגידול השנתי נאמד בכ-2% בשנה – מעט יותר משיעור גידול האוכלוסייה, שנאמד בכ-1.75% בשנה.³

עם זאת, ניתוח פוטנציאל התייעלות האנרגטית במשק על פי שימושי האנרגיה העיקריים (מיזוג אוויר, תאורה, חימום מים) ועל פי מגזרי השימוש (ביתי, מסחרי/ציבורי, תעשייתי וכו') מראה כי עד שנת 2040 אפשר ליעל את השימוש בחשמל בכ-38% מסך הצריכה ביחס לתרחיש הבסיס, ולצמצמו להיקף של 63 מיליארד קוט"ש בלבד. במונחים שנתיים זהו חיטון של כ-1.6% לשנה, בכל שנה, עד לשנת 2040. צמצום שנתי של 1.6% בביקוש לחשמל תואם את יעדי התכנית הלאומית להתייעלות בצריכת החשמל עד לשנת 2020 (משרד האנרגיה והמים, 2010a), ובה שיעור החיטון הממוצע גבוה אף יותר.⁴

בתחום הבנייה נמצא כי שימוש באמצעים של "בנייה ירוקה" יכול לתרום להפחתת צריכת האנרגיה לאקלום ביותר מ-50%, קרי 7.3% מסך הביקוש במשק בכל המגזרים, שהם כ-20% מפוטנציאל החיטון. שנייה בהתנהגות הצרכנים עשויים לתרום להפחתת כ-3.2% מהביקוש לחשמל, שהם כ-9.5% מפוטנציאל החיטון הכולל. הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים בישראל בהיקף נרחב מחייבת התמודדות עם שלושה אתגרים מרכזיים:

1. ההשקפה הרווחת כי מדובר בטכנולוגיות יקרות שאינן אמינות.
2. מגבלה על סך האנרגיה שאפשר להפיק ממקורות מתחדשים בישראל, בשל צפיפות אוכלוסין ומחסור בקרקע זמינה להקמת המתקנים הדרושים.
3. הצורך להבטיח אספקה סדירה, רציפה ויציבה של חשמל לאורך כל שעות היממה, גם כאשר חלק מהמקורות המתחדשים אינם זמינים (דוגמת אנרגיית השמש, שאינה זמינה בלילה).

הגישה התכנונית הקיימת במשק החשמל בישראל גורסת כי עליו להמשיך ולהתבסס גם בעתיד על דלקים מחצביים מזהמים ומתכלים. זאת לאור זמינותו הגבוהה ומחירו הנמוך של הגז הטבעי ויציבות אספקתו של הפחם, לצד התפיסה שלפיה אין כדאיות כלכלית בשילובם של מקורות מתחדשים להפקת חשמל בישראל מעבר לשיעור של 20% מסך תפוקת האנרגיה, והקצאת משאבים מצומצמים ביותר להתייעלות אנרגטית במשק. הגישה המוצעת במחקר זה הפוכה, ומדגישה את הצורך לתכנן את משק החשמל על בסיס שילוב הכרחי בין התייעלות מרבית בשימוש בחשמל לבין מעבר לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים בהיקף נרחב.

כלי הסימולציה שבנינו לצורך המחקר מדמה את תפוקת החשמל ממקורות מתחדשים עבור שנה שלמה, על בסיס נתוני הביקוש החזוי בכל שעה ושעה, אל מול זמינות המקורות המתחדשים (8,760 שעות בשנה).⁵ הוא עושה זאת עבור שילוב של מגוון טכנולוגיות קיימות להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים, הזמינות לשימוש בישראל: הפקת אנרגיה מקרינת השמש (אנרגיה סולארית) בטכנולוגיה פוטו-וולטאית ובטכנולוגיה

3 תחזית זו נמוכה בהרבה מתחזיות חברת החשמל ומשרד האנרגיה, הצופות כי הביקוש לחשמל יעלה בקצב מעריכי (אקספוננציאלי) ויגיע לכדי 140 מיליארד קוט"ש בשנת 2040.

4 יש לזכור כי בטווח הזמן הקצר קל יותר להגיע לתוצאות מרשימות בתחום התייעלות מאשר בטווח הבינוני והארוך. במילים אחרות: קל יחסית לשמור על חיטון של 1.6% בשנה במשך עשור, קשה לעשות זאת במשך שלושה עשורים.

5 על בסיס התפלגות צריכת החשמל השנתית בשנת 2011, בהתאמה לצריכה הצפויה בשנת 2040, ואל מול התפלגות התפוקה השנתית של הטכנולוגיות השונות.

על השימוש בהן (דוגמת הפקת חשמל מרוח במתקנים הנמצאים בהם). האופטימיזציה מלמדת כי אפשר להקנות לתושבי ישראל ביטחון אנרגטי ואספקת חשמל סדירה ויציבה ממקורות מתחדשים, ובתוך כך לתת מענה מלא לביקוש השעתי לחשמל בכל שעות היממה. מימושו של פוטנציאל ההתייעלות האנרגטית במשק במלואו מאפשר לשלב מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה בשיעור של 80% ללא תוספת עלות ביחס להפקת אנרגיה מדלקים מחצביים⁶. יתרה מזאת, שילוב מקורות מתחדשים בהיקף של עד 20% מתמהיל הפקת האנרגיה הכולל אף מוזיל את עלות ייצור החשמל ביחס לתרחיש עסקים כרגיל – גם ללא התייעלות אנרגטית כלל.

בטרשים 1 להלן מוצגת תחזית השימוש במקורות האנרגיה השונים בשלושת העשורים הקרובים, על פי המלצות האופטימיזציה, במצב של התייעלות מלאה במשק והשגת 80% ייצור ממקורות מתחדשים, כאמור, ללא תוספת עלות למשק. במצב זה מקורות האנרגיה העיקריים יהיו 19,000MW מותקנים בטכנולוגיה פוטו-וולטאית (על פי ניתוח שנעשה במחקר רובם יכולים להיות בשימוש שטח כפול), 3,325MW של טורבינות רוח ביבשה, ו-2,200MW של טורבינות רוח בים. כמו כן יידרשו 3,200MW של מערכות אגירה וכ-9,000MW של תחנות כוח פוסיליות לגיבוי.

לסיכום, משק האנרגיה העולמי עומד בפני תמורות ואתגרים שלא עמד בפניהם מעולם. שינויי האקלים המתגברים והולכים יחייבו את אומות העולם לפעול בנמרצות לצמצום משמעותי של פליטות גזי החממה; המחירים העולים והתנודתיות הגוברת במחירי הדלקים מקשים על תפעול כלכלי של מערכות הייצור; הביקוש הגובר לאנרגיה דורש השקעות עתק בתשתיות ייצור, הולכה וחלוקה, בד בבד עם דרישות הולכות וגוברות להקצאת קרקע; ומדינות רבות המייבאות דלקים חשופות לתהפוכות גאופוליטיות וגלובליות.

בנסיבות אלה, ביטחון אנרגטי אמיתי יגיע לישראל אך ורק תוך הגדלה ניכרת של השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים, כאלו שאינם תלויים באספקת דלקים מתכלים ואינם פולטים מזהמים או גזי חממה. המחקר "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל" מציב חזון ישים ואחראי למשק האנרגיה של ישראל במאה ה-21, כחלופה למדיניות הקיימת. המחקר מלמד כי אפשר להסב את משק החשמל של ישראל למשק ברקיימה, ולהביא לצמצום מרבי של הפגיעה בסביבה ושל פליטת גזי החממה. מסקנותיו מראות כי כדי להגיע לתוצאות משמעותיות יש להתחיל לפעול מוקדם ככל האפשר, דווקא בעת הנוכחית של תמורות גלובליות.

הניתוח הכמותי שבוצע במחקר ממחיש כי בתכנון משק החשמל בישראל אפשר וכדאי לאמץ מדיניות כלכלית-חברתית-טכנולוגית אשר תפנים את התמורה שבהתייעלות האנרגטית לצורך המעבר להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים. נושאים אלו צריכים להיות עמודי תווך מרכזיים באסטרטגיה של ישראל בתחום החשמל. חלקם של המקורות המתחדשים יכול להגיע עד לכדי 90% מהביקוש, וכ-80% מהם ניתנים להשגה ללא תוספת עלות – וללא העלאה משמעותית ברמת סיכוני האספקה.

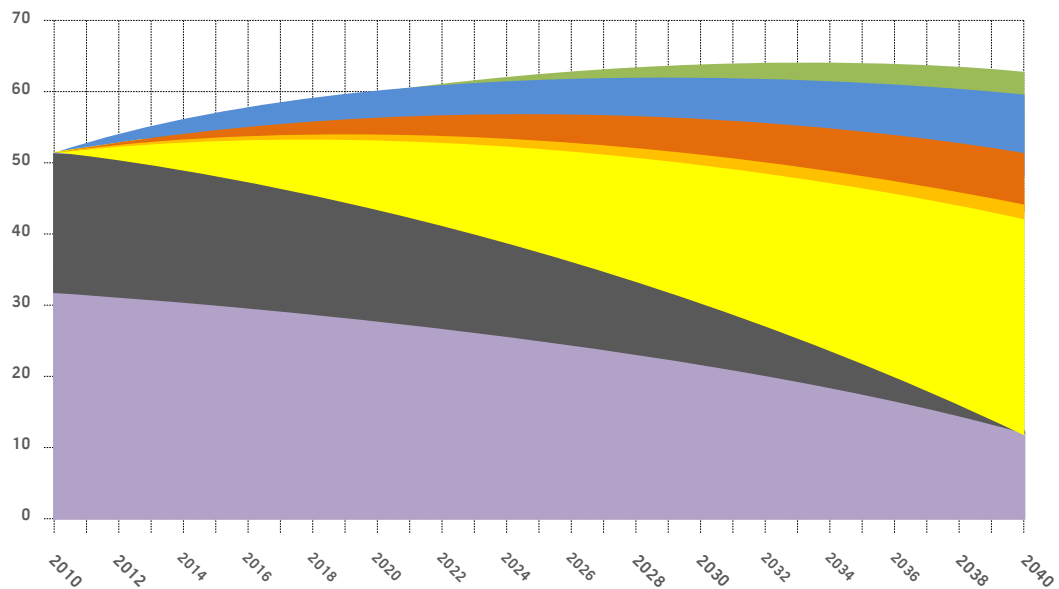
את התועלת הכלכלית הגלומה בשימוש במקורות מתחדשים ובצמצום השימוש מדלקים מחצביים אפשר יהיה לממש רק אם ימוצה פוטנציאל ההתייעלות בשימוש בחשמל כבר בשלב מוקדם בפיתוח המשק, כדי לאפשר שילוב מקורות מתחדשים בהיקף ניכר. זאת, בעלות זהה לחשמל המופק מדלקים מחצביים, אך תוך שינוי ניכר ביחס בין עלויות ישירות לעלויות חיצוניות ותוך צמצום הסיכון לעליית מחירי הדלקים, והגדלת הביטחון האנרגטי והסביבתי של תושבי ישראל.

העיקרון התכנוני המקובל של "להיות בצד הבטוח", ומגמת ההפרטה של מקטע הפקת החשמל בישראל, מביאים כיום לתכנון ולהקמה של תחנות כוח מיותרות. כתוצאה מכך נמצא משק החשמל במצב מתמיד של עודף הון, ומצב זה מבטל את כדאיות ההשקעה במעבר לשימוש בטכנולוגיות להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים (כיוון שלכאורה יהיו בכך השבתה ואיניצ'ול של הון קיים). הדרך לשבור מעגל שוטה זה היא בהקצאת משאבי יתר לחיסכון ולהתייעלות, אשר יפחיתו מאוד את הצורך בבניית תחנות כוח מחצביות חדשות ויגדילו את הכדאיות שבשימוש במקורות מתחדשים. כמו כן יש להתאים ולבסס את השינוי המבני במשק החשמל על עקרונות חלופיים לאלה המנחים את מגמת ההפרטה הנוכחית, דוגמת הגדלת הביזור על חשבון ייצור מרכזי, ושילוב חברת החשמל לישראל בתהליך המעבר.

6 המחקר אינו נוקט גישה ערכית באשר להפקת חשמל סולארי בשדות ובשטחי טבע פתוחים לעומת הפקתו על גגות מבנים. שימוש זה מקטין אמנם את הפגיעה בסביבה, אולם במחיר של הפסדי יעילות עקב הצללות, וכן חסרונות כלכליים לקוטן (לפרוט נוסף ראו נספח ו). מטעמי זהירות, נתוני העלויות מתייחסים לשדות פוטו-וולטאיים גדולים ו"חיובם" בערך השטח הפתוח כעלות חיצונית. במסגרת העבודה בוצעה הערכה מקיפה של פוטנציאל הניצול הכפול של שטח (גגות וקירות בניינים, מאגרי מים, קירוי חניונים, ועוד), והיא מוצגת בנספח ח. מהערכה זאת עולה כי אפשר לספק כמעט במלואה את האנרגיה הסולארית הדרושה, במערכות פוטו-וולטאיות באמצעות ניצול כפול של שטח.

7 מבחינת העלות לקוט"ש שולי המוסב למקורות מתחדשים.
8 עלות הפקת האנרגיה כללה עלויות ישירות של הון, דלק, ותפעול; עלויות חיצוניות; ועלויות של מימוש פוטנציאל החיסכון. הניתוח נעשה על פי מחירי הדלקים של 2013, בתוספת בדיקת רגישות לעלייה של 25% במחירי הדלקים על בסיס ניתוח מנגות עולמיות. עלות הטכנולוגיות המתחדשות נבחנה על בסיס סקר ספרות ונתוני אמת של חברות מסחריות. העלות נבחנה עבור תרחישים שונים: שיעורי מתחדשות משתנים ושיעורי התייעלות שונים.

התפתחות הייצור ממקורות מתחדשים: ייצור אנרגיה שנתי



גז ● פחם ● PV ● תרמו-סולארי ● רוח ביבשה ● רוח בים ● גלים ● פסולת ●

תרשים 1: התפתחות ייצור האנרגיה ממקורות מתחדשים אל מול צמצום הייצור ממקורות פוסיליים, על פי התמהיל המומלץ על ידי האופטימיזציה להשגת 80% מקורות מתחדשים בשנת 2040, ללא תוספת עלות אל מול תרחיש "עסקים כרגיל", ובהנחה של התייעלות מקסימלית





יעד המדיניות העיקרי שיש להציב בפני משק האנרגיה של ישראל הוא להעניק לתושבי ישראל בטחון אנרגטי בראייה מרחיבה וארוכת טווח, ובתוך כך לצמצם את הפגיעה בסביבה. לשם כך יש לתת פתרון לביקוש הגדל לחשמל, להפחית את פליטת המזהמים וגזי החממה במשק החשמל, ולהתאים את מבנהו לצרכי משק החשמל העתידי.

הטבעי יאפשרו שינויים עמוקים במבנה משק האנרגיה - מעבר מייצור מרכזי על ידי חברת החשמל לייצור מבוזר בידי יצרני חשמל פרטיים, מטורבינות גז בנות מאות מגה-ואט למערכות חשמל וחום (קו-גנרציה) ומיקרו-טורבינות בהספקים של מאות ואף עשרות קילו-ואט בודדים. בכך תאפשר מהפכת הגז הטבעי לממש את התכנית רבת השנים להפרטת מערך ייצור החשמל ולביצוע שינוי מבני במשק החשמל.

לכאורה מצבו של משק האנרגיה בישראל וביטחונם האנרגטי של תושביה מעולם לא היו טובים יותר. ואולם בהיעדר מדיניות אנרגיה לאומית מושכלת וארוכת טווח עלולה ישראל - כפי שמלמד הניסיון העולמי - למצוא עצמה בתוך כשני עשורים, כשידלדלו מאגרי הגז המקומי, ניצבת בפני שוקת שבורה: ערעור ממשי של הביטחון האנרגטי של אזרחי ישראל, הטלת עול כלכלי כבד על המשק הישראלי, והחממת הזדמנות היסטורית נדירה למהפכה כלכלית וחברתית.

בפני משק האנרגיה של ישראל ניצבים אתגרים רבים מורכבים, וההחלטות שיקבלו בשנים הקרובות קובעי המדיניות ישפיעו במידה רבה על עתידה הכלכלי, הביטחוני והחברתי של מדינת ישראל.

משק האנרגיה על פרשת דרכים

החוקר האמריקני לווינס (Amory Lovins) תיאר בשנת 1976 את צומת הדרכים שבו היה מצוי משק האנרגיה האמריקני לאחר משברי הנפט כבחירה בין שתי אפשרויות: המשך ההישענות על דלקים מחצביים מזהמים (המסלול ה"קשה"), או דרך חלופית - "רכה" יותר, מסלול שבחר לכנות במונח Soft Energy Path (Lovins 1976, 1977). זהו מסלול של שינוי ומעבר לשימוש בטכנולוגיות חלופיות וידידותיות לסביבה להפקת אנרגיה, בשילוב עם שימוש מושכל וחסכון.

בעשור החולף, בצל משבר האנרגיה העולמי והמאבק במשבר האקלים, פורסמו מחקרים חדשים המלמדים כי אפשר לספק במלואם את צורכי האנרגיה של החברה המודרנית ממקורות מתחדשים בני-קיימה ולצמצם את פליטת גזי החממה. הבולטים במחקרים נעשו על ידי פרופ' מארק ג'קובסון מאוניברסיטת סטנפורד (Hoste, Dvorak 2011; Delucchi & Jacobson 2011; Jacobson & Delucchi, 2009; Jacobson et al. 2013) וכן

חרם הנפט הערבי בשנת 1973 הותיר את מדינות המערב, ובראשן ארצות הברית, בהלם. החשש (שלא התממש לבסוף) משיתוק כלכלי מוחלט אילץ מדינות רבות לחשוב - לראשונה - על האופן שהן מפיקות אנרגיה ועושות בה שימוש, ולגבש מדיניות בתחום זה. השיח בארצות-הברית עסק רבות בשאלת הביטחון האנרגטי ובצורך להשקיע בפיתוח טכנולוגיות להפקת אנרגיה אשר תשמשנה חלופה לנפט. עם זאת, ועל אף המשבר החריף שחוו מדינות רבות, ירדת מחירי הנפט בשני העשורים העוקבים הותירה את מדיניות האנרגיה העולמית ללא שינוי משמעותי.

ואולם בעשור החולף, על רקע משבר האנרגיה העולמי והצורך להיאבק במשבר האקלים, שבו מדינות רבות לבחון מחדש את מדיניות האנרגיה שהן נוקטות ולחפש נתיבים חלופיים אשר יפחיתו את תלותן בדלקים מחצביים ומזהמים. מרבית מדינות אירופה ומדינות נוספות בעולם אף אימצו יעדים אופרטיביים לצמצום פליטת גזי החממה בשטחן.

בזכות תגליות הגז בים התיכון עומד לרשות ישראל, לראשונה מזה עשורים רבים, מקור אנרגיה מקומי, עשיר ואיכותי, המקנה לה אף מידה מסוימת של עצמאות אנרגטית. לאחר שנים שבהן הייתה ישראל תלויה בגורמים בין-לאומיים לאספקת האנרגיה המקומית, צפויה הסבתו של משק האנרגיה לגז טבעי מקומי להביא ליציבות, להפחתת עלויות השימוש באנרגיה לציבור ולצמצום הזיהום הסביבתי. כמו כן, מאפייניו של הגז

מחקרים ומסמכי מדיניות שפורסמו בבריטניה (Helweg-Larsen & Bull 2007; European Climate Foundation 2010; Federal Planning Bureau 2013; Wright & Hearps 2010; Zero Carbon Task Force 2010), ובהם פורטו הצעדים הנדרשים למעבר לכלכלה דלת פחמן (Low Carbon Economy).

מחקר זה, שכותרתו "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל", הוא מסמך ראשון מסוגו בישראל הנשען על עבודות אלו, ומציג מפת דרכים להסבת משק האנרגיה של ישראל במאה ה-21 לכלכלה דלת פחמן. התכנית מציגה פתרון חלופי למדיניות הממשלה, שהוא יישומי, אחראי ובר-קיימה; פתרון אשר יקנה לתושבי ישראל ביטחון אנרגטי, בד בבד עם צמצום מרבי של הפגיעה בסביבה, בבריאות האזרחים ובפליטת גזי החממה.

על פי החזון המוצג והתרחיש המוצע בעבודה זאת אפשר בטווח הארוך (שנת 2040) לספק כמעט את מלוא תצרוכת החשמל של ישראל ממקורות מתחדשים בני-קיימה, וזאת בעלות זהה לתרחיש "עסקים כרגיל" המתבסס על דלקים מחצביים מזהמים.

משק האנרגיה בישראל כולל שלושה מגזרים עיקריים: הפקת החשמל, ענף התחבורה ואנרגיה הנצרכת בתעשייה.⁹ מחקר זה מתמקד במשק החשמל, הצורך יותר ממחצית האנרגיה הראשונית בישראל. האתגרים שעמם יידרש להתמודד ענף התחבורה, שהוא צרכן עיקרי נוסף במשק האנרגיה, ובפרט העלייה הצפויה במחירי הנפט והירידה בזמינותו - מחייבים חשיבה מחודשת והתייחסות נרחבת, שהן מעבר למסגרת מחקר זה.

מדיניות משרד האנרגיה קובעת כי מטרת העל של המשרד היא אספקה יציבה ושוטפת של חשמל ובכל מחיר (רודשטיין 2007: 8). ממטרת על זו נגזרים היבטים נוספים דוגמת ביטחון אנרגטי לתושבי ישראל, תחרותיות, שיפור איכות הסביבה ועוד. בראייתנו, המשרד שם דגש מוגבר בעידוד האספקה בכל מחיר, ואינו מתייחס די לביטחון האנרגטי במובנו הרחב. מנקודת מבט זו יפורטו להלן האתגרים העיקריים הניצבים בפני משק החשמל.

אתגרי משק החשמל

אנו מאמינים כי יעד המדיניות העיקרי שיש להציב בפני משק האנרגיה של ישראל, ואשר ממנו נגזרים מטרות ויעדים נוספים, הוא להעניק לתושבי ישראל ביטחון אנרגטי בראייה מרחיבה וארוכת טווח, ובתוך כך לצמצם את הפגיעה בסביבה - בעלות כלכלית סבירה. האתגרים העיקריים במשק החשמל שיש להתמודד עמם כדי להשיג יעדים אלה הם:

1. מתן מענה לביקוש הגדל בהתמדה לחשמל בישראל.
2. צמצום ההשפעה השלילית של משק החשמל על הסביבה והפחתת פליטת גזי החממה.
3. התאמת מבנה משק החשמל לצורכי המשק העתידי.

אתגר 1: הביקוש לחשמל

האתגר העיקרי שמשק האנרגיה של ישראל מתמודד עמו הוא הביקוש הגדל לחשמל. בפרק זמן של שני עשורים כמעט שולשה צריכת החשמל

במשק, מסך של כ-19 מיליארד קוט"ש בשנת 1991 לכ-53 מיליארד קוט"ש בשנת 2011¹⁰ (חברת החשמל 2011a). אלו הופקו ב-61 יחידות ייצור והובלו אל הצרכנים לאורך כ-25,000 ק"מ של קווי הולכה וחלוקה. הגידול בצריכת החשמל נובע ממגמות גידול האוכלוסין וההגירה לישראל, וכן מן השיפור באיכות החיים והעלייה בצריכת החשמל לנפש.

אל מול הביקוש הגואה גדל גם כושר ייצור החשמל. בשנת 1990 עמד כושר ייצור החשמל בישראל (ההספק המותקן) על כ-5,065 מגהואט, ואילו בשנת 2011 עמד כושר הייצור על כ-12,759 מגהואט¹¹ (חברת החשמל, 2011a). בשנה זו עמד שיא הביקוש השנתי לחשמל על כ-11,157 מגהואט.

אם לא יחולו שינויים מהותיים במדיניות האנרגיה של ישראל צפויה מגמת הגידול בביקוש לחשמל להימשך גם בעשורים הבאים, והביקוש לחשמל במשק עשוי להגיע לכדי 160 מיליארד קוט"ש בשנת 2040.¹²

תכנון משק החשמל בישראל מתבצע על פי חוק על ידי ספק השירות החיוני (חברת החשמל לישראל), בהתאם להנחיות המדיניות של משרד האנרגיה והמים, ועל בסיס קריטריונים שמציב המשרד. הפרמטר המרכזי שמציב המשרד הוא קריטריון האמינות, קרי הבטחת אספקת החשמל הסדירה והיציבה לצרכני החשמל. חשיבותו של פרמטר זה נובעת, מחד גיסא, מתפיסתו של משרד האנרגיה שלפיה חובתה של הממשלה לדאוג לאספקת חשמל רציפה למשק (כמעט) בכל מחיר; ומאידך גיסא, מן העלות הגבוהה המחושבת עבור אי-אספקת חשמל למשק (משרד האנרגיה והמים 2011). פרמטר זה בתכנון משק החשמל משקף גם את היותה של ישראל "אי אנרגטי", כלומר היא אינה יכולה לרכוש חשמל משכונתיה לגיבוי בשעות מחסור או במצב של עלייה חדה בביקוש.

תכנון משק החשמל על בסיס קריטריון זה מחייב הקמת עתודה (רזרבה) משמעותית בכושר ייצור החשמל בישראל, כך, למשל, תכנית הפיתוח למשק החשמל שפרסם המשרד בשנת 2007 קובעת כי עד לשנת 2030 יש להקים 38 יחידות ייצור חדשות בישראל המונעות בגז טבעי (מחז"מים וטורבינות גז), או לחלופין - 19 יחידות חדשות המונעות בגז ושש יחידות המונעות בפחם.¹³ כמו כן דורשת התכנית לעבות את מערך ההולכה והחלוקה בהתאם לצמיחת הביקוש (רודשטיין 2007: 72). הקמת תשתיות אלו תחייב השקעות עתק, תדרוש שטחי קרקע יקרים, ותגרור מאבקים בתושבים ובארגונים ירוקים (ראו להלן). להקמתו של כושר ייצור עודף בהיקף כה נרחב יש עלות כלכלית כבדה שנושאים בה צרכני החשמל במשק, בשל ההון הרב המושקע בהקמת תחנות הכוח ובתשתיות הנדרשות.¹⁴ כמו כן משרד האנרגיה דורש כי חלק מסוים מייצור החשמל יופק בפחם, שאותו הוא מעריך כמקור אספקה יציב יותר.

אתגר 2: צמצום ההשפעה הסביבתית של ייצור החשמל

משק האנרגיה הוא אחד הענפים המשפיעים ביותר על הסביבה בישראל, בניצול משאבי הטבע ובזיהום הסביבתי. צמצום השפעתו הוא אתגר מרכזי בתכנון משק החשמל ובפיתוחו.

חלק הארי של זיהום האוויר האנתרופוגני בישראל מקורו בפליטת מזהמים במשק החשמל ובמגזר התחבורה, ובכללם פליטת חומרים

9 מגזרים נוספים הם משק המים והרשות הפלסטינית.

10 בראשית העשור הקודם, בשנת 2001, עמדה צריכת החשמל על כ-38.5 מיליארד קוט"ש.

11 לא כולל יצרנים פרטיים. יש לציין כי חלק הארי של הגידול בכושר הייצור התבצע עד שנת 2000, אז עמד כושר ייצור החשמל על כ-9,103 מגהואט.

12 על פי תחזית צמיחה כלכלית בינונית (4.5% בשנה) של חח"י. ראו פרק ג לדיון מפורט בתחזית הביקוש.

רעילים בתהליך השרפה של הדלקים המחצביים, ופליטת חלקיקים וגזי חממה.¹⁵ נוסף לכך, תשתיות החשמל – ובהן תחנות כוח, תחנות השנאה, קווי הולכה וחלוקה של חשמל וגז טבעי ומתקנים נוספים – דורשות הקצאת שטחי קרקע נרחבים על חשבון שטחים פתוחים, ובפרט באזורי החוף המאוכלסים בצפיפות.

משק האנרגיה אחראי לכ־85% מסך פליטת גזי החממה בישראל, אשר נאמדו בשנת 2010 בכ־76 מיליון טון (במונחי שווה ערך פחמן דו־חמצני) (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה 2012: לוח 27.6). נתון זה משקף גידול של 22% בהשוואה לשנת הייחוס 1996, אז נאמדה פליטת גזי החממה בכ־62 מיליון טון. גז החממה העיקרי הנפלט בישראל הוא הפחמן הדו־חמצני (CO_2), שמקורו בשרפת דלקים מחצביים בתהליך הפקת החשמל ובייצור המלט. בשנת 2010 נפלטו בישראל כ־65 מיליון טון פחמן דו־חמצני, כשני שלישים מהם במגזר האנרגיה. שיעור פליטת המתאן (CH_4), גז חממה נוסף שמקורו במשק האנרגיה ובפירוק פסולת מוצקה, עמד בשנת 2010 על 6.8 מיליון טון. אף כי מדובר בשיעור קטן בהרבה מפליטות הפחמן הדו־חמצני, הרי שתורמתו לאפקט החממה נאמדת בעד פי 23 מזו של הפחמן הדו־חמצני. שיעור פליטת המתאן בישראל עשוי לעלות בעשורים הקרובים בשל המעבר לשימוש בגז טבעי (עקב דליפות ופליטות מבוקרות של גז טבעי, שהמתאן הוא המרכיב העיקרי שלו). גז החממה השלישי הנפלט בתהליך שרפת הדלקים בענף האנרגיה ובחקלאות הוא החנקן התת־חמצני (N_2O), אשר שיעור הפליטה שלו בישראל בשנת 2010 עמד על 2.5 מיליון טון.

נוסף לפליטת גזי החממה, למשק האנרגיה יש תרומה נכבדת לזיהום האוויר הכללי בישראל. שרפת הפחם והנפט בתהליך הפקת החשמל בתחנות הכוח משחררת לאטמוספירה כמויות גדולות של תחמוצות גפרית וחנקן (NO_x, SO_x), מתכות כבדות, וחלקיקים הפוגעים במערכות הלב והריאה וחשודים כמסרטנים ($PM_{2.5}, PM_{10}$) (גרוסמן, איילון, וגולדרט 2008).¹⁶ השפעה עיקרית נוספת של משק האנרגיה על הסביבה קשורה למגבלת הקרקע, משאב המצוי במחסור חמור בישראל. הגדלת כושר הייצור במשק החשמל מחייבת פיתוח תשתיות דוגמת תחנות כוח, קווי מתח ומערכת הולכת החשמל, הובלת דלקים ואחסונם. תשתיות אלו דורשות הקצאת קרקעות בהיקף נרחב; חלקן באזורים שצפיפות האוכלוסין בהם גבוהה, ומקצתן לאורך חוף הים. בעשור החולף נרשמה התנגדות ציבורית ניכרת להקמת מתקני תשתית חדשים בקרבת מקומות יישוב, והיא הביאה לעיכוב ואף לביטול הקמתם של מתקנים דוגמת תחנות כוח פחמית באשקלון (פרויקט D), מתקן לקליטת גז טבעי בחוף דור, תחנות כוח מונעות בגז טבעי בבאר טוביה ובצפית, קווי המתח הגבוה במכתש רמון ובאור עקיבא, ועוד.

אתגר 3: מבנה משק החשמל

למבנה משק החשמל ולכוחות הפועלים בו יש השפעה מכרעת על עתידו ועל כיווני התפתחותו. יכולתה של הממשלה להשפיע על משק זה כאשר פועלת בו חברה מרכזית אחת, המצויה בבעלותה, גדולה לעין שיעור

מיכולתה להשפיע על שוק שבו כמה חברות פרטיות פועלות בנפרד במקטעים שונים (ייצור, הולכה, חלוקה ושיווק).

העיסוק בסוגיית מבנה משק החשמל בישראל מצוי ביחס הפוך לחשיבותו. מאידג'יסא, משלהי שנות השמונים, אז יצא תהליך הפרטת משק זה לדרך, פורסמו מחקרים מועטים העוסקים בסוגיה זו ובהשפעותיה הרחבות על עתידו. מאידג'יסא, מרבית הפרסומים בעניין המדיניות הרצויה במשק האנרגיה בישראל, בפרספקטיבה של המאבק במשבר האקלים והיכוונים הרצויים להתפתחותו, מתחמקים מעיסוק בשאלת מבנה המשק, כך שלמעשה מתקיים בסוגיות אלו שיח מקביל.

ואולם, הדיון בשאלת יצירתו של משק חשמל בריקיימה לישראל אינו יכול להתקיים במנותק משאלת מבנהו של משק זה. שכן החלטות בתחום המבנה הכלכלי הן בעלות השפעה מכרעת על יכולתה של הממשלה להוציא לפועל את מדיניותה בתחום האנרגטי, וליישם את האמצעים הנדרשים בצד ההיצע (פיתוח אנרגיה מתחדשת) ובצד הביקוש (צמצום צריכת החשמל). כניסתו הנרחבת של הגז הטבעי לשימוש במשק החשמל, לראשונה במחצית שנות האלפיים ומאוחר יותר בשנת 2013, מאפשרת למעשה את יישומה בפועל של תכנית הרפורמה במשק החשמל. על תכנית זו הוחלט עוד בשנת 1992, אך יישומה התעכב שנים ארוכות. השימוש בגז טבעי מאפשר להקים בקלות יחסית תחנות ייצור בבעלות פרטית, וכן תחנות כוח קטנות יותר במפעלי תעשייה ובמתקני ההתפלה. על פי מדיניות הממשלה, בשנים הקרובות צפויות לקום תחנות פרטיות במחזור משולב בהספק מותקן של כ־3,000 מגה־ואט, אשר מיועדות לספק את הביקוש במשק לעשורים הקרובים, בתוספת רזרבה של כ־20%. מכאן שיתכן שהחלטות הממשלה ולמדיניותה הכלכלית בתחום ההפרטה יהיו השפעות ניכרות ואף מכרעות בתחום מדיניות האנרגיה של ישראל.

המענה לאתגרים

המענה שמקדמת הממשלה לאתגרי משק החשמל, ובראשו הרחבת כושר הייצור – לאור מגמות הגידול המתמשך בביקוש והפרטת המשק במתכונת שנקבעה לפני כשני עשורים – אינו מענה בריקיימה. מגמות אלו עומדות בסתירה למגבלות טבעיות דוגמת המחסור בקרקע זמינה בהיקף הנדרש להקמת מתקני ייצור והולכה נוספים, להתנגדות הגוברת מצד תושבים להצבת מתקני תשתית בקרבת מקומות יישוב, ולזיהום הסביבתי הניכר הנלווה לייצור החשמל.

יש לזכור גם כי הדלקים המחצביים שנעשה בהם שימוש בהפקת החשמל, ובהם הגז הטבעי, הם משאבי טבע מתכלים שאינם מתחדשים, והם צפויים לאזול בעשורים הקרובים.

המענה לאתגרי משק האנרגיה מחייב אפוא אימוץ גישה חלופית. כזו המשלבת בין ניהול מושכל של השימוש בחשמל במשק במטרה לרסן את הגידול המתמשך בביקוש לו, לבין מעבר הדרגתי ונרחב לשימוש באמצעים חלופיים, מתחדשים ובני־קיימה להפקת חשמל, אשר יצמצמו את השפעותיו השליליות של משק זה על הסביבה ואת פליטת גזי החממה. עדים אלו הם שצריכים לעמוד בבסיס ובמוקד תכנית האב למשק החשמל

13 תוספת אגירה שאובה מקטינה את מספר המח"זמים ל־33 אבל מחייבת הקמת תחנות אגירה.

14 יש לזכור כי מדובר בתחנות שמרבית הזמן אינן פועלות כלל, ונועדו לספק את ביקוש השיא ולהוות גיבוי למקרי תקלה.

15 קיים זיהום ניכר גם מתעשייה, אך הוא ספציפי יותר לאזורי תעשייה. עם המזהמים הגדולים בתעשייה נמנים בתי הזיקוק ומפעלים הקשורים באנרגיה.

16 הרחבת השימוש בגז טבעי בישראל צפויה להפחית באורח ניכר את שיעור זיהום האוויר בכלל, ובכל הקשור לפליטת תחמוצות גפרית, מתכות וחלקיקים בפרט.

מתחדשות. הם נלקחים כמשתנים הנקבעים מבחון (אקסוגניים), ואינם חלק ממודל האופטימיזציה של התכנית.

2. משבר האקלים: הדיון המדעי

תאוריית "אפקט החממה" והשפעתו של האדם על האקלים הועלתה לראשונה על ידי מדענים במחצית הראשונה של המאה ה-19, במסגרת חקר שינויי האקלים בתקופות הקרח על פני כדור הארץ (Weart 2003). בשלהי אותה מאה הציג לראשונה ארנהיוס (Arrhenius) מדידות אמפיריות שבחנו את השפעת ריכוזי פחמן דו-חמצני על הטמפרטורה (שם). אולם משבר האקלים והשלכותיו על החברה האנושית הוצבו במרכז הדיון המדעי רק בתחילת שנות השבעים, בין היתר הודות לשיטות מדידה חדשות של ריכוז גזי החממה באטמוספירה ולפיתוחם של מודלים לחיזוי השפעתם של גזים אלו על אקלים כדור הארץ (Peterson, Connolley, & Fleck 2008). אך כיש מדענים החולקים על הסיבות להתחממות הגלובלית – וקולם התקשורת חורג בהרבה ממשקלם בקהילה המדעית (Oreskes 2004) – הרי שתאוריית "אפקט החממה" ותופעת משבר האקלים זוכים כיום לקונצנזוס מדעי רחב. מאות מדענים בכירים ממדינות רבות בעולם שותפים זה יותר משני עשורים לעבודת הפאנל הבין-ממשלתי של האו"ם לשאלת משבר האקלים (IPCC). הפאנל אף זכה בפרס נובל כהוקרה על עבודתו.

3. משבר האקלים: הדיון הפוליטי

העובדות והנתונים העולים מן המחקר המדעי הנרחב מורים אפוא על מגמת השינוי וחסר היציבות באקלים כדור הארץ כעל תופעה בעלת השלכות מרחיקות לכת על עתיד הציוויליזציה המודרנית. זאת כתוצאה מפעילות אנתרופוגנית – ובראשה פעילות תעשייתית ושרפת דלקים מחצביים בייצור אנרגיה ובתחבורה. עובדות אלו מטילות לפתחם של מקבלי ההחלטות במדינות העולם את הצורך לפעול – בדחיפות ובאחריות – לצמצום הפעילות האנושית העומדת בבסיס משבר האקלים, וכן למיתון השפעותיו. התרגום הפוליטי של צורך זה הוא אמנת המסגרת של האומות המאוחדות לסוגיית שינוי האקלים – UNFCCC – משנת 1992, אחת משלוש אמנות האו"ם המרכזיות העוסקות בתחום הסביבה (לצד האמנה למאבק במדבור והאמנה לשמירה על מגוון המינים). אמנת האו"ם יוצרת את מסגרת הדיון וקבלת ההחלטות על ידי המדינות החתומות, כך שיתחייבו להפחית את פליטת גזי החממה משטחן בשיעור נתון. הדיונים הבין-לאומיים בסוגיית משבר האקלים והרחבתו של פרוטוקול קיוטו נקלעו בשנים האחרונות למבי סתום, בעיקר בשל חוסר נכונותן של המדינות המובילות בשיעור פליטת גזי החממה משטחן – ארצות הברית וסין – וכמוהן מדינות רבות נוספות, להתחייב על מתווה מוסכם להפחתת פליטות גזי החממה. עם זאת, חלק מהמדינות נוקטות כיום באופן וולנטרי אמצעים שונים להפחתת פליטות גזי החממה משטחן, ולהתמודדות עם השלכותיו של משבר האקלים. עיקר המאמץ מתמקד בהגדלת שיעור החשמל המופק ממקורות מתחדשים בסך האנרגיה הנצרכת.

שמפתח משרד האנרגיה; לשמש משתנים עיקריים במתודולוגיה התכנונית, ויעד לאופטימיזציה במודלים הכמותיים. מחקרנו מתבסס על גישה חלופית זו ומסקנותיו מוכיחות כי התבססות על היעדים שצוינו לעיל מאפשרת להגיע למשק בריקיימה, בריא ונקי יותר, בד בבד עם צמצום הביקוש לחשמל באופן ניכר והקטנת החשיפה לסיכונים השימוש בדלקים מחצביים, וכל אלה במחיר שאינו גבוה ממשק המבוסס על דלקים מחצביים.

בהמשך פרק זה יוצג הרקע למחקר, ובו ארבעה נושאים עיקריים:

1. סקירה של מדיניות ממשלת ישראל בסוגיות משק האנרגיה.
2. סקירת רקע על אודות המאבק במשבר האקלים והצורך בצמצום פליטת גזי החממה.
3. סקירה של תגליות הגז הטבעי לחופי ישראל ושל השפעתן על משק האנרגיה.
4. סקירה של פעילות הממשלה לקידום התייעלות אנרגטית ולהרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת.

1. מדיניות הממשלה בסוגיות משק האנרגיה

למדינת ישראל אין – ומעולם לא הייתה – מדיניות סדורה במשק האנרגיה, והתנהלותה בתחום זה במשך השנים נסמכה על עבודתם השוטפת של גופיסימך חיצוניים דוגמת חברת החשמל, בתי הזיקוק לנפט, חברת הפחם, חברת תשתיות נפט (תש"ן), חברת נתיבי הגז הטבעי לישראל (נתג"ז) ואחרים. עם זאת, משרד האנרגיה הוא האחראי מטעם הממשלה לקבלת ההחלטות במשק האנרגיה והוא שמגדיר את יעדי המדיניות.

"מטרת העל" של משרד האנרגיה, להגדרתו, היא, כאמור, "הבטחת אספקה שוטפת של אנרגיה חשמלית בטווח הקצר והארוך בהיקף, בזמינות ובאיכות הדרושים וכן בעלות כלכלית, חברתית וסביבתית אופטימלית תוך שמירה על הביטחון האסטרטגי של מדינת ישראל, וכן להבטיח יכולת לספק את מלוא שירותי האנרגיה החיוניים בישראל במצבי חירום" (רודשטיין 2007: 8).

לפי הגישה התכנונית המקובלת, התייעלות והחיסכון מופחתים, אם בכלל, מהביקוש החזוי וזאת בגישה מצמצמת וזהירה הנובעת מרצון "להיות על הצד הבטוח". אשר לאנרגיות המתחדשות, ההנחה המקובלת היא שלישאל יש כושר הכלה מוגבל מאוד של אנרגיות מתחדשות וזאת עקב היותן תלויות מזג אוויר (קרינת שמש/ים/רוח), ומוגבלות בטווח הזמן של הייצור במשך היממה ובמשך השנה. על כן, אומר הטוען, כדי שאפשר יהיה לעמוד בתנאי קיצון מקסימליים נדרש גיבוי ניכר מאוד של ייצור חשמל ממקור של דלקים פוסיליים, ומכאן שאין כדאיות כלכלית להתקנת אנרגיות מתחדשות בשיעור גבוה מכ-20% מסך צריכת החשמל. הנחה מובלעת נוספת היא שאלו הן טכנולוגיות יקרות מאוד ויש לפתחן בהיקף מצומצם, לכל היותר כמענה לדרישה הבין-לאומית להפחתת גזי חממה. גילוי עתודות הגז הטבעי, שרמת הפליטות ממנו נמוכה מזו של פחם ודלקים מחצביים אחרים, רק מחזק טיעונים אלו.

כתוצאה מכל אלו, בתכניות האב לאנרגיה (אשר נערכת בימים אלו) מושם דגש מועט יחסית על החיסכון בחשמל ועל המעבר לאנרגיות

4. ישראל ומשבר האקלים

על אף הקיפאון בדיונים בין מדינות העולם בניסיון להגיע להסכמה בדבר הדרכים לצמצום את פליטת גזי החממה, נותרה סוגיית האקלים אחד האתגרים הכבירים ביותר הניצבים כיום בפני האנושות, והיא צפויה להישאר על סדר יומם של מקבלי ההחלטות גם בעשורים הקרובים. אף כי בשלב זה ישראל אינה מחויבת להפחית את פליטת גזי החממה משטחה, הרי שהיא שותפה למסגרת הדיונים וחתומה על ההסכמים הבין-לאומיים, ואף החלה בביצוע פעולות לשם כך.

בשל מיקומה הגאוגרפי על ספר המדבר, ובשל מאפיינים דוגמת צפיפות אוכלוסין גבוהה ומקורות מים מוגבלים, מדינת ישראל רגישה ביותר לשינויי אקלים, ואפשר היה לצפות כי תהווה כוח חלוץ במאבק הגלובלי לצמצום פליטות גזי החממה. עם זאת, תרומתה הממשית של ישראל לסך הפליטות בעולם והשפעתה על מגמת שינויי האקלים הגלובלית זניחה. לפיכך, ולאור המבוי הסתום שנקלע אליו התהליך הפוליטי הבין-לאומי, עולה השאלה אם על ישראל לנקוט פעולות להפחתת פליטות גזי החממה משטחה.

התשובה לשאלה זו מורכבת מהיבטים פוליטיים, כלכליים, סביבתיים ואתיים. בהיבט הפוליטי, ישראל היא צד באמנת האו"ם למאבק במשבר האקלים, ולפיכך עליה לעמוד במחויבויות הפוליטיות והמוסריות המוטלות עליה מתוקף זה. אמנם בשל מעמדה בפרוטוקול קיוטו (ישראל אינה נכללת ברשימת המדינות המפותחות שבנספח לאמנה, המחויבות בצעדי הפחתה) ישראל אינה מחויבת בפועל לנקוט צעדים כלשהם להפחתת פליטות. עם זאת, עליה למלא את ההתחייבות שנתן הנשיא שמעון פרס בדיוני ועידת האקלים שנערכה בקופנהגן בשנת 2009. על פי הצהרתו של מר פרס תעשה ישראל ככל שבידה להפחית ב-20% את פליטת גזי החממה משטחה עד לשנת 2020 (ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל"). יש לציין כי עם התקדמותו של התהליך הבין-לאומי של אמנת האקלים – המצוי כיום בפרשת דרכים – לשלב הבא, יש לצפות כי יחול שינוי במעמדה של ישראל, ויטלו עליה מגבלות ודרישות לפעול לצמצום הפליטות של גזי החממה. דרישות אלה יהיו מחמירות מהיעד הנוכחי שהציבה הממשלה.

בהיבט הכלכלי, הצטרפותה של ישראל לארגון המדינות המפותחות (OECD) מחייב אותה לגבש מדיניות אקלים מוסדרת ולנקוט פעולות של ממש לצמצום פליטת גזי החממה (המועצה הלאומית לכלכלה, 2013). פעילויות רבות המביאות להפחתת פליטות גזי חממה, בפרט כאלה הקשורות בהתייעלות אנרגטית, טומנות בחובן גם ערך כלכלי אמיתי למשק. נוסף לכך, פיתוחן של טכנולוגיות חדשניות להפקת אנרגיה לצורכי המשק המקומי צפוי להביא לתרומה ניכרת לצמיחה במשק, ליצירת מקומות תעסוקה ולפיתוח תעשיות אשר יפנו לשווק את הטכנולוגיות שלהן בחו"ל. בהיבט הסביבתי, ברי כי יישומה של תכנית לפיתוח משק אנרגיה בריקיימה יביא לצמצום הזיהום הסביבתי הנגרם משרפת דלקים פוסיליים הן במשק החשמל הן בתחבורה, זיהום שהוא בעל השלכות בריאותיות כבדות. מעבר לכך, אין לשכוח את ההיבט האתי של הפחתת גזי חממה. קל מאוד להעלות את טיעון ה"טרמפיסט" (free rider), שלפיו המאמץ

הישראלי בנושא זה לא יעלה ולא יוריד לגבי העולם. לדעתנו, זהו טיעון לא מוסרי, ומהבחינה האתית מתחייב מאמץ של כל קהילה, עיר, ומדינה להשתתף במאמץ להקטנת הסיכון להתחממות הגלובלית.

נוסף לכל אלו, ביסוסו של משק האנרגיה על טכנולוגיות להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים ומקומיים יפחית את תלותה של ישראל במקורות אנרגיה חיצוניים ואת חשיפתה לתנודות במשק הדלקים העולמי, ויגדיל את היציבות והביטחון האנרגטי של תושביה.

מחקרים ועבודת מטה בסוגיות האקלים ומשק האנרגיה

מאז הצטרפותה של ישראל לאמנת האקלים של האו"ם נערכו בהזמנת הממשלה מחקרים אחדים בתחום האקלים, שמטרתם לעקוב אחר פליטת גזי החממה בישראל ולהציג אמצעי מדיניות להתמודדות עם הבעיה. בהקשר זה יש לציין את עבודתו של אבנימלך משנת 2000 (אבנימלך, 2000) – עבודה ראשונית שנעשתה על ידי מוסד שמואל נאמן בטכניון ובה הוצגו לממשלה המלצות בדבר שורת אמצעי מדיניות שעליה לאמץ לשם הפחתת פליטות גזי החממה. כעשור מאוחר יותר, לקראת ועידת האקלים בקופנהגן (2009), החלה ממשלת ישראל בעבודת מטה לגיבוש מדיניותה בתחום האקלים. לשם כך הזמינה הממשלה שתי עבודות מחקר. במחקר האחד מופה המצב הקיים בישראל (חברת חפץ א' ושות' & חברת DHV MED בע"מ, 2009), ובמחקר האחר הוצגו אמצעים טכנולוגיים להפחתת פליטות גזי חממה (חברת מקינזי ושות', 2009). שתי עבודות מחקר אלו התבססו על המתודולוגיה של חברת מקינזי העולמית.

עם תום ועידת האקלים שנערכה בקופנהגן בשנת 2009, שבמהלכה התחייבה ישראל ליעד של הפחתת 20% מן הגידול המתוכנן בפליטת גזי החממה הצפויה משטחה עד לשנת 2020 (בתרחיש "עסקים כרגיל"), החליטה הממשלה על הקמת ועדת היגוי בין-משרדית בראשות מנכ"ל משרד האוצר דאז, מר חיים שני (ועדת שני). הוועדה גיבשה הנחיות ליישום האמצעים הנדרשים להפחתת פליטות גזי החממה בישראל על פי יעדי הממשלה. היא הציגה תכנית פעולה לאומית להפחתת פליטות גז חממה על בסיס עבודתם של שלושה צוותי משנה של נציגים ממשרדי הממשלה, ואלה עסקו בתחומי ההתייעלות האנרגטית, התחבורה והבנייה הירוקה (משרד האוצר, 2011).

בחודש יולי 2010 פרסם משרד האנרגיה מסמך מדיניות המציג תכנית לאומית להתייעלות אנרגטית בין השנים 2010–2020 (משרד האנרגיה והמים, 2010a). זאת כחלק מיישום החלטת הממשלה מיום 18 בספטמבר 2008 אשר קבעה יעד של הפחתת 20% מצריכת החשמל הצפויה בשנת 2020 (החלטת ממשלה 4095, צעדים להתייעלות אנרגטית – צמצום בצריכת החשמל). תכנית זו הייתה הראשונה מסוגה. היא ניתחה את פוטנציאל החיסכון במגזרי המשק השונים בנית "מלמטה למעלה", והציגה המלצות למדיניות שתשיג את היעד.

באוגוסט 2010 פרסם משרד האנרגיה את עיקרי מדיניותו לשילוב אנרגיה מתחדשת במערך ייצור החשמל בישראל (משרד האנרגיה והמים,

2010b). זאת, בהמשך להחלטת ממשלה מיום 12 בינואר 2009 (החלטת ממשלה 4450, קביעת יעד מנחה וגיבוש כלים לקידום אנרגיות מתחדשות בפרט באזור הנגב והערבה). אשר קבעה כי 10% מתפוקת החשמל בישראל בשנת 2020 יהיו ממקורות מתחדשים.

מסמך מדיניות נוסף העוסק במדיניות הממשלה במשק האנרגיה המתחדשת פורסם בשנת 2013. המסמך נכתב על ידי צוות בין-משרדי שריכזה המועצה הלאומית לכלכלה, ובו בוחן הצוות אמצעי מדיניות שונים לעידוד השימוש באנרגיה מתחדשת, בהמשך להחלטות הממשלה בנושא (המועצה הלאומית לכלכלה, 2013). המועצה פועלת גם בתחום תחליפי הדלקים ופרסמה מחקר בתחום זה (חברת DHV MED בע"מ & קבוצת פארטו, 2012).

החלטות הממשלה בעניין צמצום הפליטה של גזי החממה

העבודה הבין-משרדית שנעשתה בשנת 2009 כחלק מהיערכות המדינה לוועידת קופנהגן, וההחלטות שקיבלה הממשלה בשנים שלאחר מכן, סימנו קפיצת מדרגה משמעותית עבור ישראל בהתייחסות לסוגיית משבר האקלים בכלל ולפליטת גזי החממה בפרט - בציבור ובקרב מקבלי ההחלטות.

עם זאת, ראוי לשוב ולהדגיש כי מדינת ישראל טרם גיבשה מדיניות אנרגיה לאומית אחידה וארוכת טווח, וכי החלטות אלו יוצרות לכל היותר מדיניות אדי-הוק בתחום הפחתת פליטות גזי החממה, ההתייעלות בצמצום צריכת החשמל והשימוש באנרגיה המופקת ממקורות מתחדשים. עבודה המטו והחלטות הממשלה משקפות גם את מגוון הגישות והדעות בממשלה בסוגיית מדיניות האנרגיה הלאומית, ואלה אינן בהכרח עולות בקנה אחד עם תפיסתו של משרד האנרגיה והמים, המופקד על גיבוש המדיניות הלאומית, ובחלקן אף סותרות אותה. עם הגופים השותפים לעיצוב המדיניות נמנים המועצה הלאומית לכלכלה שבמשרד ראש הממשלה; משרד האוצר; המשרד להגנת הסביבה; רשות החשמל; חברת החשמל וגופים נוספים.

ההחלטות שקיבלה ממשלת ישראל בשנים האחרונות מציבות יעדים כמותיים ואיכותיים לצמצום פליטת גזי החממה משטחה של ישראל, במגזרי המשק השונים. בין היתר הוצבו יעדים לצמצום צריכת החשמל ב-20% עד לשנת 2020 מתרחיש "עסקים כרגיל", להרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת לכדי 10% מתפוקת החשמל במשק ולהגדלת ההשקעה במחקר ובפיתוח. החלטות אלו מלמדות על נכונות פוליטית - גם אם מוגבלת - לקדם את הסבתו של משק האנרגיה בישראל בכיוון בר-קיימא, להצטרף למאבק העולמי במשבר האקלים, וחשוב יותר - להשקיע בכך משאבים נכבדים. ואולם היעדר איינהגורטיבית וחזון ארוך טווח במשק האנרגיה עלולים להביא לבזבז משאבים ולכישלון בהשגת היעדים הרצויים.

תכנית האב למשק האנרגיה

בשנת 2006 החליטה המועצה הארצית על הכנת תכנית מרחבית ותמ"א

לתשתיות משק האנרגיה בישראל (תמ"א 41). בתגובה יזם משרד האנרגיה והמים את גיבושה של תכנית אב למשק האנרגיה, כדי שתשמש אותו לקביעת מדיניות ארוכת טווח במשק האנרגיה, ואשר ממנה תיגזר תכנית המתאר הפיזית. במכרזים להכנת תכנית האב ותכנית המתאר זכתה חברת "תהל", והיא נמצאת בשלבי הכנה מתקדמים. מאחר שההליך התכנוני נגזר ממסגרת תכנית האב, היא צפויה ככל הנראה להנחות בעיקרה את התכנון הפיזי של תשתיות האנרגיה בישראל בעשורים הקרובים. זאת על בסיס תפיסתו וגישתו של משרד האנרגיה, ובלי לפרוש חזון חדש בתחום זה.

תגליות הגז הטבעי ועתיד משק האנרגיה

הודות לתגליות הגז בים התיכון עומד לרשות ישראל, לראשונה זה עשורים רבים, מקור אנרגיה מקומי, אשר יכול להקנות לה מידה רבה של עצמאות אנרגטית. לאחר שנים של משבר צפויה הסבתו של משק האנרגיה לגז טבעי להביא ליציבות, להפחית את עלויות השימוש באנרגיה לציבור ולצמצם את הזיהום הסביבתי הנגרם משרפתם של דלקים מזהמים בהרבה, פחם ותוצרי נפט. נוסף לכך, זמינותו של הגז מאפשרת את פעילותם של יצרני חשמל פרטיים, ואת הוצאתה לפועל של תכנית הממשלה להפרטה ולשינוי מבני במשק החשמל. עם זאת, יש לזכור כי גם הגז הטבעי הוא מקור אנרגיה מתכלה ולא מתחדש, כמותו מוגבלת, ובשרפתו נפלטים מזהמים וגזי חממה. אמנם השימוש בגז טבעי מחליף דלקים מזהמים ולכן הוא חיובי מבחינת הפחתת הפליטות. אולם אם משק החשמל של ישראל ימשיך בהתפתחות בזבזנית, למרות כל יתרונותיו של השימוש בגז הטבעי נגיע למצב של עלייה בפליטות המזהמים וגזי החממה, וכן לעלייה ניכרת בצורך בהקמת תשתיות אנרגיה שהן בעלות השלכות כלכליות וקרקעיות רחבות (ובכלל זה תשתיות לקליטה ולטיפול בגז הטבעי, להולכתו ולחלוקתו).

הגז הטבעי בישראל

גילוי הגז הטבעי מול חופי אשקלון ב־1999 (מאגר "מארי-B") והגעתו לארץ של צינור הגז מאותו קידוח בשנת 2004, סימנו את תחילת עידן הגז הטבעי במשק האנרגיה של ישראל. תחנת הכוח הראשונה שהוסבה לגז (תחנת "אשכול" באשדוד) החלה לפעול בשנת 2004, ולאחריה תחנות נוספות (בשנת 2006 הוסבה תחנת הכוח "רדינג" בתל-אביב לשימוש בגז טבעי, ובכך פחת בדרמטיות זיהום האוויר באזור תל-אביב). בשנת 2007 החלה אספקת גז טבעי ממצרים לישראל באמצעות צינור, ועודדה מפעלי תעשייה גדולים, בכללם בתי הזיקוק לנפט ומפעלי ים המלח, להתחיל בתהליך הסבה לשימוש בגז. בשנת 2008 נתגלה אל מול חופי ישראל מאגר הגז הטבעי הגדול "תמר", ולאחריה נתגלה בשנת 2010 מאגר "לווייתן". כמויות הגז הגדולות שבמאגרים אלו משנות דרמטית את תמונת משאבי האנרגיה של ישראל.

כניסתו הנרחבת לשימוש של הגז בחברת החשמל הייתה מהירה בקנה מידה עולמי, ושיעור השימוש בגז זינק בתוך שש שנים בלבד מ-0% לכ-36% מהפקת החשמל במשק בשנת 2010. על פי הערכות משרד האנרגיה, רכיב הגז בתמהיל הדלקים לייצור חשמל בישראל ילך ויגדל עד לכדי מחצית

17 יש להעיר כי אין בנמצא מסמך מדיניות הקובע יחסים אלו. גורמים שונים במשק החשמל, ואף גורמים שונים במשרד האנרגיה והמים עצמו, מציינים יעדים שונים לתמהיל הדלקים העתידי לייצור חשמל.

הגז הטבעי מול התייעלות אנרגטית ואנרגיות מתחדשות

כניסת הגז הטבעי לשימוש נרחב בייצור החשמל נתפסת כאיום על פיתוחם של מקורות אנרגיה מתחדשת ועל התייעלות האנרגטית. יש חשש אמיתי כי מחירי חשמל נמוכים (בעקבות ירידת העלויות של הפקת החשמל בשל המעבר לשימוש בגז טבעי זול) יפחיתו את הכדאיות הכלכלית של פרויקטים להתייעלות אנרגטית, ואף יביאו לעצירת הפעילות בתחום בישראל.¹⁸ זאת בשל ראיית הגז הטבעי כחלופה זולה ומועדפת להפחתת פליטות בהשוואה להשקעה בהתייעלות אנרגטית. אשר לאנרגיה המתחדשת, מחירי חשמל גבוהים נתפסים (בצדק) כיתרון, שכן הם מאפשרים את כניסת השימוש במקורות אנרגיה אלו. לכן הגז הטבעי, אשר יפחית את עלות הפקת החשמל, נתפס כאיום גם על פיתוחו של ענף האנרגיה המתחדשת. למרות האמור לעיל, לגז הטבעי יש פוטנציאל לשמש כ"דלק מעבר" בעבור ישראל; ממשק אנרגיה המבוסס על דלקים מזהמים לעידן של משק אנרגיה המבוסס על אנרגיה מתחדשת. ביזורו של משק החשמל כדי ליהנות ממלוא התועלות של הגז הטבעי עשויה לסייע אף בטווח הזמן הרחוק יותר, משום שהקמת מתקני אנרגיה מבזרים תהווה בסיס למיני ולמיקרו־רשתות חכמות, הדרושות לצורך ביסוס משק החשמל על אנרגיה מתחדשת.

כאמור, בראייה קצרת טווח הירידה הצפויה במחירי האנרגיה והחשמל בישראל, שתחול בעקבות המעבר לגז, מאיימת להביא לירידה בכדאיות הכלכלית שבהתייעלות האנרגטית ובשילוב של מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה במשק. עם זאת, כפי שיוצג בהמשך במסמך זה, בטווח הארוך יש להתייעלות אנרגטית יתרון ברור על כל סוג של טכנולוגיה להפקת אנרגיה, ובפרט כשמביאים בחשבון כי הגז הטבעי המקומי יאזל בתוך שנים עד שלושה עשורים, וכי המשך ההתבססות על דלקים מחצביים יגרוור עלויות כלכליות גבוהות וחשיפה לתהפוכות גאופוליטיות.

מתפוקת החשמל כבר בשנת 2015, כ־60% מתמהיל הדלקים בשנת 2020, ואף עד כ־75% בשנת 2040.¹⁷ זאת, לצד האפשרות להסב חלק מתחנות הכוח המופעלות בפחם לשימוש בגז טבעי.

בשנים 2011–2012 חלה ירידה חריפה בשיעור הגז הזמין למשק, בשל הפסקת הזרמת הגז הטבעי ממצרים והתדלדלות המאגר המקומי, "מארי-B". ואולם חיבורו של מאגר "תמר" בשנת 2013 הקל את מצוקת הגז במשק. בשנים הקרובות צפוי משק האנרגיה של ישראל לעבור מהפכה של ממש, עם התרחבות השימוש בגז הטבעי בתעשייה, בהפקת החשמל ואף בתחבורה, בשל זמינותו הגדולה, יתרונותיו הרבים לסביבה ובעיקר בשל מחירו הנמוך, ובפרט בהשוואה למחירי הנפט ותזקיין. עם זאת, עד להפיכתו של הגז למרכיב משמעותי במשק האנרגיה של ישראל נותרו מכשולים שונים, הן בהיבט התשתיתי¹⁸ הן בהיבט הכלכלי (אתגר המימון של תשתיות אלו, והשאלה מי יישא בנטל המימון).

הגז הטבעי מציב אתגרי מדיניות ומעלה שאלות רבות הקשורות לניהולו של משק האנרגיה הישראלי, ולמקומה של הממשלה מול השוק הפרטי בתחום זה, למשל בשאלת הייצוא של קרוב למחצית מעתודות מהגז, או בסוגיית המיסוי ומדיניות התמלוגים על רווחי הגז (חוק מיסוי רווחי נפט, התשע"א – 2011).

שינוי דרמטי במשק החשמל

שילובו של הגז הטבעי במשק החשמל של ישראל אינו מסתכם בשינוי תמהיל הדלקים, וכפועל יוצא מכך – בהוזלת עלות הפקת החשמל ובהפחתת הזיהום הסביבתי. יישום של מדיניות מושכלת לשימוש בגז הטבעי פותח בפני ישראל הזדמנות למהפכה מבנית במשק האנרגיה ולביזורו. זאת באמצעות הקמת מתקנים קטנים ואף זעירים להפקת חשמל בשכונות ובערים, באזורי תעשייה, בבנייני מסחר ומשרדים וביישובים במגזר הכפרי. התקנת מיקרו־טורבינות הפועלות בטכנולוגיה של קו־גנרציה (הפקת חום וחשמל) וטרי־גנרציה (הפקת חום, קור וחשמל), אשר יעילותן האנרגטית גבוהה ביותר (למתקנים מסוג זה נצילות של 85%–90%), תקטין באופן ניכר את עלויות האנרגיה לצרכנים ותצמצם את זיהום הסביבה. היא גם תפחית את העומס על רשתות חלוקת החשמל (ותקטין את הצורך בהרחבתן), שכן הפקת האנרגיה תתבצע במתקנים שבקרבת אזורי הביקוש.

עם זאת, מעבר לייצור מבוזר במשק האנרגיה של ישראל מחייב הקמה של תשתית מפותחת להולכת הגז, וכן הקמה של מיני־רשתות ומיקרו־רשתות חכמות בתחום הייצור, החלוקה וההולכה של החשמל, זאת כדי שאפשר יהיה לווסת ולנהל את הולכת החשמל לרשת ולצרכנים מאותם מתקני הייצור המבוזרים. יש להניח כי בדומה לכל שינוי מקביל במשק החשמל, תהליך זה יארך שנים מספר, וידרוש נחישות פוליטית מצד מקבלי ההחלטות והמתכננים.

18 קושי בהבאת הגז הטבעי לישראל בשל התנגדות ציבורית עזה להחלטה היכן למקם תשתית קליטה נוספת לגז; מגבלת ההקמה האטית של תשתיות ההולכה והחלוקה לגז הטבעי; מגבלת הצינור היחיד וספיקתו הנמוכה מאסדת הגז של "תמר", ועוד.

19 לדוגמה, בתקציב המדינה לשנים 2013–2014 הוקפאו ההקצבות לפרויקטים של הפחתת פליטות גזי חממה והתייעלות אנרגטית.



מתודולוגיה

מטרת מחקר זה הינה לבחון עד כמה ניתן לצמצם את פליטת גזי החממה בישראל ממגזר החשמל על רקע האתגרים הצפויים למשק האנרגיה הישראלי בעתיד, תוך כדי שמירה על ביטחון אספקת החשמל, בעלות סבירה למשק, ובהתחשב בטכנולוגיות ידועות וקיימות.

ואף מועצת האיחוד (בשנת 2009), שהוא צמצום פליטת גזי החממה באירופה ב־80%-95% עד שנת 2050, בהשוואה לשנת 1990. לאחר פרסומן של עבודות ראשונות מסוג זה הוכנו גם ניירות עבור או על ידי ממשלות רשמיות (למשל ממשלות אוסטרליה ובלגיה (Australian Energy Market Operator, 2013; Federal Planning Bureau, 2013), המציבים יעדים אלו ובוחנים את הדרך להגיע אליהם.

- כמו בעבודות אחרות מסוג זה, גם בעבודה זאת הקווים המנחים היו אלה:
1. שמירה על ביטחון אספקת החשמל כפי שהוא כיום.
 2. יעד של אפס פליטות פחמן (או קרוב לכך ככל האפשר).
 3. שימוש בטכנולוגיות ידועות וקיימות, ולא בטכנולוגיות משוערות התלויות בפיתוח עתידי.

בישראל המצב שונה מהמצב במדינות אירופה. ראשית, בישראל לא הוגדר יעד ממשלתי - בדומה ליעד שהציב האיחוד האירופי - להפחתת פליטות גזי חממה. נושא הגנת האקלים והפחתת פליטות גזי החממה מקבל התייחסות שולית בהשוואה למדינות אירופה. שנית, מצבה של ישראל הוא ייחודי בכל הקשור לצורכי משק האנרגיה ולמקורות המתחדשים העומדים לרשותה, והוא מעמיד אתגר בפני פיתוח של משק חשמל נקי מפליטות: היות שישראל היא "אי חשמלי", ורשת החשמל שלה אינה מחוברת לאף מדינה שכנה, עליה לדאוג לאספקת חשמל אמינה ובטוחה; המקורות המתחדשים העומדים לרשותה של ישראל לייצור אנרגיה הם מוגבלים - אין בה די מים ליצירת חשמל הידרואלקטרי, אין בה תנאים להפיכת חום גאותרמי לאנרגיה, ואשר לניצול השמש והרוח - השטח המצומצם של המדינה מערים קשיים גם על יישומים אלו.

המתודולוגיה של המחקר כוללת שני אלמנטים מרכזיים: מצד אחד - צמצום צריכת החשמל והתייעלות אנרגטית (Power Down), ומצד שני - ייצור חשמל באמצעות אנרגיה נקייה ומתחדשת ככל שניתן (Power Up) - במגבלות הפיזיות של ישראל.

המחקר בוחן לא רק את תרחיש המקסימום האפשרי, אלא ספקטרום רחב של תרחישים, שכל אחד מהם מייצג מדיניות שונה בתחום התייעלות והחזרת האנרגיות המתחדשות. באמצעות הכלים שפותחו במסגרת העבודה

המחקר "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל" הוא מחקר ייחודי וראשון מסוגו בישראל המציג חזון אלטרנטיבי למשק החשמל של ישראל. המחקר מציב חזון מרחיק לכת של משק חשמל מופחת פליטות, השומר על ביטחון האספקה. חזון זה מבוסס על מתודולוגיה של "צפייה לאחור" (Back-Casting), שבה הגדרת היעד נעשית בהתחלה, ובמחקר נבחנו האמצעים שבהם אפשר להגיע ליעד זה והמשמעויות הנגזרות מהם. היעד בעבודה זאת הוגדר כמינימום פליטות גזי חממה - אפס פליטות - ככל שאפשר להגיע לכך. מראש, לא היה ברור אם בישראל (בשל מגבלות של מקורות האנרגיה המתחדשת וכן מגבלות פיזיות) אפשר להגיע ליעד זה של אפס פליטות, ולו ברמה התאורטית.

המתודולוגיה של המחקר מבוססת על המתודולוגיה במחקרים דומים שנערכו לפניו במדינות אחרות, ובהן: בריטניה (Helweg-Larsen & Denby, 2009; Wright & Hearps, 2007; Kemp, 2010; Bull, 2007), אוסטרליה (Denby, 2009; Wright & Hearps, 2007; Kemp, 2010; Bull, 2007), אירופה (European Climate Foundation, 2010; Boot & van Bree, 2010; Hoste et al., 2009; Jacobson et al., 2013;), מדינות בארצות הברית (Z. Jacobson et al., 2013), ועוד. מחקרים אלו נערכו על ידי גורמים לא ממשלתיים בשילוב גופים אקדמיים, ובשיתוף פעולה עם ארגוני חברה אזרחית. בחלק מהמחקרים לקחו חלק גם גורמים עסקיים במשק האנרגיה. המחקר באירופה הציב את היעד שעליו הצהירו מנהיגי האיחוד האירופי

ביכולתנו להשוות בין התרחישים ובין המשמעויות של כל אחד מהם.

הגדרת שנת היעד: 2040

שנת 2040 נבחרה כיוון שהיא רחוקה דייה כדי להשתחרר מהמגבלות של מערך תחנת הכוח הקיים ולאפשר מיצוי של תהליכי שינוי ויישום מדיניות חדשה, אשר מטבעם הם ארוכי טווח. עם זאת, מבחינת מונחי תכנון של משק האנרגיה, שנת 2040 היא ממש "מעבר לפינה", והתכנון לקראתה צריך, למעשה, להתחיל כבר עתה. יתר על כן, החלטות תכנוניות שיתקבלו בעשור הקרוב ישפיעו על הכיוון שבו יתפתח משק האנרגיה של ישראל ועל יכולתה להגיע ליעד של "אפס פליטות" ב-2040.

הגדרת צריכת הבסיס: תחזית הביקוש לחשמל ל-2040

תחזית הביקוש לחשמל (צריכת הבסיס) מבוססת על ניתוח של מגמות בביקוש לחשמל בישראל בעשרים השנים האחרונות, ובו נמצא כי הגידול בצריכה הוא ליניארי בקירוב רב. על פי חיזוי (אקסטרפולציה) של נתוני הצריכה בתקופה זו הונח כי בתרחיש הבסיס תהיה צריכת החשמל 101TWh (קרי 101 מיליארד קוט"ש) בשנה. זהו גידול של 74% ביחס ל-58TWh שנצרכו ב-2012, והוא מבטא קצב גידול של כ-2% בשנה, מעט יותר משיעור גידול האוכלוסייה, שנאמד ב-1.75% בשנה. הנושא מוצג בפירוט בפרק ג ובנספח א.

צמצום והפחתת צריכת החשמל - Power Down

החיסכון הפוטנציאלי נאמד בגישת "מלמטה למעלה" (Bottom-Up). בוצע ניתוח של פוטנציאל ההתייעלות האנרגטית על פי הפונקציות הטכנולוגיות (מיזוג אוויר, תאורה, חימום מים) ועל פי הסקטורים (ביתי, מסחרי, ציבורי, תעשייתי וכו'). עבור כל תחום טכנולוגי נאמדה רמת ההתייעלות המקסימלית האפשרית, מעבר להתייעלות אשר תתרחש כתוצאה משיפורים טכנולוגיים גם ללא התערבות רגולטורית. בוצעה עבודה מקדימה על הניסיון בעולם בחיסכון הנובע משינויים התנהגותיים, ומתוכה נגזרו פרמטרים באשר לפוטנציאל החיסכון במגזר זה. העבודה כללה סקירה של מרבית הפרויקטים אשר בוצעו בשנים האחרונות בעולם בתחום זה, ושל התוצאות שנמדדו בהם. כמו כן נלקחו בחשבון שינויים ובנייה בבנייה (בנייה ירוקה) ותרומתם להפחתת צריכת האנרגיה בבניינים, על בסיס עבודה מקיפה וראשונה מסוגה בישראל שהוכנה לצורך מסמך זה.

ייצור נקי של חשמל - Power Up

כדי לבחון ולהעריך את הפוטנציאל להחדרת אנרגיות מתחדשות בהיקף מקסימלי, ובתוך כך לתת מענה לביטחון האספקה, נבנה כלי ייחודי אשר באמצעותו ערכנו סימולציה עבור שנה שלמה של נתוני הביקוש השעתי מול הייצור ממקורות מתחדשים. באמצעות הסימולציה בוצעה אופטימיזציה כלכלית להשגת תמהיל המקורות המתחדשים בעלויות הנמוכות ביותר למשק.

האופטימיזציה מתחילה מנקודת הבסיס (שבה אין חיסכון וכל ייצור החשמל הוא מדלקים פוסיליים). עם התקדמות החישוב גדל הייצור מאנרגיות מתחדשות (וההספק המתקן) וקטן הייצור מדלקים. בכל נקודה מופעלת הסימולציה לבחירת סוג האנרגיה המתחדשת הזול ביותר באותה נקודה מבחינת העלות לקוט"ש המוסב מייצור באמצעים פוסיליים, ולא יותר ממגבלת מקסימום לאותו סוג אנרגיה.

המחקר מתייחס לטכנולוגיות הללו של אנרגיות מתחדשות:

- סולארית: פוטו-וולטאית ותרמו-סולארית, כולל אגירה.
- רוח: ביבשה ובים.
- גלי ים.
- אנרגיה מפסולת וביומסה.
- אגירת אנרגיה: אגירה שאובה ורכבים חשמליים.

עבור כל אחד מסוגי הטכנולוגיות בוצעה הערכה מעמיקה של פוטנציאל הייצור שלה בישראל במגבלות הקיימות (שטחים, אזורי רוח, כמות פסולת, וכד').

מתודולוגיה לניתוח הכלכלי

הסימולציה בחנה את האפשרות הטכנית של יישום אנרגיה מתחדשת בכל שעה ושעה משעות היום לאורך שנה, וכן ביצעה אופטימיזציה כלכלית. בכל צעד, תכנית האופטימיזציה בחרה את מקור האנרגיה המתחדשת שעלות ההסבה אליו היא הזולה ביותר.

הבסיס לאופטימיזציה הכלכלית ניתן על ידי חישוב של עלויות ייצור החשמל הכוללות במשך שנה שלמה, ובהתייחס לעלויות של כל אחד מהמקורות. עלות זאת כוללת את עלויות ההון, עלויות המימון, עלות התפעול ועלות הדלקים (במקרה של ייצור מדלקים פוסיליים). לאלה הוספו העלויות החיצוניות: עבור ייצור מדלקים פוסיליים הוספו עלויות זיהום האוויר ופליטות גזי חממה, לפי הערכים המקובלים על הגורמים הרשמיים כיום; עבור ייצור סולארי הוספו עלויות השימוש בשטחים פתוחים. כמו כן, בתרחישים הכוללים התייעלות במשק הוספה עלות ההשקעה באמצעי התייעלות. בכל התרחישים שנבחנו נלקחו בחשבון המחירים (הן עבור אנרגיה פוסילית הן עבור אנרגיה מתחדשת) כפי שהם כיום, בשנת 2013. בהמשך בוצעו בחינות רגישות של שינויים במחירי האנרגיה.

לאחר ביצוע הסימולציה והאופטימיזציה הכלכלית הוסקו מסקנות באשר לאפשרות הפיזית להחדרת אנרגיה מתחדשת בכל מצב שנסקר, והתקבלה הערכה של עלויות משק החשמל והעלות לקוט"ש בכל תרחיש. בחינה של תרחישים אחדים והשוואה ביניהם העלו מסקנות מעניינות ומשמעותיות המרכזית שבהן היא הקשר שאי אפשר לנתקו בין ההתייעלות האנרגטית לבין הפוטנציאל להחדרת האנרגיה המתחדשת.

מבחינה מתודולוגית נציין עוד כי התחשיבים המופיעים בפרק ו אינם מתייחסים לסוגיית האנרגיה ה"שקועה", קרי פליטת גזי החממה בתהליך הייצור ושינועם של המתקנים להפקת אנרגיה עצמם.

הסימולציה הכמותית שבמחקר זה מתייחסת לשנת 2040 בלבד (ניתוח חתך). ברור מאלו כי יש חיסרון בכך שאין התייחסות למתווה האופטימלי

לאורך השנים אשר יאפשר להוביל את המשק אל מימוש קווי המדיניות הנבחרים.

בחרנו להתמקד בניתוח חתך בשל המשאבים שעמדו לרשות הפרויקט, וכן משום שאין בניתוח זה כדי להחליף את תכנית האב לאנרגיה הנכתבת בימים אלו. כאמור, הבחירה בשנת 2040 נעשתה משתי סיבות: מחד־גיסא, זו שנה עתידית רחוקה דייה, וההשפעה של המאפיינים הנוכחיים של ייצור החשמל בישראל לא יהיו דומיננטיים, שכן מרבית תחנות הכוח בישראל ואמצעי הייצור בהן כבר יופחתו וייגרטו. מאידך־גיסא, זו שנה קרובה דייה מבחינת אופק תכנון, כך שלאור תוצאותיה אפשר יהיה לבצע "קיפול לאחור" ולהתחיל להיערך ליישום מדיניות חשמל נקייה ויעילה בישראל.



צמצום הביקוש לאנרגיה

הגישה המסורתית בתכנון משק האנרגיה בישראל היא אספקת מלוא הביקוש החזוי לאנרגיה בכל עת ("חזה וספק") באמצעות הקמת תחנות כוח נוספות. גישה זו אינה משקללת די הצורך מגבלות חיצוניות דוגמת זמינות הקרקע להקמת תשתיות והפחתת זיהום הסביבה. מחקר זה מציב יעד חלופי של צמצום פליטת גזי החממה ובוחר את השילוב שבין הפחתת הביקוש והגדלת השימוש במקורות מתחדשים.

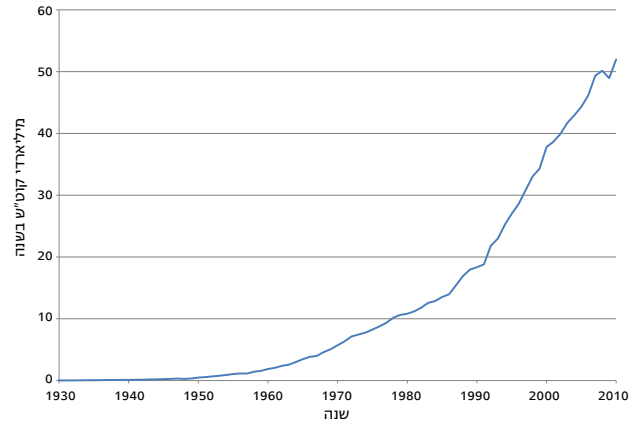
תחזיות הביקוש משמשות לבניית כמה מודלים: לחיזוי הביקוש לחשמל בכל שעה משעות היממה; להערכה של צריכת האנרגיה המצרפית; ולרמת ביקוש השיא לחשמל – כל אלה לטווח הזמן הארוך. בתחזיות אלו טמונה כמובן אי־ודאות גדולה: לא אחת מתברר כי תחזיות הכלכלנים לצמיחה במשק אינן עולות בקנה אחד עם המציאות. לחלופין מתרחשים במשק האנרגיה בפרט ובמשק בכלל (כמו בכלכלת העולם) שינויים מבניים אשר קשה לחזותם אך השפעתם על משק האנרגיה ניכרת (דוגמת כניסתו של הגז הטבעי לשימוש או הקמתם של מתקני התפלת מים בהיקף נרחב). לפיכך תחזיות הביקוש מותאמות ומעודכנות מדי פעם על פי התנאים המשתנים. תחזיות הביקוש לאנרגיה משקפות את הגישה המסורתית הרווחת במשרד האנרגיה, ולפיה מטרת העל בניהול משק החשמל היא אספקת מלוא הביקוש לאנרגיה בכל עת ("חזה וספק"), ולכן יש לתכנן ולפתח מבעוד מועד את התשתיות הנדרשות לאספקת הביקוש החזוי. ואולם גישה זו אינה משקללת די הצורך מרכיבים חיצוניים דוגמת מגבלה על זמינות הקרקע להקמת התשתיות, הצורך בהפחתת זיהום הסביבה ומגבלות עתידיות על זמינות של דלקים מחצביים בשוק העולמי. כמו כן נעדרים ממנה אמצעי מדיניות חיוניים לפיתוחו של משק אנרגיה בר־קיימה בישראל דוגמת ריסון הגידול בביקוש לאנרגיה, הגדלת שיעור האנרגיה המופקת ממקורות מתחדשים, ושינוי הצרכנים בתהליך זה (שינוי התנהגות).

הנחות יסוד נוספת הרווחת בגישה התכנונית במשק החשמל היא כי הביקוש לחשמל גדל בהתמדה, ולפיכך הקמת תחנות כוח מעבר לנדרש לאספקת הביקוש בפועל לחשמל אינה בגדר טעות תכנונית, שכן במוקדם או במאוחר יהיה בהן צורך כדי לתת מענה לביקוש הגדל לחשמל. ואולם פיתוחו של משק האנרגיה על פי גישה השואפת להפכו לבר־קיימה, על ידי שימוש נרחב באמצעים להתייעלות בשימוש בחשמל ולהפחתת הביקוש לו, בד בבד עם הגדלת חלקה היחסי של האנרגיה המופקת ממקורות מתחדשים, עשויים להותיר תחנות כוח חדשות אלו ללא שימוש, כ"הון שקוע" (Sunk Capital) ומבוזבז. כך, הגישה התכנונית הקיימת מספקת תמריץ שלילי להתייעלות בשימוש בחשמל במשק ולהרחבת השימוש במערכות להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים.²⁰

תכנון משק החשמל בישראל מתבצע על פי חוק על ידי ספק השירות החיוני (חברת החשמל לישראל), בהתאם להנחיות מדיניות משרד האנרגיה והמים, ועל בסיס קריטריונים שהמשרד מציב. כחלק מתהליך התכנון החברה עורכת תחזיות ארוכות טווח בנוגע להתפתחות הביקוש לחשמל. התחזיות מאפשרות לתכנן את התשתיות הנדרשות במשק האנרגיה בעשורים הבאים, בכלל זה הקמת תחנות כוח ותשתיות הולכה וחלוקה, תכנון תשתיות להובלת דלקים ולאחסונם, ורכישת דלקים. תחזיות אלו מתבססות על תרחישים כלכליים המשקללים פרמטרים שונים, ובהם המגמות הדמוגרפיות החזויות בישראל (כגון עלייה בתוחלת החיים והזדקנות האוכלוסייה) ותחזית באשר להתפתחות ענפי המשק השונים והשפעתם על הביקוש לאנרגיה. כך, למשל, לשיעור הצמיחה הכלכלית במשק או לשינוי בחלקם היחסי של מגזרים דוגמת התעשייה והשירותים עשויה להיות השפעה מהותית על צריכת האנרגיה במשק. לתחזית הכלכלית מצורפת גם תחזית אקלימית ארוכת טווח.

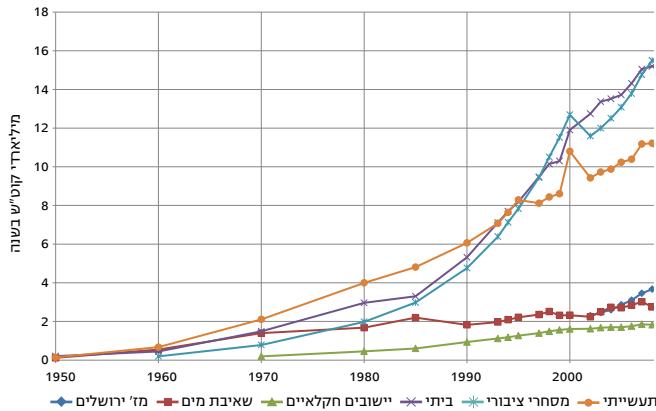
20 מרגע שהוקמה תחנת הכוח הקובנציונלית והושקע בה ההון הראשוני, הופך השימוש בה לזול מהקמתם של מתקנים להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים – דבר שאינו בהכרח נכון בטרם הוקמה התחנה.

צריכת החשמל בישראל



תרשים 2: צריכת החשמל בישראל 1930-2010, במיליארדי קוט"ש לשנה.
מקור: (חברת החשמל, 2010a)

הביקוש לחשמל ע"פ מגזרים: 1950-2010



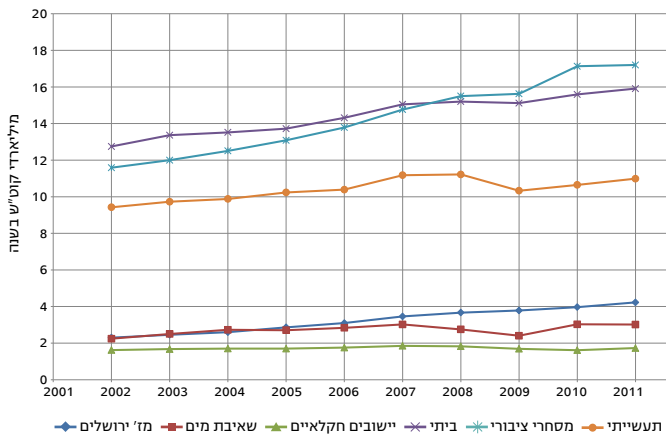
תרשים 3: התפתחות הביקוש לחשמל במשק בחלוקה לפי מגזרים משנת 1950. מקור: עד שנת 2000 - הלמ"ס, שנתונים שונים, לוח 15.4; משנת 2002 - (חברת החשמל, 2011a)

יש לציין כי מדיניות הממשלה לשינוי מבני במשק החשמל מעודדת את הקמתן של תחנות כוח חדשות בהספק ניכר, על ידי יצרני חשמל פרטיים. זאת במטרה להרחיב את כושר הייצור העודף ("הרזרבה") במשק החשמל לכדי 20% - מעבר לביקושי השיא - ובכך מחריפה את התמריץ השלילי להשקעה בהתייעלות ומקורות מתחדשים.

תחזית הביקוש המוצגת במחקר זה שואפת למלא יעד אחר, קרי צמצום פליטות גזי חממה במשק האנרגיה - ואילו אספקת מלוא הביקוש היא יעד משנה. לפיכך המחקר בוחן לא רק אמצעים טכניים להפחתת פליטות גזי חממה (דוגמת שימוש במכשירי חשמל יעילים יותר) כי אם גם אמצעים שונים להפחתת הביקוש ולניהולו, ובכלל זה יצירת שינוי בהתנהגות הצרכנים. נוסף לאמצעים אלו המתודולוגיה שאנו משתמשים בה, המנסה לצמצם את פליטות גזי החממה למינימום, מראה את הכדאיות הנוספת בהפחתת הביקוש, כתוצאה מבחינה אינטגרטיבית של ההפחתה ושל הגדלת השימוש במקורות מתחדשים.

פרק זה במחקר מציג הערכה של הפוטנציאל המקסימלי להפחתת הביקוש לחשמל בישראל עד לשנת 2040, ללא פגיעה בפעילות הכלכלית הסבירה במשק וללא שינויים מהותיים באיכות החיים. בחלקו הראשון סוקר הפרק את משתני הבסיס שלפיהם אפשר להעריך את מגמות הביקוש לאנרגיה בתרחיש "עסקים כרגיל". בחלקו השני מציג הפרק מכלול אמצעים להגדלת החיסכון והשימוש היעיל והמושכל באנרגיה במגזרים השונים, וכן את ההשפעה האפשרית של יישומם על צמצום הביקוש לאנרגיה.

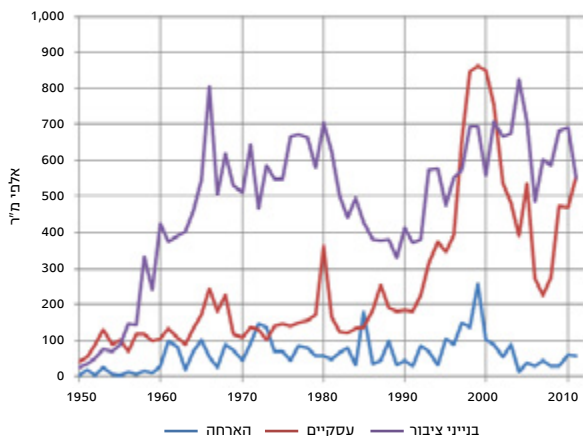
הביקוש לחשמל ע"פ מגזרים: 2002-2011



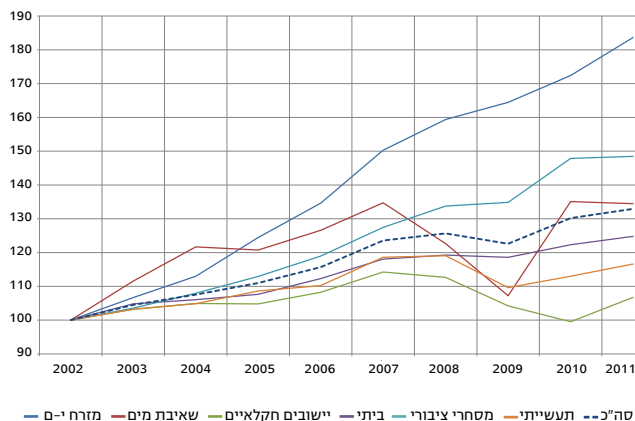
תרשים 4: התפתחות הביקוש לחשמל במשק בחלוקה למגזרים בשנים 2002-2011. מקור: (חברת החשמל, 2011a)

21 התרחיש מתייחס לשנים 2002-2011. יש לציין כי בשנת 2000 שונו סיווגי המגזרים, כך שמגזר "מכירה בצובר" הוצא מן המדגם והתווסף מגזר "מזרח ירושלים". כמו כן, ניכרת אי-התאמה בין נתוני הלמ"ס ונתוני חברת חשמל שלאחר שנת 2002: נתוני הלמ"ס לשנת 2000 גבוהים בכ-20% מאלה של חברת חשמל ומשתקפים בעלייה חדיפעמית, מתואמת ובלתי מוסברת בצריכה במגזרי התעשייה, המסחר/ציבור ומשקי הבית. נוסף לכך, נתוני שנת 2001 לא פורסמו מעולם.

סיומ בנייה לפי ייעוד אלפי מ"ר



הביקוש לחשמל ע"פ מגזרים: אינדקס ביחס לשנת 2002 (=100)



◀ תרשים 6: סיומ בנייה במגזרי הציבור, העסקים וההארה, בשנים 1950-2011. אפשר לראות כי סביב שנת 2000 היה גידול ניכר בענפי השירותים והמסחר. מקור: למ"ס, שנתונים סטטיסטים משנים שונות, לוח 22.6.

◀ תרשים 5: הצמיחה היחסית בבקוש לחשמל במגזרים השונים ביחס לשנת 2002 (הביקוש ב'2002=100). מקור: עיבוד על פי (חברת החשמל, 2011a).

לגידול בביקוש. נוסף לכך, ניתוח מרובה משתנים של מגמת הביקוש לאנרגיה, לאור מגמות גידול האוכלוסין והתמ"ג, מציג גידול מתון אף יותר מהמגמה הליניארית (לפירוט ראו נספח א). מחקר זה יתבסס לפיכך, בהנחה שמרנית, על מגמת הגידול הליניארי בביקוש לחשמל, וזאת כדי לא להניח שיעור צמיחה נמוך יותר על המידה.

תחזית הביקוש לחשמל בחלוקה מגזרית

תחזית הביקוש לחשמל עד לשנת 2040 המוצגת במחקר זה מתבססת על נתוני הצריכה של חברת החשמל והלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, המפורסמים בחלוקה מגזרית: משקי בית; ציבור/מסחר; תעשייה; חקלאות; מים; ומזרח ירושלים והרשות הפלסטינית.

התפתחות הביקוש לחשמל בישראל מאז שנת 1950 בחלוקה מגזרית מוצגת בתרשים 3; והתפתחות הביקוש לחשמל בעשור החולף, עד לשנת 2011, מוצגת בתרשים 4.²¹

הנתונים מלמדים על עלייה עקבית בביקוש לחשמל בכל המגזרים²², ובפרט על עלייה חדה במגזר הביתי ובמגזר הציבורי/מסחרי מאז שנות השבעים. מגמה זאת משקפת את גידול האוכלוסין ואת העלייה בצריכה הפרטית²³.

מבין שלושת מגזרי המשק העיקריים - משקי הבית, המגזר הציבורי/מסחרי והתעשייה - קצב הצמיחה הגבוה ביותר בביקוש לחשמל בעשור האחרון נרשם במגזר המסחרי/ציבורי, ואילו במגזר התעשייתי אפשר

תחזית הביקוש לחשמל

הביקוש לאנרגיה במשק מושפע, כאמור, מגורמים רבים. תחזית הביקוש לאנרגיה במחקר זה עושה שימוש במשתנים המשקפים את ההתאמה הגבוהה ביותר למגמות צריכת החשמל בעשורים האחרונים. עקב משאבים מוגבלים ומחסור בנתונים מלאים, שאינם נגישים לציבור, נבנתה התחזית בעזרת חיוץ (אקסטרפולציה) של נתוני עבר מצרפיים, ולא "מלמטה למעלה", באופן שהיה נותן את התוצאות המדויקות ביותר.

המאפיין הבולט ביותר לביקוש לחשמל בישראל מאז קום המדינה ועד היום הוא גידול מתמיד ומעריכי (אקספוננציאלי) בביקוש, הנובע ממשתנים דוגמת גידול אוכלוסין גבוה (עקב הגירה וריבוי טבעי), התפתחות כלכלית תעשייתית ושיפור באיכות החיים (תרשים 2).

כדי לגבש תחזית בסיס לגידול הצפוי בצריכת החשמל נבדק המתאם של מגמת הגידול בעבר ביחס לכמה משתנים: אוכלוסייה; תוצר מקומי גולמי (תמ"ג); תמ"ג לנפש; תמ"ג במונחי כוח קנייה שווה (PPP); תמ"ג לנפש (PPP); ומכפלת התמ"ג באוכלוסייה. מבין נגזרים אלו נמצא כי התוצר המקומי הגולמי (תמ"ג) ושיעור גידול האוכלוסייה הם המשתנים בעלי המתאם הגבוה ביותר למגמות צריכת החשמל. לפירוט החישוב לבחירת המשתנים והמתאם שהציגו למגמות הביקוש לחשמל, אנא ראו נספח א. ניתוח של נתוני הצריכה במשק בשני העשורים האחרונים מלמד על התייצבות הגידול בביקוש לחשמל בקו מגמה ליניארי - כלומר בקצב גידול קבוע, ולא מעריכי. מגמה זו נמוכה בהרבה מהתחזיות של חברת החשמל

22 למעט יישובים חקלאיים, שבהם נרשמה ירידה בצריכת החשמל בחלקו השני של העשור הקודם.

23 הירידה בצריכת החשמל בשנים 2008-2009 עשויה לשקף את המשבר הכלכלי שפרץ בשנת 2008; העלייה בביקוש לחשמל ב'2010 עשויה לשקף חזרה לצמיחה כלכלית שהביאה להמשך הגידול בביקוש לחשמל.

מאפייני השימוש בחשמל בחלוקה מגזרית

כפי שמפורט בנספח א, בדומה לתחזית הביקוש הכוללת, גם החלוקה למגזרים נמצאת במתאם גבוה לתנ"ג ולאוכלוסייה, אך נמוכה במעט מקו המגמה הליניארי. בהנחה שמרנית, בעבודה זו נעשה שימוש בתחזית הביקוש לחשמל בחלוקה למגזרים, המתבססת על המגמה הליניארית (תרשים 7). כדי לפשט את ניתוח צריכת החשמל במגזרים השונים, וליצור מסגרת מתואמת להשוואה בין המגזרים, נסווג את שימושי החשמל לארבעה שימושים עיקריים: אֶקְלוּם (חימום וקירור); תאורה; חימום מים; יתרת השימושים. לחלוקה זו יש חשיבות רבה במחקר זה שכן היא מאפשרת את ניתוח הפוטנציאל המרבי להתייעלות בשימוש האנרגיה על פי המאפיינים העיקריים של השימוש בחשמל, תוך התעלמות מהפרטים המקשים על ההערכה. לדוגמה, חלק נכבד מצריכת האנרגיה במכונת הכביסה (או במדיח הכלים) משמש לחימום המים בתהליך הפעולה של המכשיר. אספקת מים חמים ממקור מתחדש (דוגמת דוד שמש) מאפשרת הפחתה ניכרת בצריכת החשמל של המכשיר, עד כדי 90% מצריכת האנרגיה.²⁴

הערכת צריכת החשמל העתידית במגזרים השונים בתרחיש "עסקים כרגיל"

להלן מפורטת הערכה של צריכת החשמל העתידית, במגזרים השונים, מפולחת על פי השימושים העיקריים. כדי לחשב את החלוקה בין השימושים השונים בשנת 2040 הערכנו את השינויים שיעשו, בכל אחד מהשימושים, בתרחיש "עסקים כרגיל". בהמשך נשתמש בתחזית זו כדי להעריך את השיפור והייעול שאפשר יהיה ליישם בכל אחד מהשימושים בתרחיש התייעלות מקסימלית.

משקי בית

בטבלה 1 להלן מפורטת החלוקה של שימושי החשמל השונים במגזר הביתי על פי ארבעת השימושים העיקריים שהוגדרו לעיל.

שימוש מאוחד	שימושים
אֶקְלוּם	מיזוג, חימום
תאורה	תאורה
חימום מים	מכונת כביסה, מדיח כלים, דוד חשמל
אחר	מקרר, תנור, טלוויזיה, מייבשי כביסה, מצב המתנה, צרכנים נוספים

טבלה 1: השימוש בחשמל במגזר משקי הבית, בחלוקה לקטגוריות, לצורך חישוב השוואתי

להצביע על עלייה מתונה יותר (תרשים 5). מגמה זו מתיישבת עם מגמות מאקרו כלכליות בישראל, ובהן המעבר מתעשייה כבדה ומסורתית לכלכלת שירותים ומידע, והגידול בשטחי המסחר והמשרדים המבטא גידול יחסי בענפי השירותים והמסחר (ראו תרשים 6 להלן).

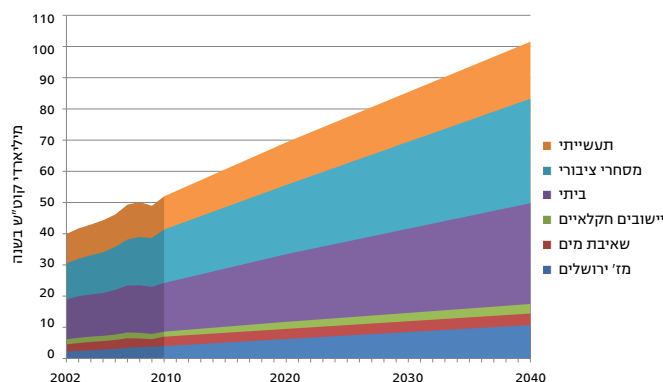
שאיבה והתפלת מים

במגזר המים אי אפשר להסתמך על מגמות העבר עקב השינויים הגדולים בצריכת המים בשנים האחרונות, בד בבד עם שימוש הולך וגובר במתקנים להתפלת מי ים. אנו מעריכים כי עד לשנת 2040 תהיה הגדלה של 17% בצריכת החשמל הכוללת במגזר זה, מכ־3TWh בשנה כיום לכדי 3.5TWh בשנת 2040, וזאת על פי ההנחות הבאות: בשנת 2011 מגזר "שאיבת מים" צרך כ־3TWh (חברת החשמל, 2011a), מהם כ־0.925TWh להתפלה, והשאר לשאיבה ולהלכה.

ההנחות ששימשו לחישוב הן אלה: הגידול בצריכת האנרגיה ינבע, רובו ככולו, מהגידול בהיקף ההתפלה. כל שאר השינויים יתקזזו (כולל התייעלות) מתוספת מים לרשות הפלסטינית ולירדן; הגידול בהתפלה אמור לשמש את הגידול בצריכה הביתית בניכוי החלק מגידול היצע הקולחים שימיר שאיבת שפירים; על כל גידול של 1 מ"ק בצריכה הביתית יעלה היצע הקולחים ב־0.6 מ"ק. 50% מהקולחים ימירו שפירים. המחצית השנייה תשמש לגידול נטו בחקלאות המושקית; עד 2040 כל מתקני ההתפלה הקיימים יוחלפו, ותהיה התייעלות בצריכת החשמל בהתפלה ב־20%.

על פי הנחות אלו ידרש גידול של כ־440 מלמ"ק בהתפלת המים עד לשנת 2040, שמשמעותו תוספת של 1.16TWh בשנה לכדי צריכה כוללת של מגזר המים 4.15TWh בשנה. בתרחיש חיסכון התוספת תגיע לכדי 0.96TWh בשנה בלבד (3.95TWh בסה"כ).

הביקוש לחשמל ע"פ מגזרים תחזית על פי קווי מגמה ליניאריים

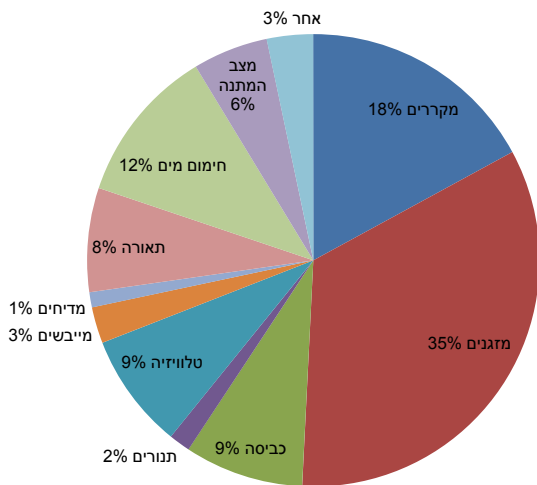


תרשים 7: תחזית הביקוש לחשמל על פי מגזרים. מקור: עד 2010, (חברת החשמל, 2010a). בהמשך - תחזית על פי קווי מגמה ליניאריים.

24 על פי משרד האנרגיה האמריקני, עד 90% מצריכת החשמל של מכונת כביסה מיועדת לחימום מים. שימוש במים המחוממים על ידי השמש (באמצעות מכונה המזונת בשני ברים - חם וקר), יכול לחסוך כמות זו של אנרגיה. ראו (U.S. Department of Energy, 2013).

25 הצריכה השנתית הממוצעת למשק בית מסכמת השימושים בטבלה עומדת על 7,363 קוט"ש בשנה. אלה הם כ־97% מצריכת החשמל הממוצעת למשק בית המשתקפת בנתוני המאקרו של חברת החשמל (קרי סך צריכת החשמל במגזר משקי הבית בחלוקה למספרם), העומדת על 7,615 קוט"ש בשנה.

התפלגות השימושים בחשמל מגזר משקי בית



◀ תרשים 8: התפלגות השימוש בחשמל במשק בית ממוצע (מקור: עיבוד על פי דוח ועדת שני משרד האוצר, 2011)

המינימלית למערכות מיזוג; הרחבת החובה על התקנת דוד שמש במבני מגורים רב־קומות, במבני ציבור ובתעשייה, ועוד.

משקלם היחסי של צרכני האנרגיה במשק הבית אינו קבוע. התייעלות של חלק מהצרכנים, וכן תוספת של צרכנים חדשים, עשויות לשנות בעשורים הקרובים את פרופיל הצריכה הביתי הממוצע על פי ההנחות הבאות:

- אקלום: שיפור של כ־25% בנצילות מזגנים הודות לשיפורים טכנולוגיים ולהחלפת מזגנים ישנים בחדשים (ראו נספח ב'); עלייה במספר המזגנים המותקנים במשקי הבית משיעור של 80% ממשקי הבית כיום לכדי 90% ממשקי הבית;²⁷ עלייה של 10% בהיקף השימוש במזגנים בשל שינויי האקלים וההתחממות הגלובלית.
- תאורה: שיפור של 50% בנצילות התאורה הודות להרחבת השימוש בנורות פלואורסצנטיות (בעיקר מסוג CFL), ומעבר לנורות מסוג LED. ראו נספח ג' לפירוט התחשיב.
- מים חמים: גידול של 3% בשימוש באנרגיה עקב עלייה של 15% בתפוצת מדיחי הכלים.²⁸
- שימושים אחרים: גידול של 20% בצריכת האנרגיה עקב שימוש גדל באיזרי חשמל ביתיים ("גאדג'טים"), בטלוויזיות גדולות וכיו"ב.

בישראל אין מידע סטטיסטי על אודות השימוש בחשמל במשקי הבית, אך בשנים האחרונות הוצגו שלושה מחקרים הבוחנים את שימושי החשמל במשקי הבית: דוח חברת מקינזי (חברת מקינזי ושות', 2009), התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית (משרד האנרגיה והמים, 2010a); דוח ועדת שני (משרד האוצר, 2011). מאחר שבדוח חברת מקינזי לא צוינו המקורות שהתחשיב התבסס עליהם (ייתכן שהנתונים נלקחו ממדינות אחרות שהחברה פועלת בהן), מתבסס מחקר זה על נתוני ועדת שני (המבוססים על התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית). תחשיב התפלגות השימוש בחשמל במשקי הבית בתכנית הלאומית נבנה "מלמטה למעלה", על בסיס הערכה של מידת השימוש הממוצע במכשירי החשמל השונים ("צרכני האנרגיה") במשקי הבית בישראל. זאת, בתוספת תחשיב עצמאי שנערך כחלק ממחקר זה בעניין השימוש באנרגיה לחימום מים במגזר הביתי (טבלה 2).²⁵

מזר	קוט"ש בשנה	אחוז
מקרים	1,299	18%
מזגנים	2,569	35%
כביסה	647	9%
תנורים	116	2%
טלוויזיה	629	9%
מייבשים	197	3%
מדיחים	83	1%
תאורה	566	8%
חימום מים	848	12%
מצב המתנה	409	6%
אחר	252	3%
סה"כ	7,363	100%

◀ טבלה 2: הערכת מרכיבי השימוש בחשמל במשקי הבית. מקור: עיבוד על פי דוח ועדת שני (משרד האוצר, 2011)

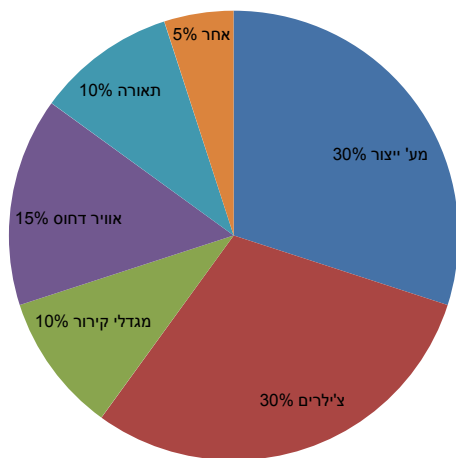
צרכני החשמל העיקריים במגזר הביתי הם המכשירים שיעודם קירור: מזגנים ומקרים (תרשים 8).²⁶

החלוקה לשימושי אנרגיה מאפשרת יצירה של מודל בין־מגזרי לניתוח השימוש באנרגיה ולייעול צריכתה, שכן אקלום, תאורה וחימום מים הם השימושים העיקריים באנרגיה גם במגזר המסחרי/ציבורי ובמגזר התעשייה. אפשר אפוא להשתמש באמצעי מדיניות אחידים ליעול ניכר של השימוש באנרגיה בכמה מגזרים. לדוגמה: העלאת תקנת היעילות

26 כמות החשמל הנדרשת על ידי המקרר (ההספק) נמוכה יחסית, אולם הפעלתו הרציפה לאורך כל שעות היממה מציבה אותו כצרכן המשמעותי ביותר במשקי הבית לאחר המזגנים; אמנם באלו האחרונים נעשה שימוש בפרקי זמן קצרים יחסית - אך ההספק גבוה ביותר.

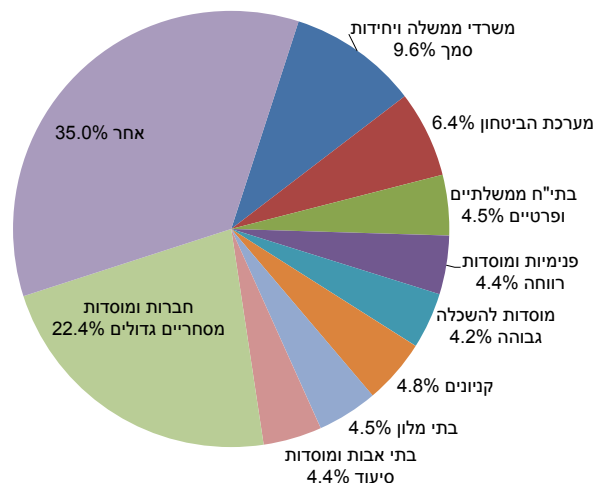
27 רגרסיה ליניארית על נתוני הבעלות על מוצרים בני קיימה (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2011, לוח 20) מעלה כי ל־100% מהאוכלוסייה יהיו מזגנים בשנת 2040. מובן שזו הערכת יתר, ולכן נשתמש בערך השמרני של 90%.

התפלגות השימושים בחשמל מגזר התעשייה



◀ תרשים 10: פילוג השימוש בחשמל במגזר התעשייה, מקור: (משרד האנרגיה והמים, 2010a)

חלוקה פנימית במגזר מסחרי/ציבורי על פי התוכנית הלאומית להתייעלות, נתוני 2009



◀ תרשים 9: התפלגות השימוש בחשמל במגזר המסחרי/ציבורי בחלוקה למגזרים (מקור: משרד האנרגיה והמים, 2010a)

הנתונים שנעשה בהם שימוש בתכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית (משרד האנרגיה והמים, 2010a). המאפיין הבולט במגזר זה הוא השימוש הניכר באנרגיה במתקני קירור (צ'ילרים ומגדלי קירור) העומד על כ-40% מהצריכה הכוללת, והאנרגיה הנצרכת בפעילות הייצור התעשייתית גופא, ששיעורה מגיע לכדי 30% (תרשים 10). לשם השוואה בין מגזרית אפשר לאגד את שימושי האנרגיה השונים בתעשייה (טבלה 3).

שימוש מאוחד	שימושים
אקלום	צ'ילרים ומגדלי קירור
תאורה	תאורה
חימום מים	מוערך בכ-60% מהאנרגיה בתהליך הייצור התעשייתי
אחר	מדחסי אוויר, צרכני אנרגיה נוספים בתהליכי הייצור

◀ טבלה 3: פירוט השימושים בחשמל במגזר התעשייה, וחלוקתם לקטגוריות לצורכי חישוב השוואתי

מגזר מסחרי וציבורי

ההערכה של התפלגות השימושים בחשמל במגזר המסחרי/ציבורי מבוססת על הנתונים ששימשו את התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית (משרד האנרגיה והמים 2010b). נתונים אלו מלמדים כי כ-60% מהאנרגיה הנצרכת במגזר זה משמשים לאקלום, כ-30% לתאורה, ו-10% לשימושים אחרים (תרשים 9). יצוין כי במגזר זה חלקה היחסי של האנרגיה המשמשת לחימום מים קטן בהשוואה למגזר משקי הבית, והיא מסווגת תחת "אחר". משקלם היחסי של צרכני האנרגיה השונים במגזר המסחרי/ציבורי צפוי להשתנות עד לשנת 2040 על פי ההנחות שלהלן:

- אקלום: שיפור של 15% בנצילות המזגנים הודות לשיפורים טכנולוגיים ולהחלפת מזגנים ישנים בחדשים²⁹, עלייה של 10% בשימוש במזגנים עקב שינויי האקלים וההתחממות הגלובלית.
- תאורה: שיפור של 20% בצריכת החשמל לתאורה עקב מעבר חלקי נורות מסוג LED³⁰.
- מים חמים: שימוש זה אינו משמעותי במגזר המסחרי/ציבורי.

מגזר התעשייה

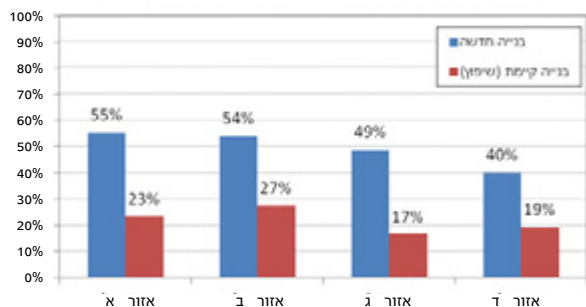
הערכת התפלגות השימושים בחשמל במגזר התעשייה מבוססת על

28 רגריסה ליניארית תעלה את הבעלות על מדיחי כלים מכ-35% ממשקי הבית כיום עד לכ-50% בשנת 2040.
29 שיעור זה נמוך יותר מהצפוי במגזר הביתי משום שהערכתנו יעילותם הממוצעת של הצ'ילרים במגזר זה גבוהה מזו של המזגנים במגזר משקי הבית, עקב מודעות גבוהה יותר, ולפיכך השיפור במתווה "עסקים כרגיל" יהיה צנוע יותר.
30 שיעור זה נמוך יותר מהשיפור שחושב עבור מגזר משקי הבית משום שהתאורה הנפוצה במגזר זה היא של נורות פלואורסצנטיות, היעילות יותר מנורות הליבון הנפוצות במשקי הבית.

במבנים נאמדת בכי 70% מתפוקת החשמל, שהיא כ־40% מסך האנרגיה הראשונית הנצרכת. צמצום וייעול השימוש באנרגיה במבנים הוא אם כן מנוף מרכזי להפחתת פליטות גזי חממה.

המרכיבים השונים בתהליכי תכנון ובנייה שמטרתם ליצור סביבה בנויה בריאה יותר לתושבים, ונד בבד לצמצם את הפגיעה במערכות האקולוגיות, מכונים "בנייה ירוקה", וכוללים אמצעים כגון: בנייה רוויה בתחומי הערים; ניהול סביבתי של אתר הבנייה; שימוש בחומרים ממוחזרים או בחומרים שהשפעתם השלילית על הסביבה פחותה; והתקנת אמצעים לצמצום צריכת המשאבים בשימוש במבנה, ובפרט אנרגיה ומים (להרחבה אנא ראו נספח ד'). עם זאת, המידע המעשי על ההפחתה הפוטנציאלית בצריכת האנרגיה בישראל באמצעות בנייה ירוקה הוא מצומצם ביותר. במסגרת המחקר נערכה סימולציה תרמית לבחינת האמצעים השונים לצמצום צריכת האנרגיה במבנים קיימים וחדשים, ותרומתם הכוללת להפחתת צריכת האנרגיה ופליטות גזי החממה במישור הלאומי. המחקר נערך בשיתוף המחלקה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר, במכון לחקר המדבר ע"ש בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון. הסימולציה כללה דירות אופייניות במבני מגורים בני קומה אחת, שלוש קומות וחמש קומות, בארבעת אזורים האקלים העיקריים בישראל כפי שהוגדרו בת"י 1045: מישור החוף, אזור גבעות השפלה הפנימית, אזור ההר, ואזור העמקים הפנימיים (פרלמטר, אראל, מאיר, עצמון, & רופא, 2010). לצורך ביצוע הסימולציה נעשה שימוש בתכנת ENERGYui (זיאורו, שבי, & קפלוטו, 2010), המאפשרת חישוב של הדירוג האנרגטי של מבנים לפי צריכת

סה"כ היסכון באנרגיה במבנים משופרים מבחינה תרמית



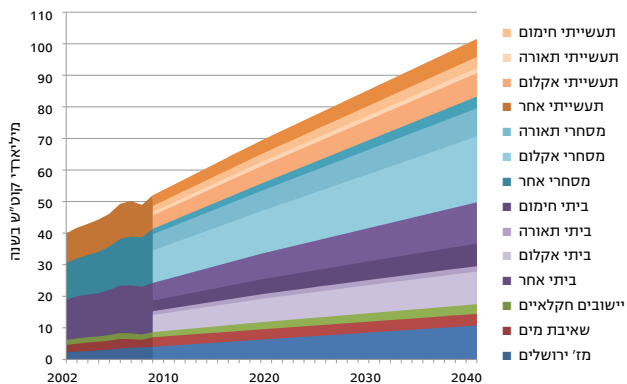
◀ תרשים 12: תוצאות הסימולציות שמראות את סה"כ הפוטנציאל לחיסכון האפשרי באנרגיה. התוצאות מבוססות על כל השיפורים האפשריים שיושמו בבנייה חדשה והשוואתם לקבוצה מצומצמת של שיפורים שניתנים ליישום בשיפוץ של בנייה קיימת. חלוקת אזורים האקלים: אזור א - מישור החוף; אזור ב - גבעות השפלה הפנימית; אזור ג - ההר; אזור ד - העמקים הפנימיים

האנרגיה, תחת התקן הישראלי לדירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה (ת"י 5282). במחקר נבחנו ההשפעה על צריכת האנרגיה במבנה של תשעה פרמטרים, שחולקו לארבעה תחומים עיקריים ובהם: הפניית הבניין, בידוד

משקלם היחסי של צרכני האנרגיה השונים במגזר התעשייה צפוי להשתנות עד לשנת 2040 על פי ההנחות שלהלן:

- אקלום: שיפור של 15% בנצילות הצילרים (בדומה למגזר המסחרי/ציבורי); עלייה של 10% בשימוש במזגנים עקב שינויי האקלים וההתחממות הגלובלית.
 - תאורה: שיפור של 20% בנצילות עקב מעבר חלקי לנורות LED (גם כן בדומה למגזר המסחרי/ציבורי).
 - אחר: שיפור של 10% הודות לגידול ביעילות מנועים, מדחסים ומשאבות (על פי התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית).
- תרשים 11 מציג את תחזית הביקוש הכולל לחשמל במגזרי המשק השונים ובחלוקה צרכנית תוך-מגזרית עד לשנת 2040, בתרחיש "עסקים כרגיל". תרחיש זה כולל את השיפורים החזויים שהנחנו לעיל, משום שהם יתרחשו גם ללא מדיניות מכוונת להגדלת התייעלות במשק.

הביקוש לחשמל, על פי מגזרים מפורט לפי שימושים



◀ תרשים 11: תחזית הביקוש לחשמל בחלוקה למגזרים ולשימושים השונים בחשמל עד לשנת 2040. מקור: עד שנת 2010 - (חברת החשמל, 2010a). בהמשך - תחזית על פי הערכות התפתחות השימוש במגזרים השונים.

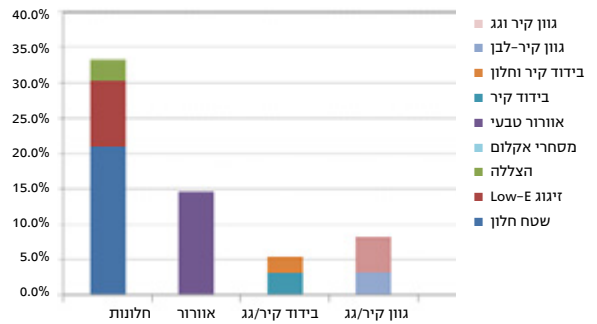
האמצעים לצמצום פליטת גזי החממה

בהמשך מפורטים האמצעים לייעול צריכת האנרגיה לפי ארבעת השימושים העיקריים שהוגדרו לעיל, אמצעים שהם מעבר למגמות השיפור הצפויות במסגרת מתווה ה"עסקים כרגיל".

התייעלות בצריכת האנרגיה במבנים

הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה מעריכה כי כ־40% מתצרוכת האנרגיה הראשונית בעולם משמשת במבנים, ותורמת לכ־24% מסך פליטות גזי החממה (International Energy Agency, 2006). בישראל, צריכת החשמל

אזור אקלים א: חסכון באנרגיה לפי פרמטר תכנוני



תרשים 13: חיסכון יחסי באנרגיה המושג על ידי שיפור פרמטרים תכנוניים שונים ביחס למבנה ייחסי בסיסי באזור א (לפירוט מלא, וכן לניתוח שאר אזורים האקלים, ראו נספח ד)

קירות ותקרה, ציפוי חלונות, הצללות, אורור, צבע המבנה, ועוד. זאת באמצעות השוואת צריכת האנרגיה לשימושי אקלום ותאורה בין בנייה סטנדרטית, העונה לתקני הבסיס לבידוד ולזיגוג, לבין בניין המותאם לדרישות המומלצות בתקן 5282. הסימולציה נערכה עבור שילוב של כלל האלמנטים, וכן עבור יישום של כל אחד מהאמצעים בנפרד, באמצעות מבחני רגישות (לפירוט מהלך המחקר ותוצאותיו אנא ראו נספח ד').

ממצאי המחקר הראו כי שימוש באמצעי בנייה חוסכת אנרגיה יכול להפחית את צריכת החשמל בבתי מגורים בין 40% ל-55% (כתלות באזור האקלים). נמצא גם כי אמצעים הניתנים ליישום בשיפוץ מבנה קיים ("שיפוץ אנרגטי") יכולים להפחית בין 17% ל-27% מצריכת החשמל במבנה (תרשים 12). כמו כן בוצע פילוח של החיסכון המושג על פי האמצעים השונים ונבחנו התרומה של כל אמצעי לחיסכון הכולל (תרשים 13). הממצאים מובאים בתרשימים 12 ו-13.

חימום מים

אחד האמצעים היעילים ביותר לחיסכון באנרגיה הוא השימוש בקולטי שמש לחימום מים לצריכה ביתית ותעשייתית לפי תקנות התכנון והבנייה, החובה להתקין דודי שמש חלה על בניינים שגובהם עד תשע קומות. הוראה זו קיימת מאז שנות השבעים. בשנת 2012 נוסף לתקנות תיקון המחייב להתקין במבנים גבוהים מתשע קומות מערכות סולאריות לחימום מים בעבור שבע הקומות העליונות.³¹ עם זאת, טכנולוגיות שונות (דוגמת "שפופרות ואקום") מאפשרות לספק מים ל-25 הקומות העליונות ואף לשלושים הקומות העליונות במבנים רבי קומות (גרוסמן & גולדרט, 2012a: 32). יש לציין כי בישראל כבר יש בניינים בני 17 קומות שבהם יש חימום מים סולארי (גרוסמן & גולדרט, 2012a: 24).

שימוש במים חמים ממערכת סולארית לכביסה ולהדחת כלים יכול

להביא לחיסכון של עד 90% מצריכת החשמל³² של מכונות אלה, אולם התקנות בישראל אינן מחייבות לחבר מכשירי חשמל ביתיים הצורכים חום, דוגמת מכונות כביסה ומדיחי כלים, לצנרת מים חמים המגיעים מחימום סולארי.

לשימוש במים חמים שמקורם בחימום סולארי עשויה להיות תרומה ניכרת לצמצום צריכת האנרגיה בתהליכי הייצור בתעשייה. קולטי השמש השטוחים המצויים בשוק יכולים לספק מים בטמפרטורה של עד 70°C, ואילו קולטים מסוג "שפופרות ואקום" מאפשרים אספקת מים בטמפרטורה של 120°C. בשוק יש מערכות מורכבות יותר, דוגמת שקתות עוקבות שמש, שיכולות לספק מים חמים בטמפרטורות גבוהות אף יותר. אנו מניחים כי שימוש באמצעים סולאריים יכול לספק כ-30% מצריכת המים החמים בתעשייה בישראל (בהתאם להנחות בדוח ועדת שני, משרד האוצר, 2011).

תרומה נוספת לחיסכון באנרגיה היא בתחום הקוגנרציה. במערכת קוגנרציה ("ייצור משותף" של חום וחשמל) מחליף המפעל את מערכת חימום המים או יצירת הקיטור במערכת לייצור חשמל המפיקה חום כתוצר לוואי. כך, במקום לשרוף דלקים כדי לקבל חום בלבד, המערכת מפעילה גנרטור לייצור חשמל, והחום הנפלט בתהליך משמש לחימום מים או ליצירת קיטור. בעבר הוערך כי מערכות כאלו יכולות להביא לחיסכון של 75% בצריכת האנרגיה לחימום מים ולקיטור בתעשייה.³³ בתרחיש שיושם בו דגש על הפחתת פליטות גזי החממה לאפס יכולות מערכות אלו לשמש כגיבוי למקורות המתחדשים: במקום להשקיע בתחנות כוח פוסיליות יינתנו תמריצים להקמת מערכות קוגנרציה בתעשייה, בתוספת חימום חשמלי. בשעות עודף הייצור ממקורות מתחדשים ישתמשו לחימום בחשמל, ובשעות המחסור יעברו לדלקים פוסיליים וייצרו חשמל וחום. כדי לשמור על תחשיב שמרני הנחוו בחישוב סופי חיסכון כולל של 75% בצריכת האנרגיה לחימום מים בתעשייה - הן כתוצאה מיישום חימום סולארי, הן מהתקנת מערכות קוגנרציה.

אקלום

שיפור יעילותם של מזגנים במגזר הביתי ושל צ'ילרים במגזר התעשייתי ובמגזר הציבורי/מסחרי - כאמור, חלק ניכר מצריכת האנרגיה במבנים משמש לאקלום. אופטימיזציה של נצילות מערכות המיזוג שבהן נעשה שימוש בישראל באמצעות עדכון שוטף של תקני היעילות המינימלית יכולה אם כן להביא לחיסכון ניכר בצריכת האנרגיה. אמנם עלותן של מערכות שיעילותן האנרגטית משופרת גבוהה מזו של מערכות שיעילותן האנרגטית נמוכה, אולם בטווח הבינוני והארוך רכישתן תביא תועלת כלכלית הן לצרכנים הן למדינה.

על פי התחשיב המובא בנספח ב', תמרוץ להחלפת מזגנים ישנים בחדשים ותמרוץ לשימוש במערכות מיזוג חדשניות כגון מיזוג גאותרמי ומערכות VRF יוכלו להעלות את יעילות המזגנים במשק בממוצע בכ-33% מעבר למתווה ה"עסקים כרגיל". היות שתחשיב זה מבוסס על טכנולוגיות שהן זמינות אך אינן נפוצות כיום, נניח כי סך האמצעים הללו יביאו לחיסכון

31 תקנות התכנון והבנייה (בקשה להיתר, תנאיו ואגרות) (תיקון), התשע"ג-2012. ראו הערת שוליים 24.

33 בדוח מקינזי (חברת מקינזי ושות', 2009) הוערך כי יישום מערכות קוגנרציה במפעלים הצורכים מעל 10 טון קיטור בשעה יביא לייצור של 2.5TWh בשנת 2030, ערך שיוחסר מהביקוש לחשמל בתחנות הכוח. אנו נניח ערך דומה בשנת 2040, השווה לחיסכון של כ-75% בצריכת האנרגיה לחימום מים.

קליטת חום ומיזוג ספיגה	קולטי PV ומזגן רגיל
תיאור	שימוש בקולטי שמש לחימום מים, ושימוש במים החמים במערכת "מיזוג ספיגה" ההפוכת חום לקירור.
נצילות הקולטים	שימוש בקולטים פוטו-וולטאים (PV) ההופכים את קרינת השמש ישירות לחשמל, ושימוש במזגן חשמלי רגיל.
נצילות המזגן (COP)	קולטי חום מסוגלים להמיר 60%-80% מקרינת השמש לחשמל.
עלות התקנה	מזגן ספיגה מסוגל לייצר בין 0.8 ל-1.2 יחידות קירור לכל יחידת אנרגיית חום שהוא מקבל מהקולטים.
כשארין צורך במיזוג	מערך קולטי ה-PV עולה ככפליים ממזגן רגיל. בשנים האחרונות מחירי קולטי ה-PV בירידה מתמדת, הרומזת להמשך ירידה בעתיד. סך עלות המערכת היא פי שניים וחצי מעלות מערכת מיזוג רגילה.
כשארין שמש	אפשר להזין את החשמל העודף לרשת החשמל לשימוש במכשירים שונים.
שעות ייצור מול שימוש	אין ייצור חשמל באין שמש, אך אפשר להשתמש בחשמל מהרשת להמשך המיזוג.
בימים חמים	ה"אינרציה" של מערכת החום מאפשרת להמשיך ולקרר גם לאחר שיא קרינת השמש ובכך להיענות לצורך במיזוג.
עננות	נצילות הקולטים עולה עם עליית הטמפרטורה החיצונית, ולכן מזגנים אלו יעילים יותר בימים חמים.
בחורף	קולטי חום דורשים קרינת שמש ישירה, ולכן תפוקת החום יורדת בצורה ניכרת בימים מעוננים.
	אפשר להשתמש בקולטי המים החמים כדי לחמם את החלל גם בחורף ולחימום מי רחצה.

טבלה 4: השוואה בין התקנת מזגן ושימוש בחשמל המופק בקולט PV לבין קליטת חום ומיזוג ספיגה

שימוש בקולטי חום (בדומה לקולטים שבדוד השמש) לצורך שימוש במזגן מיוחד הממיר את החום לקור (טכנולוגיית "ספיגה" - טבלה 4). מערכת ספיגה היא יקרה ומורכבת ממערכת PV, אך נצילותה של זו האחרונה נמוכה מאוד (להשוואה בין המערכות השונות ראו טבלה 4). התקנת מערכות ספיגה כדאית מבחינה כלכלית באתרים שבהם יש שטח גג גדול (לצורך הקמת הקולטים), נדרש הספק קירור גדול ויש תחזוקה מקצועית, כגון במגזר הציבורי/מסחרי ובמבני תעשייה, או כמערכות קירור מרכזיות בבניין מגורים המספקות קור (או חום) לכלל הדיירים.

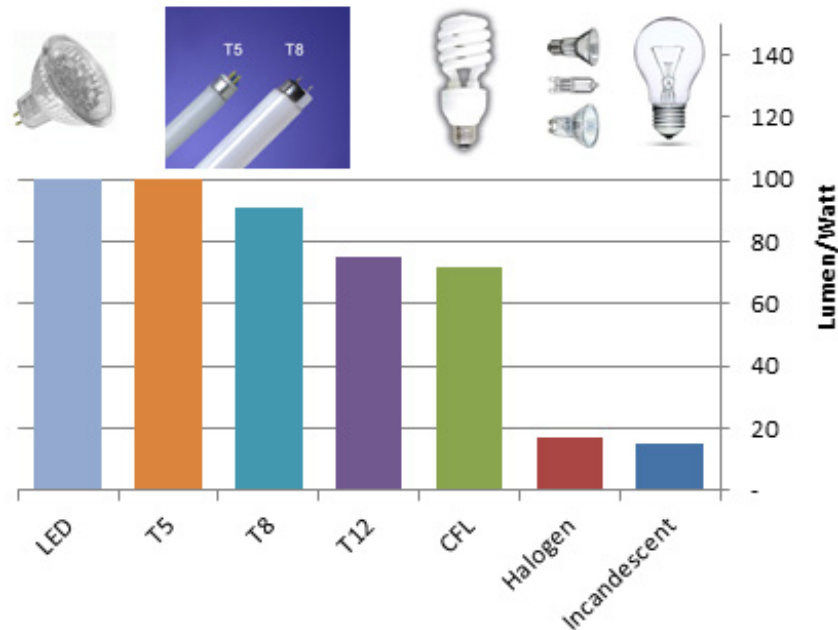
הכדאיות הכלכלית הגבוהה ביותר לשימוש במיזוג סולארי היא במבני תעשייה ובמרכזי המסחר בישראל. אלה מתאפיינים במבנים נמוכים בעלי

של 25% בלבד מעבר ל"עסקים כרגיל". במגזרי המסחר והתעשייה נניח כי ההתייעלות מעבר למתווה ה"עסקים כרגיל" תהיה נמוכה יותר, היות שכבר כיום הצ'לרים במגזרים אלו יעילים יותר בממוצע מהמערכות הביתיות עקב מודעות גבוהה יותר ותחזוקה מקצועית יותר. בהתאם לכך, השיפור במגזרים אלו יוערך ב-20% בלבד.

מיזוג סולארי - השימוש המשמעותי ביותר באמצעי האקלום, ובראשן מערכות הקירור ומיזוג האוויר, הוא בשעות השיא של קרינת השמש.³⁴ עובדה זו מייצרת תמריץ ברור לשימוש באנרגיית השמש עצמה לצורך מיזוג, באמצעות (א) מערכת פוטו-וולטאית (PV) - מערכת הממירה את אור השמש לאנרגיה חשמלית, וזו משמשת להפעלת המזגן; (ב) לחלופין,

34 בשל "אינרציה תרמית", קרי פרק הזמן שלוקח לחום לחדור אל המבנים, קיים שיהיו של כשעה עד שעתיים בין שיא קרינת השמש לבין שיא הביקוש לאנרגיה למיזוג אוויר.
35 למידע נוסף בנושא השוואת עלויות בין מערכות קירור מבוססות חום לבין PV, ראו את המצגות של הפרופ' אורסולה איקר למשל: Eicker, 2012.

יעילות אורית של טכנולוגיות תאורה שונות



◀ תרשים 14: היעילות האורית של טכנולוגיות תאורה שונות. ניתן לראות כי נורות הלהט וההלוגן הינן בעלות הנצילות הנמוכה ביותר, בעוד נורות ה-LED והפלוואורסצנט מסוג T5 הינן היעילות ביותר. מקור: דוחות משרד האנרגיה האמריקני³⁶

במים חמים, אפשר להביא לחיסכון ניכר באנרגיה באמצעות שימוש בחום שיורי הנפלט ממערכת המיזוג הסולארי.

טכנולוגיית מיזוג סולארי עדיין אינה נפוצה כיום, ולכן קשה להעריך את תפוצתה בשנת 2040. בהתאם לאמור לעיל הערכתנו היא כי מערכות שכאלו לא יותקנו במבני מגורים, אולם עקב היתרונות שיש להתקנתן במבנים גדולים (בעיקר כאלו הדורשים חימום מים נוסף למיזוג), הן תחלפנה כ-10% ממערכות המיזוג במבני מסחר, שירותים ותעשייה. זוהי הנחה שמרנית, ראו למשל פרסום של איגוד האנרגיה התרמו-סולארית האירופי, שם מניחים כי בשנת 2020 יותקנו באירופה מערכות מיזוג סולאריות ב-10% מהמבנים למגורים, למסחר ולשירותים, ובשנת 2030 כל המבנים החדשים יחוייבו לעשות כך (European Solar Thermal Technology Platform, 2009).

תאורה

הפוטנציאל לצמצום צריכת האנרגיה לתאורה כולל אמצעים התנהגותיים (כיבוי תאורה שאינה דרושה, בין שאוטומטית, בין שבאמצעות שינויי התנהגות אצל הצרכנים); שימוש בתאורה טבעית (כאמצעי "בנייה ירוקה") והחלפת גופי התאורה ליעילים יותר.

קומות ספרות וגגות רחבים, ומצוידים במערכות מיזוג גדולות. במגדלי משרדים גבוהים, שבהם יש יחס נמוך בין שטח הגג לבין השטח הבנוי הכולל, אפשר להשתמש במערכות מיזוג סולאריות כתמיכה למערכת מיזוג חשמלית. זאת משום שסיוע הגורם להפחתת העומס על מערכת מיזוג דחיסה (מזגן חשמלי רגיל) מעלה את נצילותה, ובכך מקטין את צריכת החשמל הנדרשת לתפוקת הקור. תרומה נוספת לשימוש במערכות סולאריות כהשלמה למערכות חשמליות היא הפחתת ביקושי השיא לחשמל בשעות החום.

במגזר הביתי יעילות השימוש במיזוג סולארי נמוכה, שכן מדובר במזגנים ביתיים קטנים, ואילו השימוש במערכות מיזוג סולאריות, נכון להיום, יעיל מבחינה טכנית וכלכלית רק בהספקים גבוהים, דוגמת אלה הדרושים במערכות המיזוג הגדולות שבמגזר המסחר והתעשייה.

מערכות מיזוג סולארי מייצרות חום שיורי רב כתוצר לוואי של תהליך המיזוג - הן בקיץ הן בחורף, כאשר המיזוג עצמו אינו נדרש, אך קולטי השמש של המערכת מסוגלים לייצר חום רב. תכנון אנרגיה משולב מאפשר ניצול חום זה לטובת צרכי חום במבנה הממוזג או בקרבתו. בענפי המלונאות, בבתי החולים, בבתי האבות, במחנות צבא ובבתי סוהר, שבהם נדרש שימוש ניכר

36 ראו למשל דוח של משרד האנרגיה האמריקני (U.S. Department of Energy, 2010), הצופה כי מחירי נורות ה-LED יצנחו בכ-90% בין 2009 ל-2020.
37 בדוח DOE (שם) צופים כי יעילות נורות ה-LED תגיע עד כדי 184 לומן/ואט בשנת 2015. ביחס ליעילות האורית של נורות ליבון (6-15 לומן/ואט), מדובר בהתייעלות שבין פי 12 לבין פי 130!

שעות. שיעור חיטון דומה (25%) צפוי גם בהתקנת מערכות אלו במשקי בית. שיתוף העובדים והמשתמשים במבנה בתהליך ההתקנה והשימוש במערכות האוטומטיות מצמצם מאוד את ההתנגדות למערכות אלו ואת טרולן בידי המשתמשים.

שינויים התנהגותיים לחיטון בחשמל על ידי הצרכנים

השפעה על התנהגות הצרכנים ותמרוצם לשימוש יעיל יותר במערכות החשמל מסוגלים לספק יחס עלות-תועלת גבוה ביותר בהשוואה לאמצעי התייעלות אחרים. הרעיון הוא פשוט: גם אם מתקנים את מערכת המיזוג היעילה ביותר, הבזבוז יימשך אם יפעילו אותה במשך כל הלילה, בעוד בני הבית מתכסים בשמיכות פוך, או כאשר אין עובדים במבנה. אי-לכך, השפעה על העובדים לסגור את המיזוג בצאתם מהחדר, או מעבר בלילה לשימוש במאווררי תקרה במקום במזגנים, יכולים להביא לחיטון ניכר, בלי להשקיע באמצעים טכניים או בציוד יקר.

אך שינויי ההתנהגות הם בעייתיים בהיבט של המדיניות: קשה לתכנן מדיניות שתגרום לשינוי; קשה להעריך את השפעת המדיניות מראש, ואף לא במהלך יישומה; אי-אפשר לדעת אם השינוי ההתנהגותי יופנם ויימשך גם כשתופסק המדיניות התומכת, או שיהיה צורך לחזור וליישם אמצעי מדיניות שונים כדי לשמור על השפעתם. מסיבות אלו נצפה יישום מועט של אמצעים המבוססים על שינויי התנהגות, וקשה למצוא דוגמאות טובות למדיניות בתחום זה. עם זאת, במדינות רבות מתנהל מחקר בתחום, מסומנים קהלי יעד ממוקדים ונבחנות דרכי השפעה על כל אחד מהם.

לצורך עבודה זו סקרנו אמצעי מדיניות שונים שנקטו מדינות שונות במטרה להביא לשינוי התנהגות. הממצאים מובאים בנספח ה'. תמצית הדברים מובאת בטבלה 5 להלן:

אמצעי	תיאור	החיטון שהושג
תצוגת זמן אמת	תצוגת צריכת החשמל בזמן אמת במקום מרכזי, כך שכל בני הבית או העובדים יוכלו לדעת מהי הצריכה הרגעית, מה עלותה, ולשוותה לממוצע הרב-יומי.	6% - 9.2%
השוואה לעמיתים	השוואה של צריכת החשמל לצריכה של השכנים או של מבנים דומים בסביבה. בדרך כלל נעשה כצורה לחשבון החשמל החודשי.	1.25% - 3.8%
פרסום ומידע	פרסום חשיבותה של התייעלות אנרגטית בערוצים שונים, כולל בדוכני מידע ועל ידי צוותי הסברה.	4% - 10%

◀ טבלה 5: הפוטנציאל לחיטון בצריכת החשמל הניתן להשגה באמצעות שינוי התנהגות צרכנים: סיכום הממצאים מנספח ה'

נצילותה האנרגטית של נורת הלהט (ליבון) הנפוצה היא נמוכה ביותר (תרשים 14), שכן היא עושה שימוש ב-5% בלבד מהחשמל הנצרך להפקת אור. יתרת האנרגיה נפלטת כחום ומעמיסה על מערכות המיזוג. נורות הפלואורסצנט הקומפקטיות (CFL) ניתנות לשימוש בבתי המגורים של נורות הליבון, ויעילותן האנרגטית גבוהה בהרבה. כך גם שפופרות פלואורסצנטיות קוויות חדישות מקוטר קטן (T5), המחליפות את נורות השפופרת בעלות קוטר גדול (מסוג T12 או T8).

נורות בטכנולוגיית ה-LED הן החסכוניות ביותר מבין אמצעי התאורה, שכן הן ממירות לאור את מרבית החשמל שהן צורכות. נורות אלו עושות שימוש ברכיבים אלקטרוניים זעירים הפולטים אור, ומגיעות במגוון עיצובים: שפופרות הדומות לנורות הפלואורסצנט, נורות אגס הדומות לנורות הליבון, או נורות הבנויות בדומה לנורות ההלוגן. עלותן של נורות ה-LED עדיין גבוהה, אך מחירן בשוק מצוי במגמת ירידה וצפוי לרדת בעתיד עוד, עד לרמה הדומה לזו של נורות הליבון כיום.³⁶ המעבר לשימוש בתאורת LED יאפשר לחסוך כ-85% מצריכת האנרגיה לתאורה, ובעתיד צפוי שיעור החיטון להגיע לכדי 90% ואף יותר.³⁷ מעבר מלא לשימוש בתאורת LED במשקי הבית בישראל בשנת 2040 יביא לחיטון של 25% בצריכת החשמל בתחום התאורה במגזר זה מעבר למצב ה"עסקים כרגיל" (ראו נספח ג'). המרת תאורת פלואורסצנט במבני משרדים ומסחר ובעתשייה לתאורת LED תביא להיקף חיטון דומה של 25%³⁹ בצריכת החשמל לתאורה במגזרים אלו.

אוטומציה

מערכות אוטומטיות לניהול משטר הפעלה חכם של צרכני החשמל מאפשרות להפחית את הבזבוז האנרגיה כתוצאה משימוש ללא צורך. מערכות אלו כוללות, לדוגמה, מפסקי נוכחות, המכבים את מערכות המיזוג והתאורה כאשר אין איש בחדר. מערכות מורכבות יותר הן מערכות "בית חכם", המאפשרות הפעלה וניתוק אוטומטיים של צרכני חשמל על פי לוחות זמנים קבועים, כגון תאורת חוץ ותאורת נוי, או פתיחה וסגירה של תריסים להכנסת תאורה טבעית וחום השמש. גישה מרחוק למערכת ניהול "בית חכם" (באמצעות האינטרנט או רשת החשמל) מאפשרת, למשל, כיבוי מזגן שנוטר פועל לאחר היציאה מהבית, או הפעלתו כאשר המשתמשים עושים דרכם בחזרה לביתם – ובכך להימנע מהנוהג השלילי להשאירו פועל כל שעות היום כדי לשמור על טמפרטורה נוחה בשעת ההגעה הביתה, בסוף יום העבודה. "רשת חשמל חכמה" מרחיבה את יכולותיה של מערכת "הבית החכם" לרשת החשמל הארצית. היא מייצרת תקן תקשורת סטנדרטי בין מערכות שונות, המאפשר גישה מרחוק למערכות והעברת מידע בזמן אמת מספק החשמל לצרכנים. מערכת תקשורת כזו מאפשרת כיבוי מערכות לא הכרחיות בשעות העומס על רשת החשמל, וכן ניהול עומסים דינמי בתגובה לעלייה ולירידה בייצור חשמל ממערכות אנרגיה מתחדשת.

התקנת מערכות אוטומציה דוגמת מפסקי כיבוי אוטומטיים לתאורה ולמיזוג בבנייני משרדים, בכיתות לימוד, בחדרי ישיבות וכיו"ב עשויה להביא לחיטון של כשעתיים בהפעלת מיזוג האוויר והתאורה ביום עבודה בן שמונה

38 המידע נאסף מדוחות משרד האנרגיה האמריקני (U.S. Department of Energy, 2005, 2012).
39 עקב מעבר מנורות T5 ביעילות של 100 לומן/לואט לנורות LED ביעילות גבוהה של 130 לומן/ואט.

סיכום: הפוטנציאל לצמצום השימוש בחשמל

יישום כל ההמלצות העולות מחלקו הראשון של מחקר זה עשוי להשתוות לגידול בביקוש לחשמל בישראל כבר בשנת 2035 ובכך לעצור את העלייה המתמדת בביקוש, אשר לאחריה תירשם ירידה כוללת בצריכת החשמל (תרשים 15). זאת בהנחה כי יישום ההמלצות יתבצע באופן ליניארי מהיום ועד לישום מלא בשנת 2040, אז צפויה צריכת החשמל המצרפית לעמוד על כ־63 מיליארדי קוט"ש, בדומה לצריכה המצרפית הצפויה בשנת 2013. סך ההפחתה בצריכת החשמל יעמוד על 38% ממתווה "עסקים כרגיל", או כ־1.6% בשנה, בכל שנה, לאורך שלושים שנים. זו הפחתה סבירה הניתנת להשגה. לדוגמה, התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית הציגה מתווה להפחתת 20% מהביקוש לחשמל בתוך עשור – הפחתה שוות ערך ל־2.2% בשנה (משרד האנרגיה והמים, 2010a).

יעד התייעלות זה עומד בקנה אחד עם הניסיון שנצבר במדינות שבהן הושם לאורך זמן דגש על התייעלות והחסכון באנרגיה (כגון קליפורניה שבארצות הברית וקנדה). במדינות אלו הושגו שיעורי חיסכון מרשימים במונחי צריכת החשמל השנתית לנפש. במחוז אונטריו שבקנדה, למשל, הצליחו מאמצי הממשל והציבור להפחית את צריכת החשמל בכ־20% למשק בית ב־23 השנים האחרונות. בקליפורניה ובניו־יורק צריכת החשמל לנפש נשארה כמעט קבועה במשך שני עשורים, מה שהוביל לכך שבשנת 2006 צריכת החשמל לנפש בערים אלו הייתה נמוכה בכ־40% מצריכת החשמל לנפש הממוצעת בארצות הברית בשנה זו.

שיפורים בתחום האקולוגי ומיזוג האוויר במגזר הביתי ובמגזר המסחרי/ ציבורי צפויים לתרום את חלק הארי לצמצום בצריכת החשמל (תרשים 16). עם זאת, התנאי לכך הוא קידום הטכנולוגיות הדרושות, דוגמת מיזוג גאותרמי ומיזוג ספיגה תרמו־סולארי, אשר תפוצתן כיום מצומצמת. בפרק זה הוצגה תחזית הביקוש לשנת 2040 בהנחה של התייעלות מקסימלית בשימוש באנרגיה. בפרק הבא יוצגו המקורות המתחדשים לחשמל ותיבחן השאלה אם אפשר למלא את סך הביקוש באמצעים אלו.

במגזר משקי הבית אנו נניח כי שילוב של כמה אמצעי מדיניות להשפעה על שינויי ההתנהגות ושל השקעות מאמצים ארוכי טווח בתחום החינוכי הסבירתי יוכל להביא לצמצום של 20% בשימוש בחשמל בשנת 2040.

המגזר המסחרי/ציבורי הוא מורכב יותר, היות שהוא כולל שלושה קהלי יעד שונים להכוונה לשינוי ההתנהגות בשימוש באנרגיה: בעלי המבנים וחברות האחזקה, העסקים השוכרים (רק לעיתים רחוקות המבנה הוא בבעלות העסק), והמשתמשים הסופיים – עובדים, קונים ומקבלי שירותים. לכל קהל יעד יש לפתח מדיניות מתמצתת שהיא רלוונטית עבורו. להלן הצעות אחדות לקהלי היעד השונים:

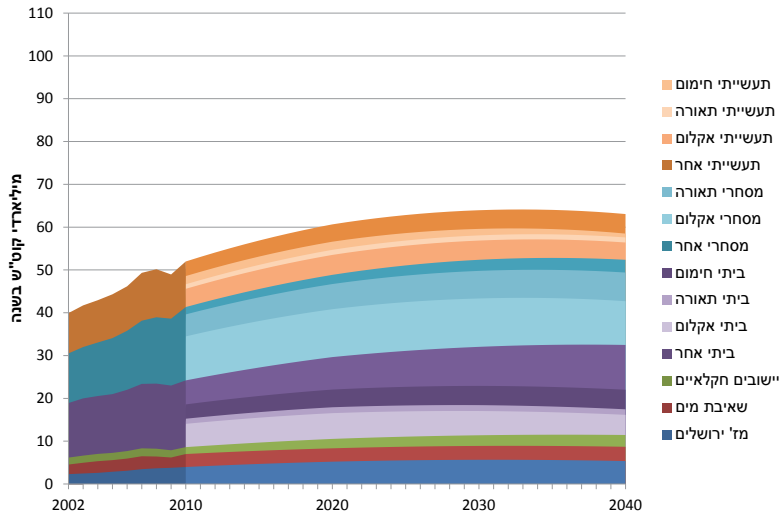
- אחד הקשיים ביישום אמצעי התייעלות במבנים הוא העובדה שבעל המבנה הוא שנדרש להשקיע, ואילו התועלת מגיעה לשוכרים. כדי לגשר על פער זה יש ליישם תקנה גורפת להצגת צריכת האנרגיה (חשמל, מיזוג, חימום) של המבנה בכל הליך מכירה או השכרה. כך יידועו השוכרים והרוכשים בדבר צריכת האנרגיה של המבנה, והבעלים יוכלו לדרוש סכומים גבוהים יותר עבור מבנה חסכוני.
 - בקרב בעלי העסקים השוכרים יש לעודד שימוש מושכל בחשמל. ראשית, יש לקדם תמריצים שליליים חזקים, ואף למנוע בחוק את האפשרות להשכרה בתשלום "גולבלי" על צריכת האנרגיה (חשמל ומיזוג). חיוב גולבלי אינו מעודד התייעלות בקרב השוכרים, ואינו מאפשר להם להשקיע באמצעים חוסכי אנרגיה, היות שהם אינם נהנים מהחסכון בצריכה. מדיניות אפשרית לתמריץ שלילי לשימוש מופרז בחשמל היא, למשל, תמחור גבוה במיוחד של חיבור חשמל בזרם גבוה לעסקים: יש להגדיר צריכת חשמל סבירה לפי שטח העסק, ועל חיבור החורג מכך יוטל קנס גבוה.
 - בקרב המשתמשים הסופיים אפשר לחייב התקנת מדי צריכת חשמל בזמן אמת, שיוצגו במקום גלוי.
- לסיכום, אנו נניח כי במגזר המסחרי/ציבורי יהיה קשה יותר להגיע לשיפור באמצעות שינויי התנהגות מאשר במגזר משקי הבית, ולכן נשיג צמצום של 10% בלבד בשימוש בחשמל עקב שינויים אלו.

התייעלות במגזרים הנוספים במשק

- במגזרים הנותרים לא ביצענו פילוח עומק והנחנו התייעלות כוללת כדלקמן:
- מזרח ירושלים והרשות הפלסטינית – ישראל מספקת כיום את מרבית צריכת החשמל של הרשות הפלסטינית. מובן שהמשך מצב זה תלוי במצב הפוליטי, ואין באפשרותנו לחזות דבר לגבי שנת 2040. לצורך התחשיב הנחנו הפחתה של 50% בחשמל המסופק מישראל, בהנחה שעד לשנת 2040 תסופק כמחצית מתצרוכת החשמל של הרשות הפלסטינית באמצעים מקומיים (טורבינת גז, ו/או מקורות מתחדשים)⁴⁰.
 - יישובים חקלאיים – התייעלות של 10%.
 - במגזר שאיבת המים הנחנו התייעלות של 10%, כפי שפורט בסעיף "שאיבה והתפלת מים" בעמ' 30.

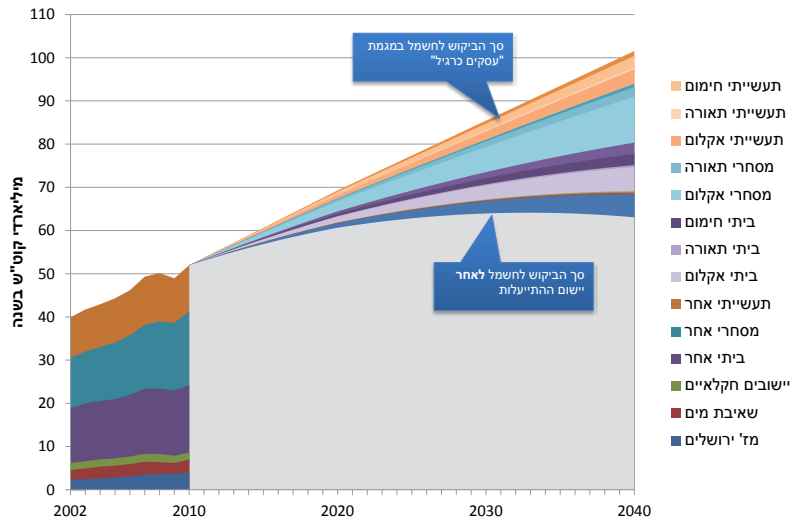
40 ראו לדוגמה (Abu Hamed, Flamm, & Azraq, 2012)

פוטנציאל ההתיעלות בביקושים לחשמל מפורט על פי מגזרים ושימושים



תרשים 15: הביקוש לחשמל במגזרים השונים ובשימושים השונים, בהנחת יישום מלא של פוטנציאל ההתיעלות

מגזרי החיסכון (Wedges) מפורטים על פי מגזרים ושימושים

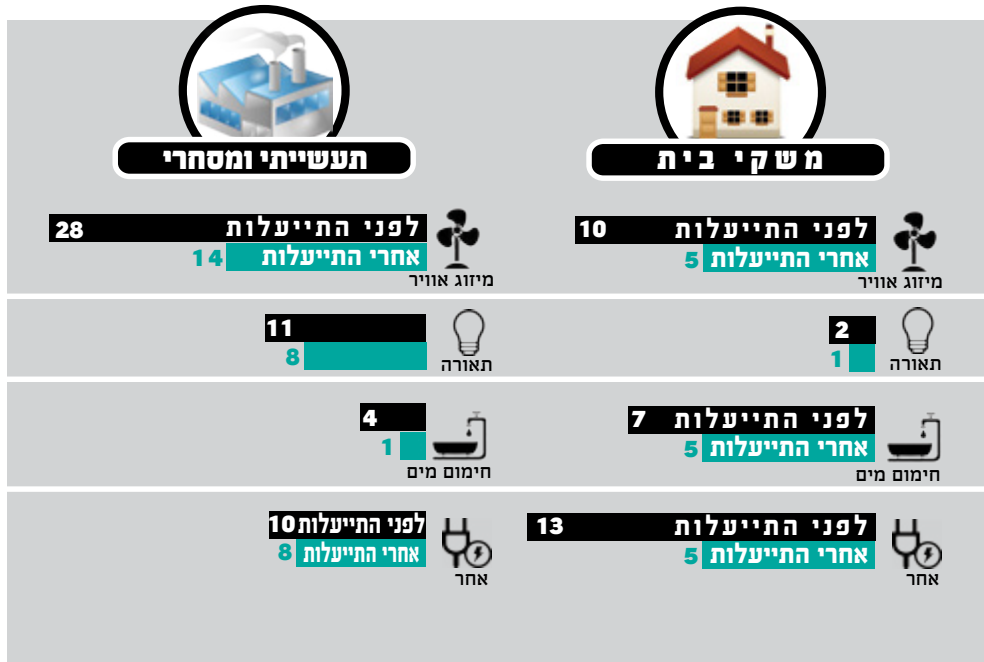
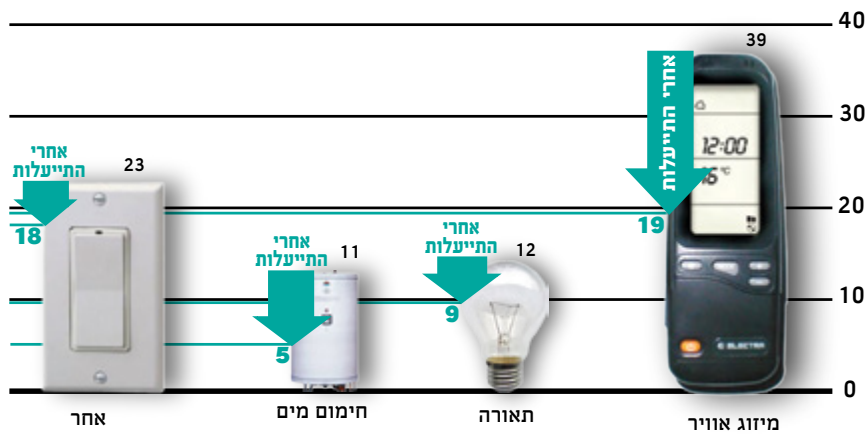


תרשים 16: מגזרי החיסכון במגזרים השונים. הגרף מתאר את חלקו של כל מגזר ושימוש בהפחתה ממגמת ה"עסקים כרגיל" (הקו העליון) ועד ליישום פוטנציאל החיסכון המלא (הקו התחתון). אפשר לראות כי השיפורים בתחום האקלום, במגזר הביתי ובמגזר המסחרי/ציבורי, הם הנתח המשמעותי ביותר בהפחתה

משקי בית	
אקלום	התייעלות נוספת של 25% במזגנים עד כדי 50% מעבר ליעילות הקיימת כיום (בעיקר כתוצאה מחידוש צי המזגנים הישנים), חיסקון של 20% בצריכה עקב שינויי התנהגות.
בנייה ירוקה	הנחנו כי ב-90% מהמבנים החדשים יתבצע יישום מקסימלי של בנייה חוסכת אנרגיה (51% חיסקון בצריכה לאקלום), ואילו רק ב-10% מהמבנים הקיימים ייושם שיפוץ אנרגטי המביא לחיסקון של 24% בצריכה. היות שעל פי ההערכות עד לשנת 2040 יוכפל השטח הבנוי בישראל, הרי שסך החיסקון לאקלום באמצעות בנייה ירוקה יהיה 24% (לפירוט ראו נספח ד').
תאורה	
חימום מים	מעבר לשימוש בתאורת LED יביא להפחתה של 25% במגזר שימוש זה.
אחר	מעבר משמעותי למכונות כביסה ולמדיחי כלים בעלי כניסת ברז מים חמים יאפשר צמצום של 90% מצריכת החשמל שלהם, במשך 75% מהשנה. הרחבת החובה לשימוש בחימום סולארי למים והעלאת הנצילות של הקולטים יביאו להפחתה של 10% בצריכת החשמל לחימום מים. בסך הכול, בשימוש לחימום מים תירשם הפחתה של 36% בצריכת החשמל.
כתוצאה מיישום אמצעים אלו צריכת החשמל במגזר משקי הבית תוכל להצטמצם ב-35% ביחס לתרחיש ה"עסקים כרגיל".	
מגזר מסחרי וציבורי	
אקלום	התייעלות נוספת של 20% בצי'לרים עד כדי 30% מעבר ליעילות הקיימת כיום - חיסקון זה נמוך מהחיסקון הצפוי במגזר משקי הבית, וזאת עקב ההנחה כי במתווה "עסקים כרגיל" יהיו מערכות המיזוג במבני מסחר, משרדים וציבור יעילות יותר מאשר במגזר משקי הבית. עקב מורכבות הנושא נניח חיסקון של 10% בלבד בצריכה עקב שינויי התנהגות. עם זאת, בזכות הפוטנציאל הגבוה למיזוג סולארי במגזר זה נניח יישום של טכנולוגיה זו במבני המסחר והציבור, דבר שיביא להפחתה נוספת של 10% בצריכת החשמל לאקלום.
בנייה ירוקה	הנחנו כי יישום של בנייה חוסכת אנרגיה בבנייה חדשה במגזר זה יאפשר חיסקון דומה למגזר משקי הבית, דהיינו 24% בצריכה לאקלום מעבר למתווה "עסקים כרגיל".
תאורה	מעבר לשימוש בתאורת LED יביא להפחתה של 25% במגזר שימוש זה.
אחר	עבור שאר מכשירי החשמל נניח התייעלות של 20% בצריכת החשמל.
כתוצאה מיישום אמצעים אלו צריכת החשמל במגזר המסחרי/ציבורי תוכל להצטמצם ב-41% בהשוואה לתרחיש ה"עסקים כרגיל".	
תעשייה	
אקלום	התייעלות נוספת של 20% בצי'לרים ובמגדלי קירור עד כדי 30% יותר מהיעילות הקיימת כיום. בזכות הפוטנציאל הגבוה למיזוג סולארי במגזר זה נניח יישום של טכנולוגיה זו במערכות הקירור בתעשייה, דבר שיביא להפחתה של 10% בצריכת החשמל לקירור.
בנייה ירוקה	24%, בדומה למגזרים הקודמים.
תאורה	מעבר לשימוש בתאורה יעילה יביא להפחתה של 25% במגזר שימוש זה.
חימום מים	פוטנציאל גבוה לחימום מים סולארי או ליצירת חום באמצעות קו־נגרציה (שתשמש כחלק ממערך ייצור החשמל בגז טבעי), ולכן נניח צמצום של 75% מצריכת החשמל לחימום מים במגזר זה. מאחר שחימום מים מהווה 60% מהאנרגיה החשמלית הדרושה לתהליכי ייצור, תהליכים אלה יכולים להוות שליש מההתייעלות במגזר זה.
אחר	בשאר אמצעי הייצור ובמכשור אחר נניח ייעול של 20% בצריכת החשמל.
כתוצאה מיישום אמצעים אלו צריכת החשמל במגזר התעשייתי תוכל להצטמצם ב-42% בהשוואה לתרחיש ה"עסקים כרגיל".	

◀ טבלה 6: פוטנציאל צמצום השימוש בחשמל בחלוקה מגזרית

צריכת החשמל בישראל בשנת 2040
ההתפלגות במשק במיליארדי קוט"ש, לפני ואחרי ההתייעלות





הפוטנציאל להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים

הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים, ובפרט מן השמש, מצויינת כאתוס של ימי ראשית הציונות, ומיוחסת לחזונו של ראש הממשלה הראשון, דוד בן-גוריון. למעשה, המקור העיקרי הראשון להפקת חשמל בהיקף נרחב בארץ ישראל היה אנרגיה מתחדשת הידרואלקטרית, שהופקה בתחנת הכוח שבנהרים.

במהלך השנים נעשו בישראל מהלכים שונים להרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת. הבולט שבהם היה הטלת חובה להתקין דודי שמש לחימום מים בבתי פרטים, עוד בשנות השבעים. עם זאת, הגישה הרווחת אצל מקבלי החלטות היא כי אף שמדובר במקור אנרגיה שיש בו תועלות רבות למשק, הרי שהוא אינו יכול לשמש חלופה של ממש לדלקים המחצבים בהפקת החשמל בישראל.

פרק זה במחקר עוסק בצד ההיצע (הפקת האנרגיה), ובוחן אם אפשר לספק את מלוא צורכי האנרגיה של ישראל בעשורים הבאים ממקורות מתחדשים בנייקיימה בלבד: שמש, רוח, ביומסה (פסולת) ועוד.

האתגר בתחום זה הוא כפול: הפקת אנרגיה בכמות הנדרשת לספק את הביקוש לחשמל, והבטחת אספקה שוטפת ויציבה של אנרגיה לאורך כל שעות היממה, 365 ימים בשנה - גם כאשר חלק ממקורות האנרגיה המתחדשת אינם זמינים (לדוגמה, אספקת אנרגיה בשעות הלילה, כאשר השמש אינה זורחת). הפקת אנרגיה מתחדשת בהיקפים גדולים מחייבת גם להתאים את רשת הולכת החשמל, לפתחה לשרדרה ל"רשת חכמה", כך שאפשר יהיה לשלב את מגוון מקורות ההפקה ולשמור על יציבות האספקה. במאמר מוסגר יש להדגיש כי המודל המוצע במחקר זה אינו כולל הפקת חשמל בכורים גרעיניים. לכאורה מדובר בטכנולוגיה זמינה, המאפשרת לספק את הביקוש העתידי לחשמל בישראל, ללא פליטות

גזי חממה, חלקיקים או גזים רעילים האופייניים להפקת אנרגיה מדלקים פחמימניים. ואולם להפקת אנרגיה גרעינית יש חסרונות רבים, הן במישור התפעולי הן במישור הפוליטי, ובפרט כאשר הדברים אמורים בישראל. לדוגמה: סוגיית הבטיחות; פליטת מזהמים במחזור הדלק; פסולת רדיואקטיבית; נצילות אנרגטית נמוכה; זמינות האורניום - שהוא משאב מתכלה; היעדר עתודות הקרקע הנדרשות; שאלת החתימה על האמנה לאי הפצת נשק גרעיני (NPT) וההיתכנות הגאופוליטית להקמת כורים בישראל; ובעיקר - העלות הגבוהה להקמה ולתפעול.

השימוש באנרגיה גרעינית בעולם מצוי בנסיגה מתמשכת בשני העשורים האחרונים. אף כי תעשיית הגרעין פועלת מזה שנים לפתח כורי "דור רביעי" יעילים ובטוחים, הרי שטכנולוגיה זו רחוקה מיישום מסחרי. לפיכך אנו ממליצים למקבלי החלטות בישראל שלא להסתמך על אנרגיה גרעינית בתכנון משק האנרגיה, ולהעדיף על פניה הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים ובנייקיימה (לפירוט נוסף בנושא ראו נספח ו', "הגדרות ומונחים").

בשנים האחרונות ביצעו הממשלה, חברות ייעוץ חיצוניות וגופים וחברות במגזר הפרטי אומדנים שונים של הפוטנציאל להפקת האנרגיה ממקורות מתחדשים. אומדנים אלה התמקדו בתרומתם של המקורות המתחדשים להפחתת בפליטת גזי החממה, במשולב עם ניתוח עלות-תועלת מול אמצעי ההתייעלות (חברת חפץ א' ושות' & חברת DHV MED בע"מ, 2009; חברת מקינזי ושות', 2009); כמו כן העריכו אומדנים אלה את פוטנציאל הפקת האנרגיה המקסימלי האפשרי בישראל ממקורות אלו. לדוגמה, המדען הראשי של משרד האנרגיה העריך בשנת 2009 כי אפשר להקים בישראל מתקנים להפקת אנרגיה סולארית בהיקף של 30,000MW, ומתקנים להפקת אנרגיית רוח בהיקף של 1,800MW. אלה, בצירוף מקורות מתחדשים נוספים, יפיקו כ-80TWh בשנה (Wald, 2009). תפוקה זו, אל מול הערכה של הביקוש לחשמל במשק,⁴¹ מלמדת כי קצב הפיתוח של מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה אינו יכול, לכאורה, להדביק את העלייה בביקוש לחשמל, וכי אפשר לספק ממקורות מתחדשים 20% עד 30% לכל היותר מצריכת החשמל בישראל. תחשיב מעודכן יותר שהציג המדען הראשי בשנת 2012 מלמד כי סך האנרגיה שאפשר להפיק

ממקורות מתחדשים בישראל מוערך בכ־75TWh בשנה בלבד. בתרחיש האופטימי יגיע סך הייצור ממקורות מתחדשים לכדי 50% מהביקוש, אך בתרחיש הסביר - לכ־30% בלבד.⁴² עם זאת, בהתאם לעיקרון "חזה וספק", תחזיות אלו אינן מתייחסות לאמצעי מדיניות לניהול הביקוש לחשמל, אשר עשויים למתן את הגידול בביקוש ולהגדיל את חלקה היחסי של האנרגיה המתחדשת בתמהיל.

תחזית אחרת להתפתחות משק החשמל הציעה כי בשנת 2030 יתבססו 80% ממשק החשמל על דלקים מחצביים (65% גז טבעי ו־15% פחם), ורק 20% מהחשמל יגיע ממקורות מתחדשים (13% סולארי, והשאר רוח וביומסה), (מור, סרוסי, & איינספן, 2012). התחזית מניחה הפחתה של כ־20% בביקוש לחשמל. תחזית ערכנית משולבת (הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים והפחתת הביקוש לחשמל) גורסת כי בשנת 2050 יתבסס משק החשמל בישראל על מקורות מתחדשים בהיקף של 47% (גרינפיס, 2013), בהנחה של התייעלות של 15% בשימוש באנרגיה ראשונית.

הנחות יסוד

לשם חישוב הפוטנציאל להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים בישראל נבחנו טכנולוגיות אחדות להפקת חשמל: רוח (בים וביבשה); שמש (בטכנולוגיות PV ובטכנולוגיה תרמו־סולארית); אנרגיה המופקת מגלי הים; ואנרגיה המופקת מפסולת אורגנית יבשה (גזיפיקציה) ורטובה (עיכול אנאירובי). להרחבה בנושא הטכנולוגיות השונות ראו נספח ו', "הגדרות ומונחים".

מרבית מקורות האנרגיה המתחדשת בישראל מוגבלים בשל אילוצים שונים: משטר הרוחות ומגבלות בניצול שטחי קרקע (עיקר השטחים שבהם יש בישראל רוח חזקה הם שטחי אש ושמורות טבע); עצמת הגלים לחופי הים התיכון בישראל; כמות הפסולת האורגנית הניתנת להמרה לאנרגיה; שטח הגגות והקירות הזמין. חישוב הפוטנציאל לתפוקת האנרגיה המתחדשת בישראל בהתחשב במקורות המוגבלים יבחן את המקסימום האפשרי לניצולם בשנת 2040. יתרת כמות האנרגיה הנדרשת תסופק ממערכות סולאריות בשטחים פתוחים בשילוב אנרגיית רוח מטורבינות הממוקמות בלב ים - שני מקורות שפוטנציאל הפקת האנרגיה שלהם גבוה מהביקוש הצפוי. השיקולים באשר להיקף השימוש במקורות אלו הם בעיקרם סביבתיים וחברתיים, ובכללם סוגיית העלות ובגרות הטכנולוגיה. פוטנציאל התרומה של מקורות אנרגיה מתחדשים לתפוקת החשמל בישראל יוערך בשני תחשיבים נפרדים: (א) הערכה של סך כמות האנרגיה הניתנת להפקה (נמדדת בקוט"ש); ו־(ב) הערכת ההספק, או האנרגיה הזמינה בכל אחת משעות היום, ביחס לביקוש באותה שעה. פרק זה מציג את החישוב הכולל של תפוקת האנרגיה ממקורות מתחדשים בישראל, ולאחריו, בפרק ו: הפוטנציאל לתפוקת החשמל ממקורות מתחדשים, יובא חישוב המתייחס להספק השעתי.

הפקת אנרגיית רוח ביבשה

מדידה של הפוטנציאל להפקת חשמל מאנרגיית רוח מחייבת עריכת סקרים מורכבים שעשויים להימשך בין כמה חודשים לשנה, ודורשים

שימוש בתרנים שגובהם כ־50 מטרים ועליהם מכשירים למדידת רוח.⁴³ סקר רוחות כולל על בסיס פרמטרים אלו טרם נערך בישראל. עם זאת, בשנות השמונים בוצעו בישראל כמה סקרי רוח מוגבלים, באמצעות תרנים בגבהים של 10 מטרים ושל 20 מטרים. הסקרים מומנו בחלקם על ידי משרד האנרגיה.⁴⁴ בשנת 2003 ערך השירות המטאורולוגי סקר רוחות על בסיס נתוני תחנות המדידה המטאורולוגיות (הנמצאות בגובה מטרים ספורים מעל הקרקע). הסקר העריך גם את משטר הרוחות באזורי הנגב והערבה באמצעות מידע טופוגרפי ברזולוציה גבוהה ומודלים ממוחשבים (משרד האנרגיה והמים, 2003). אך כי אין די במדידות אלו כדי לתכנן את הקמתה של טורבינת רוח, הרי שהן מאפשרות איתור ראשוני של האזורים בעלי הפוטנציאל הרב ביותר להפקת אנרגיית רוח, ובהם לערוך מדידות מדויקות. תכנית האב של משרד האנרגיה למשק החשמל מפרטת 14 אתרים ואזורים בישראל בעלי פוטנציאל להקמת חוות רוח בסך כולל של 860MW (רודשטיין, 2007). נתון דומה הוצג במסמך המדיניות שפרסם המשרד, ובו הוצב יעד של הקמת מתקנים להפקת אנרגיית רוח בהיקף של 800MW עד לשנת 2020 (משרד האנרגיה והמים, 2010b). לפי הערכות אופטימיות יותר אפשר להקים בישראל טורבינות רוח בהיקף של 4,000MW עד 7,000MW, בתנאי שיינתן לכך סבסוד מתאים (גרוסמן & גולדרט, 2011: 15), ועד להיקף מקסימלי של 26,500MW (האגודה הישראלית לאנרגיית רוח).⁴⁵ היקף השטח שיש בו פוטנציאל להקמת טורבינות רוח (אזורים שמשגבת בהם רוח במהירות ממוצעת העולה על 5.5 מטר בשנייה) נאמד בכ־7,500 קמ"ר.⁴⁶ עם זאת, מרביתם מצויים בשטחי אש או בשמורות טבע (תרשים 17), ובניכויים נותרים כ־1,960 קמ"ר המאפשרים הקמת טורבינות רוח בהספק כולל של כ־6,800MW. לצורכי סימולציה מניח המחקר שעד לשנת 2040 אפשר יהיה להקים על כמחצית מהשטח הפוטנציאלי (כ־950 קמ"ר) טורבינות רוח בהספק של 3,325MW.

יש לציין כי יש פוטנציאל ניכר להפקת אנרגיית רוח בשטחי יהודה ושומרון, אולם הדבר כרוך בהסדרים הפוליטיים, ולפיכך מחקר זה אינו כולל נתונים אלו.

הפקת אנרגיית רוח בים

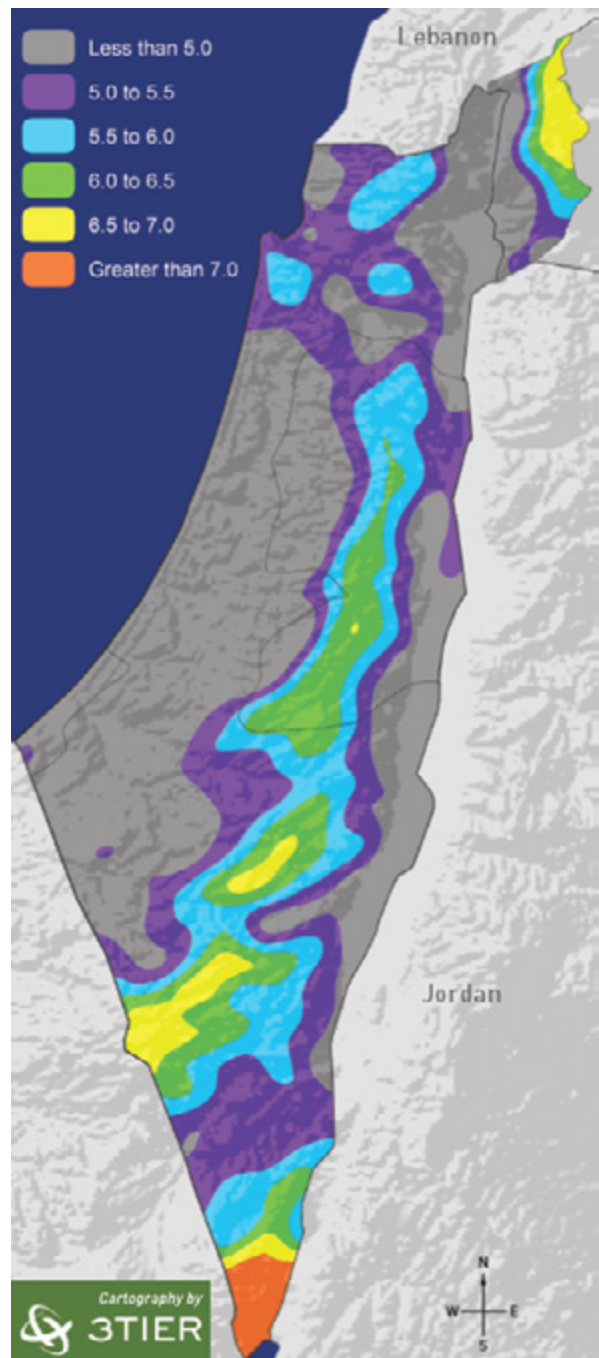
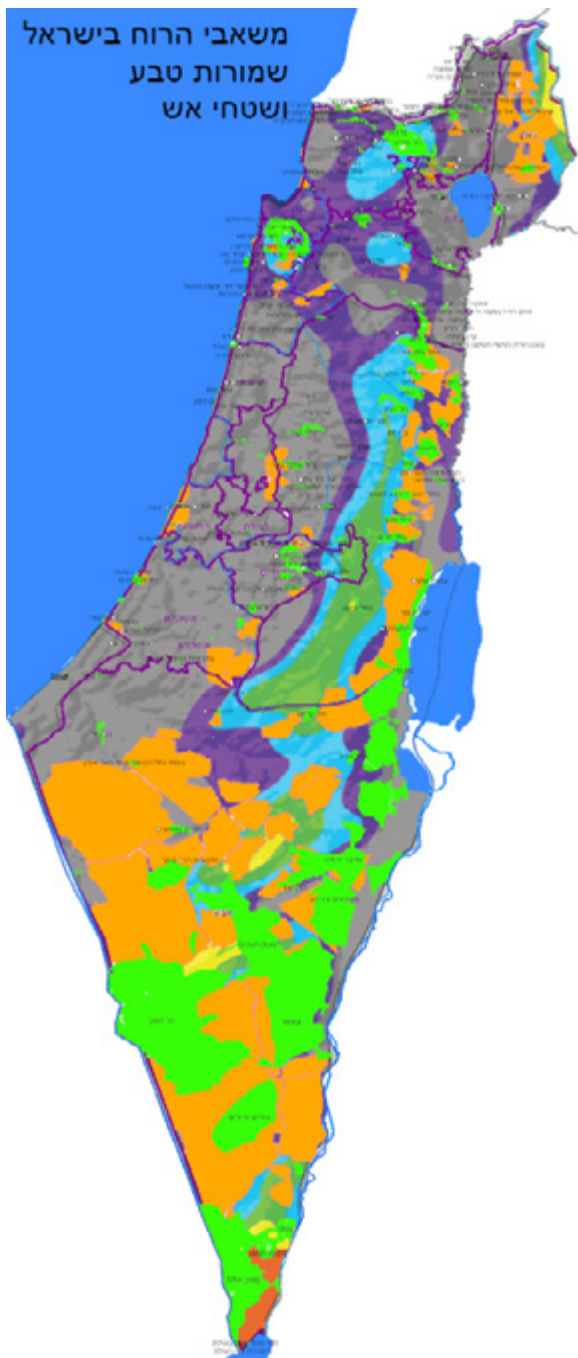
ייצור חשמל מטורבינות רוח בים, ובעיקר בים העמוק, הוא תחום המתפתח במהירות. הים התיכון לא נחשב עד כה ליעד לפרויקטים מסוג זה, אך באחרונה הוכרזו פרויקטים להקמת חוות רוח בים התיכון שיפיקו כ־16,000 MW (Soukissian, 2013; The European Wind Energy Associati, 2013), בהתאם לכך נבחנו במחקרנו הפוטנציאל להפקת חשמל באמצעות טורבינות רוח הפרוסות במימי הים התיכון. המידע מתבסס על נתוני משטר הרוחות כפי שנמדדו מלוויינים (נספח ז') והוצלב עם נתונים על עומק הים מול חופי ישראל. בחינה של מספרן והספקן ושל הטורבינות שאפשר להתקין מול חופי ישראל בשטח רצועות הים התיכון בעומקים השונים מלמדת על פוטנציאל משמעותי להפקת חשמל ממקור זה (טבלה 7). פוטנציאל זה (במגבלות נתיבי השיט וצורכי חיל הים) מאפשר למעשה לספק את מלוא תצרוכת החשמל של ישראל. עם זאת, בשל מורכבות הקמתן ועלותן

41 על בסיס אקסטרפולציה של גידול מעריכי בביקוש, בגישת "חזה וספק".

42 מצגת המדען הראשי בכנס "אילת אילות לאנרגיה מתחדשת", 27 בנובמבר 2012.

43 על המדידה להתבצע בגובה רב, משום שבגובה נמוך הרוח מואטת עקב חספוס הקרקע.

44 למידע על סקרי הרוח בספריית משרד האנרגיה והמים, ראו: אתר משרד האנרגיה והמים, http://energy.gov.il/Subjects/RE/Documents/RD_Library.pdf



תרשים 17: מימין – הערכת מהירות הרוח בישראל בגובה 80 מטרים. מקור: חברת 3TIER, באדיבות האגודה הישראלית לאנרגיית רוח. צבעי הכתום והצהוב מסמלים את האזורים בעלי פוטנציאל הרוח הגבוה ביותר. משמאל – משאבי הרוח בישראל, שמורות טבע ושטחי אש. מקור: מרכז המיפוי.

45 בהתבסס על מודלים ממוחשבים של משטר הרוחות העולמי, אך ללא מדידות מן הקרקע. חישוב הפוטנציאל להפקת האנרגיה מניח שימוש בטורבינות בנות 3.5MW בצפיפות של טורבינה בכל קילומטר רבוע.

46 המידע ניתן על ידי גדי הראלי, מנכ"ל האגודה הישראלית לאנרגיית רוח. הנתונים הוצגו בפגישת הוועדה הביין-משרדית לבחינה ולאיתור תאי שטח לחוות רוח, 10 בספטמבר 2012.

עומק המים [מטרים]	שטח [קמ"ר]	הספק מותקן [MW]	תפוקה שנתית [TWh]	תפוקה מצברת [TWh]
50-0	1,870	9,350	43.3	43.3
100-50	944	4,719	21.8	65.1
500-100	2,496	12,481	57.7	122.8
1,000-500	2,924	14,622	67.7	190.5

◀ טבלה 7: פוטנציאל הפקת החשמל מטורבינות רוח בים בעומקי ים שונים (מקור: עיבוד על פי נתוני NOAA)

אשר יפיקו כ־45.3 מיליארד קוט"ש בשנה (נספח ח'). בה בעת, תכנית האב למשק החשמל מציינת שלושה אתרים המיועדים להקמת תחנות תרמו־סולאריות בהספק כולל של 1,150MW (רודשטיין, 2007). מסמך המדיניות של משרד האנרגיה (משרד האנרגיה והמים, 2010b) הציב יעד להקמת מתקנים תרמו־סולאריים בהספק של 1,200MW עד לשנת 2020 (או לחלופין, שדות PV גדולים). כמו כן מציין המסמך 17 אתרים פוטנציאליים להקמת תחנות סולאריות בשטח כולל של כ־360,000 דונם,⁵² ובהם אפשר להקים מתקנים אשר יספקו חשמל בהיקף 18,000MW (בטכנולוגיית PV, בתחשיב של 20 דונם למגה־ואט מותקן), או כ־12,000MW בטכנולוגיה תרמו־סולארית (לפי תחשיב של 30 דונם למגה־ואט מותקן). בפרק זה התבססנו על תחשיב שמרני המניח כי עד לשנת 2040 אפשר יהיה להקים בישראל מערכות קרקעיות להפקת אנרגיית שמש בהיקף של 11,000MW.

אגירת אנרגיה

אתגר עיקרי בשילובם של מקורות מתחדשים ברשת החשמל הוא תנודתיות גבוהה והיעדר יכולת לשלוט בתפוקת המתקנים, למשל בשל ענן המסתיר מתקן סולארי או שינוי פתאומי בעצמת הרוח. אגירת חשמל עודף בשעות שבהן הוא מיוצר מעבר לביקוש (לדוגמה, בשעות הצהריים, כשהשמש ברום השמים), ואספקתו בשעות מחסור שבהן הפקת האנרגיה נמוכה מהביקוש (לדוגמה, בשעות הלילה, כאשר השמש אינה זורחת) היא אפוא מרכיב קריטי לניצול אופטימלי של מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה. בלא אגירה נדרשת הקמה של מערכות ביקוף גדול (כדי לספק את הביקוש בשעות שבהן הייצור נמוך), וכתוצאה מכך חלק ניכר מהאנרגיה המופקת לא ינוצל כלל (כאשר בשעות שבהן הייצור גבוה התפוקה תעלה על הביקוש). כיום נמצאות בפיתוח טכנולוגיות רבות לאגירת אנרגיה, אך במחקר זה נתייחס לשלושה מקורות המוכחים כיום: תחנות להפקת אנרגיה בטכנולוגיה תרמו־סולארית המצוידות במערכות לאגירת חום; מתקני אגירה שאובה, וכלי רכב חשמליים. תכנית האב למשק החשמל (רודשטיין, 2007) מציינת שבעה אתרים בישראל שבהם אפשר להקים מתקנים לאגירת אנרגיה בהיקף של 2,350MW, נוסף לשלושה מתקנים המצויים בתהליכי תכנון ויכולו לספק יחדיו 700MW במשך כ־8 שעות.⁵³ התחשיב שבמחקר זה מניח כי עד לשנת 2040 אפשר להקים בישראל יכולת אגירה של אנרגיה

הגבוהה, מניח מחקר זה כי עד לשנת 2040 יוקמו ארבע חוות בנות 100 קמ"ר כל אחת, בהספק כולל של כ־2,200MW.

הפקת אנרגיה מפסולת

כמות הפסולת הביתית הרטובה ה"נקייה" בישראל היא כ־0.96 מיליון טון בשנה; בתוספת 4.7 מיליון טון של פֶּרֶשׁ בעלי חיים וכ־0.33 מיליון טון בוצה אפשר להפיק כ־1.2 מיליארד קוט"ש בשנה. אלה מקבילים ליחידת ייצור בת 144MW בלבד,⁴⁷ או לכ־218MW בשנת 2040, אשר יפיקו 1.8 מיליארד קוט"ש בשנה (חברת כיוון & חברת צנובר, 2012).⁴⁸ לכך יש להוסיף כ־5 מיליארד קוט"ש של חום, שיחליפו ביקוש של כמות דומה של חשמל (שווה ערך לכ־420,000 טון סולר בשנה).⁴⁹ הגזם החקלאי בישראל (פסולת יבשה) נאמד בכ־0.72 מיליון טון בשנה, ומהם אפשר להפיק כ־122MW או כ־1 מיליארד קוט"ש בשנה בשנת 2040 (חברת כיוון & חברת צנובר, 2012).⁵⁰

הפקת אנרגיה מגלי הים התיכון

סימולציה שנערכה עבור מכון ISPR באיטליה מלמדת כי פוטנציאל האנרגיה שאפשר להפיק מגלי הים בישראל (הסימולציה בחנה את אזור חיפה) עומד על כ־4MW לק"מ חוף, וכ־0.035TWh לק"מ חוף בשנה (Libertia, Carillob, & Sanninob, 2013). חוף הים הוא משאב טבעי מוגבל המצוי במחסור בישראל, וניצולו להפקת אנרגיה מגלי הים מחייב תכנון רגיש ואחראי. מתוך 197 ק"מ חוף בישראל כ־50 ק"מ מוקצים למתקני תשתית וצבא, ויש בהם מזחים ושוברי גלים היכולים להוות אתרים אידאליים להתקנת מערכות אנרגיה מגלי ים. שימוש בכ־40 ק"מ מסך השטחים המוגבלים, ומשוברי הגלים בשטחים שאינם מוגבלים, מגלם פוטנציאל להפקת חשמל בהספק של 160MW, או כמיליארד קוט"ש בשנה.⁵¹

הפקת אנרגיה סולארית

המגבלה העיקרית על פיתוח מתקנים להפקת אנרגיה סולארית בישראל היא המחסור בשטח זמין. עם זאת, השימוש בטכנולוגיה פוטו־וולטאית להפקת חשמל מאפשר להציב מתקנים על גבי גגות מבנים, ולנצל שטחים מופרים לייצור חשמל (שימוש כפול). הפוטנציאל להפקת חשמל בישראל בשנת 2040 ממערכות בטכנולוגיה זו ובשימוש כפול נאמד בכ־23,500MW,

47 על פי הנחה של 200 קוט"ש חשמל לטון פסולת, ויחידת ייצור הפועלת במקדם יכולת של 95%.
48 הנחת גידול של 1.4% בשנה בכמות הפסולת (כקצב גידול האוכלוסייה).
49 לפי ערך היסק של סולר - 11.83 קוט"ש לק"ג.

שאוּבָה בְהִיקָף שֶׁל 3,000MW (הַסַּפֵּק מוֹתָקֵן). סוֹלֵלוֹת הַמוֹתָקְנוֹת בְּצִי גֹדוֹל שֶׁל כְּלֵי רֶכֶב חֲשֻׁמְלִיִּים יִכְלֹת לִשְׁמֵשׁ מִקּוּר אֵיכוֹתֵי לֵאגִירַת אֲנֵרְגִיָּה, הוֹדוֹת לְזִמְן הַתְּגוּבָה הַקָּצֵר וְלִיְכוּלַת לְקַבֵּל מֵהֶרֶשֶׁת חֲשֵׁמֶל וְלֵהַחְזִיר אוֹתוֹ אֵלֶיהָ בְּתַדִּירוֹת גְּבוּוּהָ. כְּלֵי הֶרֶכֶב מִסוּגָלִים גַּם לְאֶזֶן תְּנוּדָתִיּוֹת בְּרֶשֶׁת עֵקֶב כְּנִיסָה וִיְצִיאָה מֵהִירוֹת שֶׁל מִקּוּרוֹת מִתְחַדְּשִׁים, וְלִכֵּן מִקְטִינִים אֶת הַשִּׁימוּשׁ בִּ"רִזְרָבָה סוֹבֶבֶת": טוֹרְבִּינּוֹת קוֹנְבֵּנְצִיּוֹנִלִּיּוֹת הַפּוֹעֵלוֹת בְּרִצִּיפּוֹת בְּלֹא לִיְצִיר חֲשֵׁמֶל (וְשׁוֹרְפוֹת דֶּלֶק לִשֵׁם כֶּךָ), וְיִיעוּדוֹן לִסְפֵק עֲלִיָּה מֵהִירָה בְּבִיקוּשׁ אוֹ - בְּעֵתִיד - בְּשֶׁל תְּנוּדָתִיּוֹת בְּתַפּוּקַת הָאֲנֵרְגִיָּה שֶׁל מִקּוּרוֹת מִתְחַדְּשִׁים. אִם בְּעֵתִיד יִתְרַחֵב הַשִּׁימוּשׁ בְּכֵלֵי רֶכֶב חֲשֻׁמְלִיִּים יִכְלֹו אֶלּוֹ לִסְפֵק בְּשֵׁנַת 2040 אֲגִירַת אֲנֵרְגִיָּה בְּהַסַּפֵּק שֶׁל כ־800MW⁵⁴. בְּטַבְלָה 8 לְהֵלֵן מִסוּכֹם פּוֹטֵנְצִיָּאֵל הַיִּיצוֹר מֵהַמִּקּוּרוֹת הַמִּתְחַדְּשִׁים הַשּׁוֹנִיִּים בְּשֵׁנַת 2040:

בַּהֲשׁוּוּאָה שֶׁל סֵךְ הַיִּיצוֹר הָאֲפֻשְׁרִי מִמִּקּוּרוֹת מִתְחַדְּשִׁים עִם הַבִּיקוּשׁ הַשְּׁנַתִּי הַכוֹלֵל נִרְאָה, בְּהֶעֱרָכָה רֵאשׁוֹנִית, כִּי הַמִּקּוּרוֹת הַמִּתְחַדְּשִׁים יִכְלֹו לִסְפֵק אֶת כֹּל צוּרְכֵי הַמֶּשֶׁק בְּתַרְחִישׁ הַתִּיעֵלוֹת מֵלֵאָה (64TWh בְּשֵׁנָה), וְאִף בְּתַרְחִישׁ הַתִּיעֵלוֹת חֲלֻקִית (82TWh בְּשֵׁנָה). בַּהֲמֶשֶׁךְ נִבְחַן אִם הַמִּקּוּרוֹת הַמִּתְחַדְּשִׁים יִכְלֹוּ לְמַלֵּא אֶת הַבִּיקוּשׁ לְחֲשֵׁמֶל בְּכֹל שְׁעָה בַּמֶּשֶׁךְ שֵׁנַת בִּיקוּשׁ מֵלֵאָה.

תפוקת אנרגיה [TWh/y]	הספק אפקטיבי [MW]	מקדם יכולת	הספק מותקן [MW]	טכנולוגיה
8.9	1,020	30%	3,325	רוח (יבשה)
5.8	660	30%	2,200	רוח (ים)
1.8	208	95%	218	פסולת (רטובה)
1.0	116	95%	122	פסולת (יבשה)
1.0	120	75%	160	גלי הים התיכון
45.3	5,170	22%	23,500	שמש PV על גגות
21.2	2,400	22%	11,000	שמש (קרקע)
85.0				סה"כ
יכולת אגירה [MWh]				אגירת אנרגיה
26,250	3,000	100%	3,000	אגירה שאובה
3,200	800	100%	800	רכב חשמלי

טבלה 8: הערכה של פוטנציאל הפקת החשמל ממקורות מתחדשים בישראל עד לשנת 2040

50 בהנחה של 1,000 קוט"ש חשמל לטון, וללא גידול בכמות הפסולת (עקב מיצוי שטחי חקלאות ומגבלת המים הזמינים).

51 בהכפלת ההספק לק"מ, ובהנחת מקדם יכולת של 75%.

52 בשטחים שאינם בעלי ערך סביבתי או חברתי גבוה.

53 מתקנים בצוק מנרה, במעלה גלבוע ובכוכב הירדן.

54 בהנחה כי בשנה זו ינועו בישראל 3 מיליון כלי רכב, אשר שליש מהם יהיו חשמליים, ובכל רגע כ־60% מהמכוניות החשמליות תהיינה מחוברות לעמדת טעינה ותוכלנה לספק חשמל רשת (או לקבל ממנה חשמל) בכמות של 8 קוט"ש (2kW למשך ארבע שעות), ראו (Kempton, W., Tomic, 2005).



הנחות כלכליות

חסם מרכזי להרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת הוא עלותה הנתפסת כיקרה יותר מההשקעה באנרגיה מחצבית. ואולם, המחקר מלמד כי לא זו בלבד שעלותה של האנרגיה המתחדשת אינה גבוהה יותר אלא שהמעבר לשימוש בה יפחית את הסיכון למשק בטווח הארוך.

חסם מרכזי להרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת בישראל ובעולם הוא עלותה, הנתפסת על ידי מקבלי ההחלטות כיקרה יותר מההשקעה בפיתוח תשתית המבוססת על דלקים מחצביים. ואולם בחינה מעמיקה של עלות יישומה של תכנית פיתוח רחבה, שמטרתה להסב את משק האנרגיה של ישראל לשימוש מושכל בחשמל ובמקורות אנרגיה מתחדשים להפקת חשמל, מלמדת כי לא זו בלבד שזו אינה גבוהה יותר, אלא שהשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים יכול להביא להפחתה ניכרת בסיכונים העלולים להיגרם למשק עקב מחסור במשאבי אנרגיה בטווח הארוך.

משק החשמל מורכב ממקטעים אחדים. בעיקריים שבהם נכללים הפקת החשמל, הולכתו מתחנות הכוח בקווי מתח גבוה, וחלוקתו לצרכנים בקווי מתח נמוך. יש להדגיש כי ניתוח העלויות של פיתוח משק החשמל המוצג במחקר זה מתייחס לרכיב הפקת החשמל בלבד, ואינו כולל את רכיבי ההולכה והחלוקה. בשנים הקרובות צפויים שינויים ניכרים במערך ייצור החשמל (כניסה בהיקף נרחב של יצרני חשמל פרטיים המנצלים גז טבעי ואנרגיה מתחדשת) אך צפויים שינויים גם במערך ההולכה והחלוקה. השינויים יתחוללו הן בתרחיש "עסקים כרגיל" והן בתרחיש של הרחבה ניכרת של השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים והתייעלות בשימוש בחשמל. מקטעים אלו עשויים להתפתח בכיוונים שונים, מנוגדים בחלקם:

1. הפחתה בביקוש לחשמל תצמצם את הצורך בהקמת תשתיות הולכה וחלוקה ותפחית את עלות ההשקעה ברשת.

2. הקמת מתקנים גדולים להפקת אנרגיה מתחדשת בהיקף ניכר, ומיקומם באתרים שונים ברחבי הארץ (לדוגמה, טורבינות רוח בצפון הארץ ומתקנים בטכנולוגיה פוטו־וולטאית בערבה ובנגב), יחייבו השקעה גדולה בהרחבה ובהתאמה של מערכת ההולכה הקיימת, המבוססת על תחנות הכוח הקונבנציונליות במרכז הארץ.
 3. היות שמיקומם הגאוגרפי של היצרנים הפרטיים נקבע לפי פרמטרים כלכליים וסטטוטוריים, ולא על פי צורכי רשת החשמל, הרי שהגדלת חלקם במערך הייצור תדרוש עיבוי דומה של מערך ההולכה מאתרי הייצור.
 4. ביזור רשת החשמל, וייצור מקומי באמצעות מיקרו־טורבינות או מערכות PV ביתיות ובינוניות ברשתות מקומיות (מיקרו־גריד), יפחיתו במידה ניכרת את השימוש בתשתיות ההולכה, אך בד בבד ידרשו עיבוי של מערכת החלוקה.
- לאור מגמות מנוגדות אלו, ובשל מחסור בנתונים הדרושים, הוחלט למקד את הדיון הכלכלי במחקר זה רק ברכיב הפקת החשמל (הייצור). עם זאת, יש לציין כי מבין המגמות השונות, במגמת הייצור המבוזר טמונים היתרונות הגדולים ביותר למשק, הן מבחינת עלות והן מבחינת יעילותה של המערכת, יציבותה ונצילותה.
- בפרק זה תוצגנה ההנחות הכלכליות שבבסיס המחקר.

ההנחות שבבסיס תחשיב העלויות

נתוני העלויות והנצילות האנרגטית של הטכנולוגיות השונות במחקר זה מבוססים על סקר ספרות מקיף ועל ידע קודם של כותבי העבודה. אשר לעלות ההפקה במתקנים גדולים בטכנולוגיית PV, נעשתה התאמה לנתוני עלויות עדכניים (2013) של חברה יזמית גדולה הפועלת בישראל; אשר לאנרגיית הרוח ביבשה נעשתה התאמה לתכנית עסקית מפורטת של גורם יזמי הפועל אף הוא בישראל.

תרחיש הבסיס כולל שבע טכנולוגיות להפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים כפי שפורטו בפרק ד, במגבלות המפורטות להלן:

1. במערכות התרמו־סולאריות תותקנה מערכות אגירה שוות־ערך ל־4.5 שעות ייצור (בדומה לתחנת הכוח התרמו־סולארית המוקמת

מספר שעות אגירה ביממה	מגבלה	טכנולוגיה
	ללא מגבלה	1 סולארי: פוטו וולטאי
4.5 שעות אגירה ללא אבדנים	ללא מגבלה	2 סולארי: תרמו סולארי
	950 קמ"ר - 3,325MW מותקן	3 רוח ביבשה
	400 קמ"ר - 2,200MW מותקן	4 רוח בים
	160MW מותקן	5 גלים
	320MW מותקן	6 פסולת וביומסה
עד 8 שעות, 20% אבדנים	3,400MW מותקן	7 אגירת אנרגיה

טבלה 9: אפיון מקורות האנרגיה המתחדשים - תרחיש בסיס

בעלויות המוכרות כיום, ונמצאו תואמים לעלויות בפועל המוצגות בדוחות הכספיים של חברת חשמל לשנת 2011. נתונים אלו הותאמו לתמהיל "בסיס" שבו 60% מהחשמל בישראל מופק מגז טבעי והיתרה מפחם. רכיב הייצור כולל את עלות הדלקים (0.16 ש"ח לקוט"ש בממוצע), ההון (0.09 ש"ח לקוט"ש) והתפעול (0.01 ש"ח לקוט"ש). מחירי הדלקים שנלקחו בתחשיב: פחם - 105\$ (377 ש"ח) לטון;⁵⁵ גז טבעי - 65\$ (21.54 ש"ח) ל-MMBTU. יש לציין כי לא הובאה בחשבון עלות העתודה (רזרבה) הנדרשת לגיבוי מערך הייצור בעת תקלה או אירועי קיצון. יעדי משרד האנרגיה הם לפתח עתודה של 20% יותר מהספק הביקוש המקסימלי. אולם עתודה זו יש להקצות הן בתרחיש ייצור ממקורות פוסיליים, הן בתרחיש ייצור ממקורות מתחדשים. רכיב עלות זה אפוא בתרחיש השונים ולכן לא נכלל בתחשיב מחקר זה. יתרה מזאת, כיווני הפעולה המומלצים בעבודה זו יאפשרו להגדיל את אמינות הרשת ובכך להקטין את עתודת הייצור הנדרשת: ייצור נרחב ממקורות מתחדשים ומבזורים והפניית תשומת הלב לניהול הביקושים יגדילו את האמינות, ואילו אמצעי ההתייעלות יקטינו את ההספק הנדרש, ועמו את גובה העתודה הדרושה.

העלות החיצונית העיקרית בתהליך הפקת החשמל מדלקים מחצביים היא של זיהום האוויר, והיא חושבה על פי העלויות המוכרות על ידי המשרד להגנת הסביבה (המשרד להגנת הסביבה, 2013), ראו טבלה 12. מקדמי הפליטה חושבו בהתאם לנתוני חברת החשמל.⁵⁶ נקודת המוצא של המודל (ללא התייעלות או מקורות מתחדשים) היא כי תמהיל הפקת החשמל בשנת 2040 הוא 60% מגז טבעי ו-40% מפחם, בעלות חיצונית ממוצעת של כ-12 אג' לקוט"ש.⁵⁷ על פי מודל האופטימיזציה, ככל ששיעור השימוש

בימים אלו באשלים).

- אשר לטכנולוגיות הרוח, הכמות המרבית שאפשר להקים בישראל הוגבלה בהתאם למצאי השטחים ולמשטרי הרוחות השנתיים (ראו פרק ד). טכנולוגיית הרוח בים הוגבלה לכ-400 קמ"ר בשל שיקולים טכנולוגיים וסביבתיים (פגיעה נופית). עם זאת, כדאיותה הכלכלית של טכנולוגיה זו טמונה במקדם יכולת (Capacity Factor) גבוה, המוזיל אותה בהשוואה לטכנולוגיות המקבילות, ומשום כך שולבה בהיקף משמעותי במודל החישוב.
- טכנולוגיית הפקת החשמל מביומסה נכללה במודל בהתאם להיצע חומר הגלם (כמפורט בפרק ד).

מרכיבי עלות הפקת החשמל

- העלות הכוללת של הפקת החשמל בשנת 2040 (מחירי 2013), בהינתן שיעור משתנה של הפקת אנרגיה מתחדשת ושיעורי התייעלות משתנים, כוללת שלושה רכיבים עיקריים:
- עלויות ייצור החשמל הישירות (הון, דלק ותפעול) בכל טכנולוגיה.
 - עלויות חימוניות - זיהום האוויר, לרבות פליטת גזי חממה מייצור החשמל מדלקים מחצביים, והשימוש בקרקע להקמת תשתיות ומתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת.
 - עלויות מימוש החיסכון האנרגטי. להלן יפורטו הרכיבים השונים.

עלות ייצור החשמל

עלויות ייצור החשמל פוצלו בין שני רכיבים עיקריים:

- עלויות קבועות ליחידת הספק מותקן (עלויות ההון וחלק מהתפעול התלויות בהספק המותקן בלבד).
 - עלויות תפעול משתנות (בהתאם לכמות הקוט"ש המיוצרים בשנה). רכיב ההון בעלות לקוט"ש מופק חושב על פי החזר ההון הנדרש לאורך שנות השימוש במתקן,⁵⁵ מחולקת בכמות הקוט"ש שייצרו בתקופה זו. רכיבי העלות של המקורות המתחדשים מפורטים להלן (טבלה 10). יצוין כי מחיר החשמל שהמדינה מתחייבת עליו בפני יזמים המקימים מתקנים במכסות ובתעריף הזנה, גבוה בכ-0.1 ש"ח לקוט"ש בהשוואה לעלות במודל של מכרזים.⁵⁶ בשיטת תעריף ההזנה מושתות על היזם העלויות הסטטוטוריות הכרוכות בגורמי התכנון, וכן ההתקשרות עם מנהל מקרקעי ישראל ובעלי הקרקע, והעלות לצרכן גדלה. זהו למעשה מס שגובה המדינה על האנרגיה החלופית המיוצרת בשטחים פתוחים, אך הוא אינו מבטא את העלות האמיתית למשק. בתחשיב נלקחה עלות חיצונית בסך 2,000 ש"ח לדונם בשנה - עלות השימוש בשטחים פתוחים להקמת מתקנים סולאריים.⁵⁷ זאת בהנחת נצילות שטח של 30 דונם ל-MW מותקן (הן PV-הן בתרמי).
- העלויות של הפקת החשמל בתחנות הכוח הקונבנציונליות (דלקים מחצביים) נלקחו מתחשיב רכיב הייצור (עלות ממוצעת לקוט"ש) של רשות החשמל. הנתונים הותאמו לפרמטרים של רכיב ההון והתפעול לקוט"ש

55 מחיר ההון המשוקלל (WACC). הנחת ריבית שנתי של 7.5%; הרכב המימון המקובל בסוג זה של השקעה הוא 80% הון זר בריבית של 5%, ו-20% הון עצמי בתשואה של 17.5%.
56 בשיטת תעריף ההזנה המדינה מחליטה על מכסות של הספק מותקן בטכנולוגיה מתחדשת ספציפית בתשלום לקוט"ש מיוצר על סמך עלויות ייצור רווח נורמטיביים וסביביים. היזמים מתחרים על עמידה בכל התנאים בשיטת "כל הקודם זוכה" ואחראים לטפל בכל הליכי התכנון והרישוי, ובפרט בתשלום דמי חכירה למנהל מקרקעי ישראל. בשיטה השנייה נערך מכרז בין יזמים לייצור חשמל בהיקף נתון, והתחרות היא על המחיר לקוט"ש. בשיטה זו הקרקע זמינה והיזם לא נדרש לטפל במציאתה ובהסדרים הסטטוטוריים.

טכנולוגיה	השקעה [אלש"ח/מ] מותקן	השקעה [אלש"ח/מ] מותקן/ שעת אגירה	שנים	O&M קבועות [אלש"ח/מ] מותקן/י	O&M משתנות [אלש"ח/מ] מותקן/י	דלק [ש"ח/מ] [MWh]	עלות לקוט"ש מיוצר
58PV	7,000		25	285.00	0	0	0.525
תרמו סולארי ⁵⁹	17,663	2,412	30	215.40	0.0539	0	0.716
רוח ביבשה	5,994		20	196.00	0.0325	0	0.321
רוח בים	15,979		20	143.60	0.0431	0	0.425
גלים	21,181		20	682.10	0.0718	0	0.314
פסולת ⁶⁰	28,470		20	0.00	0	0	0.318
אגירה	1,080	493	20	10.80	0	0	0.230

◀ טבלה 10: רכיבי העלות של אנרגיות מתחדשות (אלש"ח - מחירי 2013)

ממוצעת הוא 10 מ"ר (כ־10% משטח הדירה כמדד מקובל), כלומר 2,000 ש"ח ליחידת דיור. צריכת החשמל למשק בית היא כ־28,000 קוט"ש בשנה. החיסכון נאמד בכ־9% מצריכת החשמל (עקב החיסכון במיזוג האוויר), קרי 2,500 קוט"ש בשנה. משך הקיום של הציפוי הוא 10 שנים. לפיכך החזר ההון השנתי הוא 235 ש"ח למשק בית, שהם 0.09 ש"ח לקוט"ש.

באנרגיות המתחדשות עולה הפחם מתייטר, והעלות החיצונית לקוט"ש פוסילי יורדת בהתאם (ראו פירוט בפרק הבא).

עלות ההתייעלות בשימוש בחשמל

שיעורי החיסכון בהשוואה לתרחיש הבסיס פורטו בפרק ג לעיל. נתוני הפקת החשמל נבחנו בסימולציה בשלושה קווי מדיניות בתחום החיסכון: (א) ללא התייעלות בשימוש בחשמל (תרחיש "עסקים כרגיל"). בתרחיש זה הצריכה הכוללת בשנת 2040 תהיה 101.4TWh; (ב) מיצוי 50% מפוטנציאל ההתייעלות וצמצום צריכת החשמל ב־2040 לכ־82TWh, שהם כ־19% פחות מתרחיש א; (ג) מימוש מלא פוטנציאל ההתייעלות - קרי צריכת חשמל כוללת של כ־63TWh בשנת 2040, כ־38% מהצריכה בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל".

עלות המימוש של ההתייעלות האנרגטית נמדדת לרוב במונחי תוספת ההשקעה הנדרשת במכשיר החשמלי או בטכנולוגיה שבשימוש. לצורך תרגום לעלות הקוט"ש שנחסך בשל השימוש במכשיר יעיל יותר חושבה העלות השנתית⁶⁶ ביחס לכמות הקוט"ש השנתית הנחסכת בזכות אמצעי ההתייעלות (ראו דוגמאות לתחשיב בטבלה 13)⁶⁷. מאחר שעלות המימוש עולה עם שיעור החיסכון (תועלת שולית פוחתת: מרגע שהושגה התייעלות נדרשת השקעה משמעותית יותר כדי להתייעל אף יותר) הונח כי עד מימוש של 50% מפוטנציאל ההתייעלות העלות היא 0.09 ש"ח לכל קוט"ש נחסך, ואילו מעבר לכך העלות עולה לכדי 0.12 ש"ח לכל קוט"ש נחסך נוסף. נפרט לדוגמה את השורה המציגה את ההתייעלות באמצעות ציפוי חלונות במגיני קרינה: ההשקעה היא 200 ש"ח למ"ר. שטח החלונות בדירה

ב־2013 התעריף בשיטת המכסות הוא כ־0.63 ש"ח לקוט"ש ובמרכז אשלים המחיר הזוכה היה כ־0.54 ש"ח לקוט"ש. הפער נובע מההבדלים בהסדרים המוסדיים, ובתוספת של תשלומים שונים המושגת על היזם בשיטת המכסות. מרביתן של עלויות אלו הן תשלומים שונים למדינה ומשמעותם היא אפוא מס של 8 או 10 אג' לקוט"ש. תוספת עלות זו לא צריכה להיכלל בסך עלויות היצור הפוטנציאלי, ועל כן חישבנו בעבודה עלות של 0.54 ש"ח לקוט"ש.
57 בהתבסס על עבודה בהכנה של פרופ' ניר בקר למשרד להגנת הסביבה.

תחנת כוח	השקעה [אלש"ח] / שנים [MW מותקן]	O&M קבועות [אלש"ח/MW מותקן/yr]	O&M משתנות [אלש"ח/MW]	דלק [ש"ח/MWh]	עלויות לקוט"ש מיוצר
גז	3,200	20	50.00	0.01	149
פחם	6,893	40	98.80	0.013	181

טבלה 11: אומדן עלויות ייצור חשמל מדלקים פוסיליים (40% פחם, 60% גז). מקור: (חברת החשמל, 2011b)

	גז טבעי [ק"ג ל-MWh]	פחם [ק"ג ל-MWh]	עלויות חיצונית [ש"ח לק"ג נפלט]	גז טבעי [ש"ח ל-MWh]	פחם [ש"ח ל-MWh]
SO ₂	0.02	2.5	34.783	0.69566	86.9575
NO _x	0.3	2.5	20.144	6.0432	50.36
PM ₁₀ ⁶⁴	0.02	0.07	59.6	1.192	4.172
CO ₂ ⁶⁵	419	850	0.103	43.157	87.55
עלויות חיצונית ש"ח ל-MWh מיוצר					
				51.09	229.04

טבלה 12: עלויות חיצונית של חשמל פוסילי

המגזר	האמצעי	תוספת עלות [ש"ח]	חיסכון למכשיר [קוט"ש/שנה]	ש"ח/קוט"ש שנתי	שנות החזר	עלויות לקוט"ש נחסך [ש"ח קוט"ש]
ביתי	ציפוי חלונות	2000	2,500	0.8	10	0.09
	החלפת מזגנים	600	1344	1	6	0.09
תעשייתי	צילרים			0.4	10	0.05
	מערכות פנאומטיות			0.5	10	0.07
מסחרי/ציבורי	ייעול התאורה			0.1	5	0.02

טבלה 13: עלות יישום האמצעים להתייעלות אנרגטית (מקור: משרד האוצר, 2011)

58 נתונים אלו עקביים עם תוצאות המכרז באשלים: במכרז זה התחרו יזמים במכרז שהוציאה המדינה להקמת מתקן להפקת אנרגיה סולארית בשטח נתון ברמת הנגב.
59 עבור טכנולוגיות השמש יש להוסיף את העלויות החיצונית הנובעת מתיפסת השטחים הפתוחים (יורחב בהמשך): כ-3.5 אג' לקוט"ש מיוצר מ-PV, וכ-1.7 אג' לקוט"ש מיוצר תרמו סולארי.
60 העלויות לקוט"ש נאגרו בטכנולוגיות האנרגיה והפסולת משתנה בהתאם לתרחיש ולדרישות האנרגיה שהוא מצבי.
61 הנחת ש"ח של כ-3.59\$/ח.
62 על פי חברת החשמל, 2010b. יש לציין כי יש הבדלים בין ממצאי המשרד להגנת הסביבה, חברת החשמל והלמ"ס באשר לאומדן של כמויות הפליטה השנתיות מייצור חשמל.
63 על פי נתוני הפליטות, העלויות החיצונית של כל MWh המופק מפחם גבוהה פי 4.5 מזו של MWh מיוצר מגז.
64 נתוני חברת החשמל אינם מבחינים בין PM₁₀ ל-PM_{2.5}. עם זאת ידוע כי הנזק הנגרם מחלקיקים קטנים יותר (האחרונים) גבוה בצורה ניכרת, דבר המתבטא בעלויותיהם (PM₁₀ - 49,648 - ש"ח/טון, לעומת 69,645 - ש"ח/טון). כדי להפנים שונות זו הונח כי מחצית מהחלקיקים שנפלטים בגין ייצור חשמל הם PM₁₀ והיתר PM_{2.5}, והמחיר המוצג הוא ממוצע של השניים.
65 ערך גזי החממה (פד"ח) ניתן על פי המקובל באיחוד האירופי 66 על פי נתוני הפליטות, העלויות החיצונית של כל MWh המופק מפחם גבוהה פי 4.5 מזו של MWh מיוצר מגז.
66 החזר ההון בגין ההשקעה בהתאם למספר שנות הקיום ובריבית של 3%, המבטאת את עלות ההון למשק.
67 התחשיב במחקר זה מתבסס על נתוני משרד האנרגיה והמים (התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית). אשר למגזר התעשייתי מתבססים הנתונים על דיווחי תכניות התייעלות אנרגטית שהוגשו למשרד האנרגיה והמים.



הפוטנציאל לתפוקת החשמל ממקורות מתחדשים

מהלך האופטימיזציה

האופטימיזציה מתייחסת למשק החשמל בשנת 2040, והיא התבצעה על פי השלבים הללו:

1. תרחיש בסיס: משק ללא מקורות מתחדשים כלל (60% מהחשמל מופק מגז טבעי, והיתרה מפחם).
2. בתרחיש הבסיס שולבו כמויות האנרגיה הזמינה להפקה ממקורות מוגבלים: פסולת וגלים.
3. בהמשך הופעל תהליך איטרטיבי (מחזורי) הבוחן חלופות לשילוב מקורות אנרגיה מתחדשים נוספים:
 - הספק מותקן במערכות PV.
 - הספק מותקן בטכנולוגיה תרמו־סולארית, כולל אגירה של 4.5 שעות.
 - טורבינות רוח ביבשה.
 - טורבינות רוח בים.
 - הספק למערכות האגירה.
 - שעות אגירה.
4. עבור כל חלופה הופעלה הסימולציה לקביעת עלות הקוט"ש השולי הנצרך, המוסב ממקורות פוסיליים למתחדשים. הסימולציה מתחשבת בעלויות ההקמה והתפעול של המקורות המתחדשים, וכן בהספק ובכמות החשמל החסרים לאספקת מלאו הביקוש השעתי לחשמל בכל שעה נתונה על פני שנה (ואותם יש לספק מדלקים מחצביים). עם הגידול בהפקת החשמל ממקורות מתחדשים תצומצם בתחילה תפוקת החשמל מפחם (בשל ההשפעות הסביבתיות השליליות שלה והקושי להתאים את תפוקת התחנות הפחמיות לתפוקות המשתנות של המערכות המתחדשות). בהתאם לכך יעלה שיעור ההפקה מגז עד לכדי 100%. מאותו שלב יצומצם גם ההספק המותקן בתחנות כוח גזיות, בכדי להתאים את ההספק המותקן לתפוקה הנדרשת ממקורות פוסיליים.
5. יש להבדיל בין עלות הקוט"ש המיוצר, שהיא קבועה, לעלות הקוט"ש הנצרך, אשר תלויה במשתנים רבים נוספים. לדוגמה, כאשר מופק חשמל עודף מעבר לביקוש וליכולת האגירה באותה השעה, עלות הקוט"ש הנצרך הממוצע תעלה משום שהעלויות השנתיות תתחלקנה על פני מספר נמוך יותר של קוט"ש נצרכים.⁶⁸ בה בעת, העלייה בחלקם

אין די בכך שמקורות האנרגיה המתחדשת יספקו את סך כמות החשמל הדרושה במשק. יש לוודא כי אפשר לספק את הביקוש ברציפות לאורך שעות היממה. לפיכך, בחנה הסימולציה את ההתאמה בין מקורות האנרגיה הזמינים לבין עקומת הביקוש השעתי לחשמל במשך פרק זמן של שנה שלמה.

מטרתו של פרק זה לענות על השאלה אם בשנת 2040 אפשר יהיה לספק את מלאו הביקוש השעתי לחשמל בישראל ממקורות מתחדשים בני־קיימה, ומה תהיה העלות של תרחיש זה למשק.

כאמור, אין די בכך שמקורות האנרגיה המתחדשים יספקו את סך כמות החשמל הדרושה במשק; יש לוודא כי אפשר לספק את הביקוש ברציפות לאורך שעות היממה. לפיכך, נוסף לשיעורם הכולל של המקורות להפקת אנרגיה מתחדשת במשק החשמל נבחנה מידת ההתאמה בין מקורות האנרגיה הזמינים (מתקני PV, מערכות תרמו־סולאריות, טורבינות רוח ביבשה וכיו"ב), לבין עקומת הביקוש לחשמל, עבור נתוני ביקוש שעתיים במשך פרק זמן של שנה שלמה. לצורך המחקר נבנה כלי ייחודי המאפשר ביצוע סימולציה של הביקוש לחשמל בכל אחת משעות היממה, אל מול סך תפוקתו של תמהיל מקורות האנרגיה המתחדשים הזמין באותן שעות.⁶⁸ לפירוט מודל הסימולציה ראו נספח י'.

כדי להגיע לתמהיל האופטימלי של המקורות המתחדשים, במחיר המינימלי למשק, בוצעה אופטימיזציה שהחלה ממשק המבוסס על מקורות פוסיליים בלבד, ובצעדים קטנים החליפה את המקורות הפוסיליים במתחדשים, לקראת היעד של 100% מקורות מתחדשים.

68 כזכור, מגבלה עיקרית בשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים היא זמינותם החלקית לאורך היממה, דוגמת אנרגיה סולארית בשעות הלילה או ביום מעונן.

<p>הביקוש השעתי לחשמל</p> <p>נתוני תחזית הביקוש לחשמל של חברת חשמל שנת 2012 (חברת החשמל, 2011c), מותאמים לביקוש החזוי בשנת 2040.</p>	
<p>ממוצע של נתוני תפוקה של לוח PV באזור תל-אביב, ונתוני תפוקת השדה הסולארי בקיבוץ קטורה בשנת 2012 ו-2013. זאת, כמודל לתמהיל של מערכות PV קרקעיות בדרום הארץ ושל מערכות על גבי גגות במרכז. במהלך האופטימיזציה נבחנה תוספת של 500MW מותקנים של PV בכל צעד.</p>	<p>טכנולוגיית PV</p>
<p>סימולציה של תכנת System Advisor Module⁷¹ של מעבדות המחקר הלאומיות לאנרגיה מתחדשת של ארצות-הברית (NREL), בהתאמה לאקלים באזור הערבה. כדי להעריך את האפשרות לאגירת אנרגיה בוצעה "מתיחה" של עקומת התפוקה בשעות האגירה. במהלך האופטימיזציה נבחנה תוספת של 500MW מותקנים בטכנולוגיה תרמו-סולארית בכל צעד, הכוללים אגירה של 4.5-6 שעות.</p>	<p>טכנולוגיה תרמו-סולארית</p>
<p>ממוצע תפוקת הרוח בעשר תחנות מטאורולוגיות באזורי הרוח בישראל. חישוב מהירות הרוח בגובה ציר הטורבינה התבצע בעזרת נוסחת הפרופיל הלוגריתמי. הספק הטורבינות חושב על פי עקומת מהירות-הספק כללית של טורבינה בת 3.5MW. במהלך האופטימיזציה נבחנה בכל צעד תוספת של 100 קמ"ר של שטח לחוות טורבינות, ובהם 100 טורבינות בסך כולל של 350MW (עד למגבלה של 950 קמ"ר ביבשה).</p>	<p>אנרגיית רוח ביבשה</p>
<p>נתוני לוויינים (ראו נספח ז') למהירות הרוח על פני הים התיכון בגובה 10 מטרים. הנתונים עובדו בהתאם לנוסחת הפרופיל הלוגריתמי עבור גובה טורבינה של 120 מטרים. במהלך האופטימיזציה נבחנה בכל צעד תוספת של 100 קמ"ר של שטח לחוות טורבינות בים, ובהם 100 טורבינות בסך כולל של 550MW (עד למגבלה של 400 קמ"ר). בהמשך בוצע ניתוח נוסף ללא מגבלה על ניצול הרוח בים.</p>	<p>אנרגיית רוח בים</p>
<p>בהיעדר מידע על משטר הפעילות של הגלים החישוב מניח זמינות אחידה של אנרגיה מופקת מגלים לאורך כל שעות היממה (120MW).</p>	<p>אנרגיית גלים</p>
<p>כ-340MW מפסולת רטובה ויבשה, שיפיקו כ-7,750MWh בכל יום, בהיתן אגירת אנרגיה ושימוש גמיש בהתאם לצורכי ניהול המערכת.</p>	<p>אנרגיה מפסולת</p>
<p>3,400MW למשך 8 שעות במתקני אגירה שאובה וסוללות של רכבים חשמליים. במהלך האופטימיזציה נבחנה בכל צעד תוספת של 500MW להספק מערכות האגירה. כמו כן, בתחילה מוגדר כי המערכות תכלנה 6 שעות אגירה, ואפשר להגדיל כמות זו בצעדים של שעה עד לטווח של 8 שעות.</p>	<p>אגירת אנרגיה</p>

◀ טבלה 14: ההנחות ומקורות המידע שהוזנו לסימולציה

בתרשים 18 מוצגת דוגמה לתוצרי הסימולציה, המנסה לענות על עקומת הביקושים באמצעות המקורות המתחדשים. התרשים מתאר שני ימים אופייניים - בקיץ ובחורף.

להלן מובאים תרשימים המפרטים את ממצאי האופטימיזציות בתרחישי התייעלות שונים (תרשים 19). התרשימים מצד ימין מפרטים את תמהיל המקורות המתחדשים במהלך התקדמות האופטימיזציה, והתרשימים מצד שמאל מפרטים את רכיבי העלויות העיקריים (עלות הייצור, עלויות חיצוניות ועלות ההתייעלות), במהלך האופטימיזציה. העקומה בצבע האדום (המתאימה לסקאלה מימין) מבטאת את שיעור החדירה של מקורות מתחדשים למשק בכל צעד אופטימיזציה. הקו האדום האנכי מציין את נקודת ה-RN⁷² (Revenue Neutral), שבה כל הרווחים מיישום ההתייעלות במשק מושקעים במקורות המתחדשים, ולכן בנקודה זו עלות משק החשמל זהה לעלות במצב 0/0.

היחסי של המקורות המתחדשים תצמצם מאוד את השימוש בתחנות הכוח הקונבנציונליות, והן תפעלנה לפרקי זמן קצרים בעת מחסור במקורות המתחדשים.⁷⁰ עלות הקמת תחנות כוח אלו (ההון המושקע) תתפרס על פני מעט קוט"ש מיוצרים, והעלות לקוט"ש המיוצר בהן תגדל בצורה ניכרת.

6. בסיום התחשיב עבור כל חלופה לשילוב מקורות מתחדשים נבחרת החלופה שבה עלות הקוט"ש השולי הנצרך המוסב היא הנמוכה ביותר.

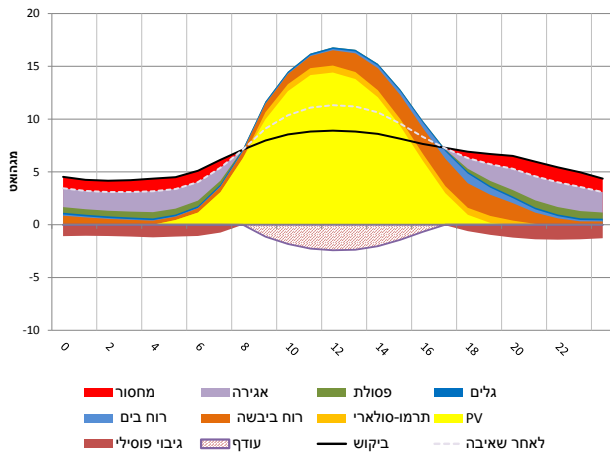
7. האופטימיזציה ממשיכה בחישוב לאורך מאה צעדים ומשלבת בהדרגה מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה כדי לתת מענה לביקוש החזוי, עד ליעד ההפקה של 100% מקורות מתחדשים.⁷⁰

8. האופטימיזציה הורצה בשלושת תרחישים: משק ללא התייעלות (צריכת חשמל שנתית של 101TWh), התייעלות חלקית (82TWh), והתייעלות מקסימלית (61TWh), ראו תרשים 19 להלן.

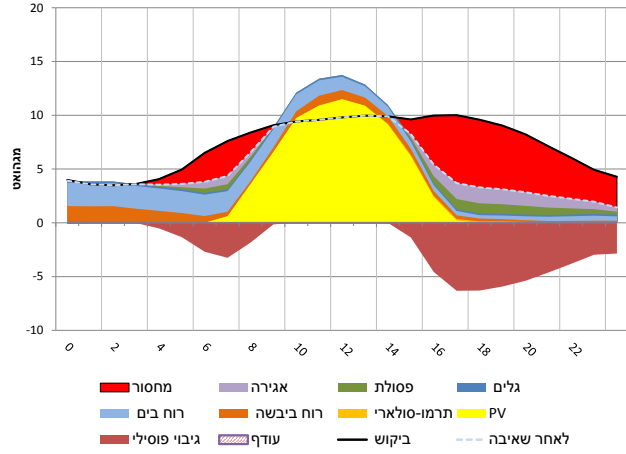
ההנחות ומקורות המידע שהוזנו לסימולציה מפורטים בקצרה בטבלה 14 להלן, ומובאים בהרחבה בנספח י'.

69 כדי לשקלל פרמטר זה בסימולציה מחולקת עלות ההפקה העודפת בכל שעה בין הטכנולוגיות השונות, על פי יחס התפוקה שלהן באותה השעה. לדוגמה, אם בשעה נתונה מופקים כ-80kW חשמל מאנרגיית השמש ו-20kW מהרוח, אך הביקוש באותה השעה הוא 90kW, נוצר עודף של 10 קוט"ש המתחלק באופן יחסי (8 קוט"ש לשמש, ו-2 לרוח), כך שנתייחס ל-72 קוט"ש שנצרכו מאנרגיית השמש, ו-18 קוט"ש מרוח). תחשיב זה נובע מחוסר האפשרות "להצמיד" את העודפים לטכנולוגיה ספציפית, ולכן יש לחלקם בין הטכנולוגיות השונות. העלות השנתית של הקוט"ש הנצרך נקבעת עבור כל טכנולוגיה באמצעות חלוקת עלות ההתקנה והתפעול בסך הקוט"ש הנצרכים שהפיקה.

ייצור חשמל ממקורות מתחדשים מול עקומת הביקוש - קיץ



ייצור חשמל ממקורות מתחדשים מול עקומת הביקוש - חורף



◀ תרשים 18: דוגמה לתוצרי הסימולציה עבור יום חורף ויום קיץ - עקומת הביקוש בקו שחור, ומתחתיה המקורות המתחדשים השונים. הפער בין הביקוש לבין ייצור ממקורות מתחדשים (בצבע אדום) ימולא על ידי מקורות פוסיליים. אפשר לראות כי בחורף רכיב הרוח בולט הוא משמעותי, ובקיץ רכיב השמש בצהריים. בקיץ יש עודפים מעבר ליכולת האגירה, ואילו בחורף יש מחסור ניכר. להסבר מפורט יותר, ראו נספחים י-ב.

המתאם בין מקורות האנרגיה המתחדשים לבין הביקוש היומי

ממצא נוסף שהסימולציה מספקת הוא מידת ההתאמה היומית בין עקומת הביקוש השעתית לבין הייצור בטכנולוגיות השונות (מתקני PV, מערכות תרמו-סולאריות, טורבינות רוח ביבשה וכיו"ב), וכן ההתאמה לתפוקה המצרפית של כל אחד מן המקורות (שמש, רוח), לכלל המקורות המתחדשים, ולבסוף - לכלל המקורות המתחדשים בתוספת פסולת ואגירת אנרגיה (תרשים 20) ⁷³

הסימולציה מלמדת כי משאב הרוח בים נמצא במתאם הפוך (שלילי) לביקוש. במילים אחרות, בשעות שבהן הביקוש לחשמל במשק יורד, תפוקתו של מקור זה עולה (לדוגמה בשעות אחר הצהריים). בכך משלימה הרוח את הירידה בתפוקת המקורות התלויים בשמש. לעומת הרוח, המתאם הגבוה ביותר לעקומת הביקוש נמצא עבור האנרגיה המופקת בטכנולוגיית ה-PV. מאחר שחלקה היחסי של טכנולוגיה זו בסך הספק המקורות המתחדשים הוא גבוה, משמעו של מתאם זה הוא כי אנרגיית השמש היא בעלת הפוטנציאל המיטבי לספק את מרבית החשמל הדרוש בשעות של שיא הביקוש. שילוב של אנרגיה המופקת מפסולת ושל טכנולוגיות אגירה (שזמיונותן גמישה), מעלה בהרבה את המתאם (מ' 68% לכדי 79%), ומקטין את בזבוז האנרגיה.

המסקנות העקרוניות העולות מן הסימולציה הן אלה:

אפשר להגיע לשיעורי חדירה גבוהים מאוד של מקורות מתחדשים, ובתמהיל הנכון יש גיבוי של המקורות השונים כך שהצורך בגיבוי ממקורות פוסיליים קיים, אך אינו קיצוני. כמו כן, יש תלות ישירה בין ההתייעלות האנרגטית במשק לבין היכולת לספק את הביקוש לחשמל ממקורות מתחדשים: ככל שממוצה פוטנציאל ההתייעלות, כך אפשר להגיע לשיעור גבוה יותר של מקורות מתחדשים בתמהיל הדלקים, עד לכדי 95% ⁷² עם זאת, באילוצים הקיימים (למשל, מגבלה על יכולת האגירה), אי אפשר לספק את מלוא הביקוש לחשמל במשק ב-100% ממקורות מתחדשים.

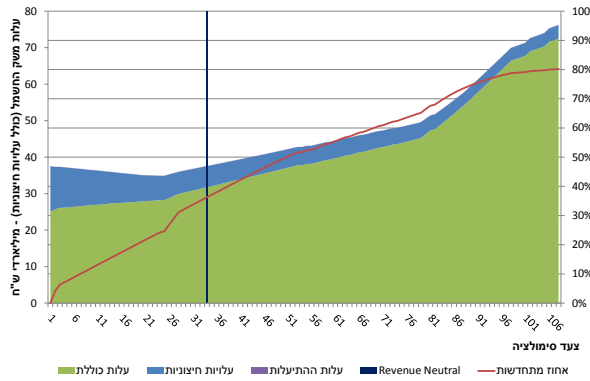
תרחישי ההתייעלות השונים מלמדים כי יש נקודות ברורות ("נקודות מפנה") שבהן תוספת מקורות מתחדשים היא בעלת תרומה נמוכה לסך הקוט"ש הנצרכים במשק. במיצוי מלוא פוטנציאל ההתייעלות, מוערכת נקודה זו בחדירה של כ-90% מקורות מתחדשים, ומעבר לה אין כדאיות כלכלית בהגדלת שיעור המקורות המתחדשים. הסימולציה מאפשרת לקבל נתוני תפעול חשובים באשר ליכולת ההסתמכות על המקורות המתחדשים לאורך השנה, דוגמת מקדם היכולת (Capacity Factor), זכויות היכולת (Capacity Credit), וכן עקומות עומס-זמן. לפירוט נתונים אלו ראו נספחים י', יא'.

⁷⁰ יש לציין כי זהו מהלך חישוב "תאב בצע" (greedy), שמבצע בכל צעד את המהלך הזול ביותר (אופטימיזציה מקומית), אך אינו מבטיח כי התוצאה הסופית תהיה הטובה ביותר האפשרית (אופטימיזציה גלובלית). עם זאת, מאחר שהמודל מונוטוני (כל תוספת של מערכת להפקת אנרגיה מתחדשת מפחיתה את השימוש בחשמל המופק מדלקים מחבביים), יש למערכת מינימום אחד גלובלי, והתוצאה של החישוב לא תהיה רחוקה מאופטימיזציה גלובלית, שתהיה מורכבת בהרבה לביצוע.

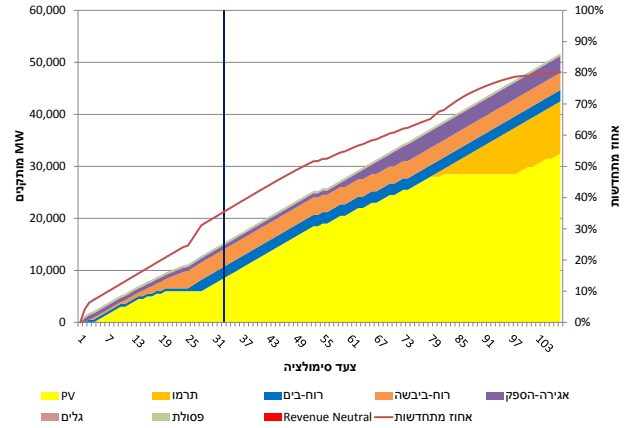
NREL System Advisor Module (SAM), <https://sam.nrel.gov> 71

משק ללא התייעלות

תוצאות סימולציה - רכיבי עלויות

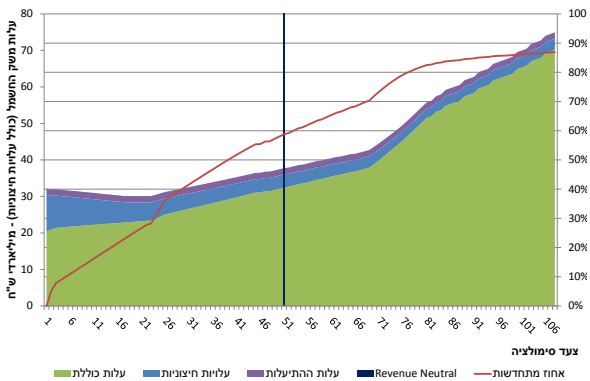


תוצאות סימולציה - הספקי מקורות מתחדשים

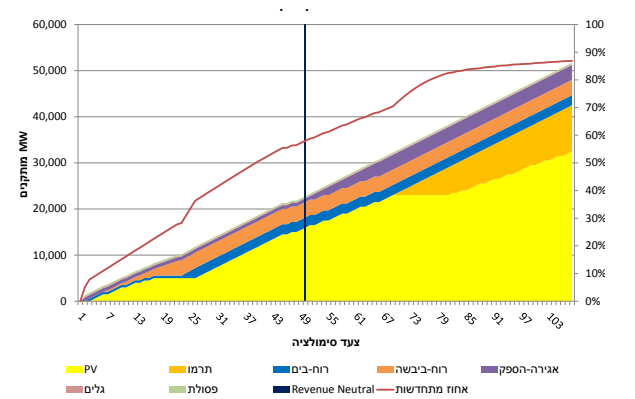


משק בהתייעלות חלקית

תוצאות סימולציה - רכיבי עלויות



תוצאות סימולציה - הספקי מקורות מתחדשים

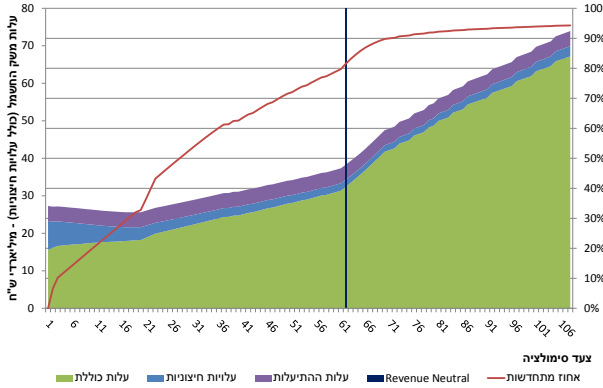


◀ תרשים 19 (למעלה ומשמאל): ממצאי האופטימיזציה להגדלת שיעור התפוקה מאנרגיות מתחדשות, מ-0% לקראת 100% בשלושה תרחישי התייעלות במשק. מצד ימין מוצג תמהיל המקורות המתחדשים (כולל אגירה) הגדל בהדרגה באופטימיזציה; מצד שמאל מפורטת העלות הכוללת של משק החשמל, מחולקת לעלויות הייצור, לעלויות חימום, ולעלויות התייעלות. הקו האדום מציין את שיעור המקורות המתחדשים מסך החשמל המופק (סקאלה ימנית), הקו הכחול האנכי מציין את נקודת ה-RN, שבה סך עלות משק החשמל משתווה לעלות במצב "0 התייעלות/0 מתחדשות"

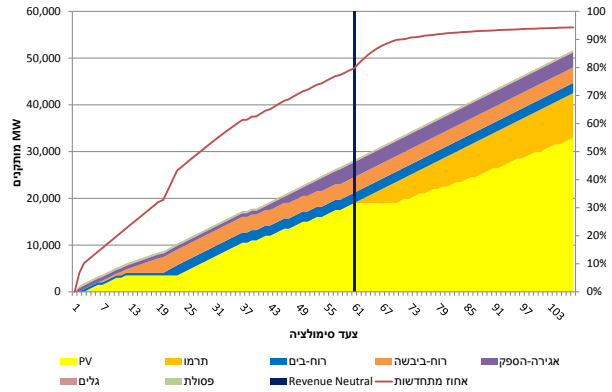
72 במשק ללא התייעלות שיעור האנרגיות המתחדשות מתכנס לכ-81%; במשק שבו התייעלות חלקית שיעור האנרגיות המתחדשות מתכנס לכ-88%; במשק שבו התייעלות מקסימלית שיעור האנרגיות המתחדשות מתכנס לכ-95%.

משק בהתייעלות מלאה

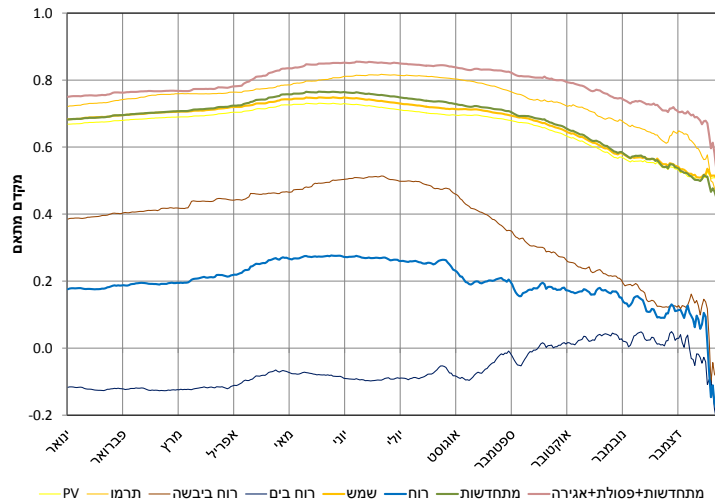
תוצאות סימולציה - רכיבי עלויות



תוצאות סימולציה - הספקי מקורות מתחדשים



המתאם בין מקורות האנרגיה המתחדשים והביקוש היומי



◀ תרשים 20: המתאם בין עקומת הביקוש היומית לבין עקומות התפוקה של מקורות האנרגיה השונים, וכן שילוב מקורות. ניכר כי המתאם הנמוך ביותר הוא לרוח בים, ואילו הגבוה ביותר הוא ל-PV. שילוב האגירה והפסולת מגדיל את המתאם בשיעור ניכר.

73 מקדם מתאם של 1 משמעו התאמה מלאה בין מקור האנרגיה לבין עקומת הביקוש (שניהם עולים ויורדים יחד); מקדם של 0 משמעו שאין כל התאמה (פעם זה יורד זה עולה, ופעם להפך); מקדם שלילי משמעו מתאם הפוך (כאשר הביקוש עולה תפוקתו של מקור האנרגיה יורדת, ולהפך).

ניתוח כלכלי של התוצאות

עלות הייצור הכוללת

העלות הכוללת של הפקת החשמל בישראל בשנת 2040, בתרחיש "0/0" (0% מתחדשות ו-0% התייעלות), היא 37.5 מיליארד ש"ח בשנה.⁷⁴ תחשיב האופטימיזציה מלמד כי עם הוספת מקורות מתחדשים העלות הכוללת יורדת בתחילה (ראו הסבר להלן), ולאחר מכן עולה. מכאן שקיימת נקודת איזון עלויות (Revenue Neutral), ובה עלות הפקת החשמל הכוללת בתמהיל שמשולבים בו מקורות אנרגיה מתחדשים היא שוות ערך לעלות בתרחיש "0/0" (ראו טבלה 15 להלן).

מבחינת העלות, המרכיב העיקרי המשפיע על שילובם של המקורות המתחדשים בהפקת החשמל הוא שיעור ההתייעלות האנרגטית במשק: ככל ששיעור העולה, יש כדאיות כלכלית בהגדלת שיעור המקורות המתחדשים (תרשים 21). עם זאת, בכל התרחישים, כולל בתרחיש שאין בו התייעלות אנרגטית כלל, הגברת השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים מביאה בתחילה לירידה בעלות הפקת החשמל הכוללת. הסיבה לכך היא שהסימולציה בוחרת קודם כל את האנרגיה המתחדשת בעלות הזולה ביותר. כמו כן, כל האנרגיה המתחדשת המופקת נצרכת ללא בזבז, ואף נרשם חיטון בעלויות חיצוניות. עם הגדלת שיעורם היחסי של מקורות האנרגיה המתחדשת, מעבר לנקודת מינימום העלות, עלותו של מרכיב הפקת החשמל שבה ועולה (טבלה 15), שכן יותר ויותר חשמל מיוצר מעבר לביקוש וליכולת האגירה ולמעשה מתבזבז ואינו נצרך (תרשים 19).

נוסף לכך, ככל שעולה שיעור המקורות המתחדשים, המגבלות הקיימות על שימוש במקורות הזולים להפקת אנרגיה מתחדשת (דוגמת מגבלת הקרקע) באות לידי ביטוי ומחייבות שילוב של מקורות יקרים יותר באופטימיזציה. עקב תהליכים אלו העלות מטפסת מעלה, עד שהיא משתווה לעלות הבסיסית במצב 0/0, כלומר לנקודת ה-RN. תוספת מקורות מתחדשים מעבר לנקודה זו אפשרית – אך בתוספת עלות למשק (תרשים 19).

שילובה של התייעלות אנרגטית במשק מעלה, כאמור, את הכדאיות הכלכלית בשילוב מקורות מתחדשים להפקת אנרגיה בשיעור גדל

והולך, מכיוון שלירידה בעלויות החיצוניות מתווסף ערך החשמל הנחשך. האופטימיזציה השנתית מלמדת אותנו אפוא כי במשק ללא התייעלות אנרגטית נקודת האיזון (RN) מושגת בשילוב מקורות אנרגיה מתחדשים בשיעור של 36% מתפוקת החשמל. במשק בהתייעלות חלקית נקודה זו מושגת בשיעור של 58%, ואילו במשק בהתייעלות מקסימלית נקודת ה-RN מושגת עם שילובם של מקורות מתחדשים בתמהיל הפקת החשמל בשיעור של 80%.

במילים אחרות, ללא התייעלות אנרגטית, שילובם של מקורות מתחדשים במשק החשמל של ישראל בהיקף של 36% יוביל לעלות זהה לזו של מצב 0/0, ובהתייעלות מקסימלית נקודת האיזון עולה ל-80%. המשמעות היא שהתועלת למשק מהחיטון האנרגטי מאפשרת להפחית את עלות הפקת החשמל ולהשקיע את המשאבים הנחשכים בשילוב מקורות אנרגיה מתחדשים ובטוחים למשק הישראלי, עד לשיעור של כ-80%. זוהי הוכחה לחשיבות הכלכלית, הסביבתית והאסטרטגית שיש לאינטגרציה בין מדיניות המעודדת התייעלות אנרגטית במשק, לבין היכולת לשלב מקורות אנרגיה מתחדשים.

למרות האמור לעיל, שילוב מקורות מתחדשים מעבר לנקודה מסוימת יוביל לרוויה בתפוקת החשמל. שילוב מערכות לאגירת אנרגיה באופטימיזציה מאפשר להעביר עודפי חשמל המופקים בשעות השיא לשעות המחסור; אולם מאחר שמערכות אלו אינן מפיקות חשמל (אלא אוגרות אותו) הרי ששילובן מעלה את עלותה הכוללת של הפקת החשמל. בנקודה שבה מערכות האגירה אינן מסוגלות להעביר את מלוא כמויות האנרגיה העודפת משעות השיא אל שעות המחסור, נוצר עודף בלתי מנוצל של חשמל המופק ממקורות מתחדשים, ולמעשה הוא מתבזבז ומגדיל את העלות הכוללת.

74 בצריכה שנתית של 101 TWh ובמחירי 2013. עלות זו מרכבת מ-26 מיליארד ש"ח עלויות ייצור ישירות של חשמל פוסילי (דלקים, הון ותפעול), ומכ-11.5 מיליארד ש"ח עלויות חיצוניות בגין זיהום אוויר ופליטת גזי חממה.

ביאור מתודולוגי לתחשיב מטריצת התוצאות

החשמל במיליארדי שקלים, הכוללת את עלויות ההקמה (הפרשות על פני אורך חיי המתקן), התפעול, התחזוקה, הדלקים, העלויות החיצוניות, ועלות יישום ההתייעלות (אם קיימת). ההצגה היא בשני ממדי האופטימיזציה: בשורות - עבור ערכי התייעלות שונים במשק, החל במשק ללא מאמצי התייעלות מיוחדים, עבור במשק המיישם מחצית מסך ההתייעלות האפשרית, וכלה במשק המיישם התייעלות מקסימלית; בעמודות - עבור ערכי חדירה שונים של מקורות מתחדשים, מאפס ועד 95% מתחדשות.

בטבלה התחתונה מוצגים הפרשי העלויות (במיליארדי שקלים) בין המצב המסוים, המאופיין בשיעורי התייעלות ומתחדשות, לבין מצב 0/0. ערכים חיוביים פירושים שיש להוסיף עלות, ערכים שליליים מציינים רווח (עלות משק החשמל במצב המסוים נמוכה יותר מעלות מצב ה-0/0). בעמודה השמאלית מצוין שיעור החדירה של אנרגיות מתחדשות בנקודה שבה יש איזון מבחינת העלות עם מצב 0/0 (נקודת ה־Revenue Neutral).

המטריצות מסכמות את עלויות הייצור החשמל בשנת 2040 במסגרת ההנחות שפורטו. כל תא במטריצה מאפיין מדיניות משולבת של חיסכון בחשמל ושל החדרת אנרגיות מתחדשות. כך, לדוגמה, תא בשורה האמצעית ובטור האמצעי מתאר מצב שבו יש מדיניות חיסכון בינונית (מחצית הפוטנציאל) ו־50% מאספקת החשמל מגיעים ממקורות מתחדשים (בתמהיל אופטימלי). בכל תא חושבו סך העלויות הכרוכות בייצור החשמל במיליארדי שקלים בשנה.

נקודת איזון העלויות היא התא במטריצה שבו סך עלות הייצור שווה לזו שבתרחיש ראשית הצירים (אפס התייעלות ואפס מקורות מתחדשים, "מצב 0/0"). טבלה 15 מציגה את הפער בין כל אחד מהמצבים שנבדקו לבין מצב 0/0 ואת נקודת האיזון בכל תרחיש התייעלות. ככל ששיעור התייעלות גדל (שורה נמוכה יותר), כך נעה נקודת האיזון שמאלה (שיעור מתחדשות גבוה יותר), ומבטאת בכך את ערך החשמל הנחסך.

בטבלה העליונה במטריצה מוצג סך העלות השנתית של משק

עלות כוללת:

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
אפס התייעלות	37.51	36.77	35.13	35.63	38.69	42.08	46.85	53.51	75.25	128.29	154.82
50% התייעלות	32.13	31.70	30.45	30.35	32.15	34.77	38.23	42.53	50.81	98.54	136.19
התייעלות מלאה	27.29	27.19	26.31	25.61	26.18	28.12	30.38	33.48	37.39	48.02	83.46

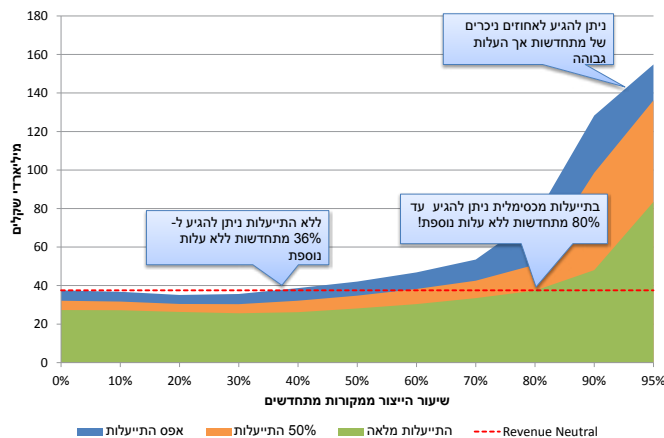
הפרש מול מצב 0/0:

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
אפס התייעלות	0.00	-0.74	-2.38	-1.88	1.19	4.58	9.34	16.01	37.74	90.79	117.31
50% התייעלות	-5.38	-5.81	-7.05	-7.16	-5.36	-2.74	0.73	5.02	13.31	61.04	98.69
התייעלות מלאה	-10.22	-10.32	-11.19	-11.89	-11.32	-9.38	-7.13	-4.02	-0.12	10.51	45.96

◀ טבלה 15: תוצאות הסימולציה - העלות הכוללת של הפקת החשמל (במיליארדי ש"ח), והפרש עלות הייצור בין מצב 0/0 לבין תרחיש נוספים⁷⁵

75 לפירוט ראו ביאור מתודולוגי לעיל.

עלות משק החשמל כולל עלויות הייצור ומחיר ההתייעלות



◀ **תרשים 21:** עלות הפקת החשמל במשק כוללת בשיעור החדירה של מקורות האנרגיה המתחדשת, עבור שלושה תרחישים: ללא התייעלות, מחצית מבוטנציאל ההתייעלות, והתייעלות מלאה במשק. אפשר לראות כי בתחילה העלות למשק יורדת, אך בהמשך היא עולה ועוברת את העלות הראשונית (נקודת ה־Revenue Neutral). סביב 70% - 90% מקורות מתחדשים (בהתאם לתרחיש ההתייעלות) יש עלייה ניכרת בעלות משק החשמל עקב הקושי למלא את עקומת הביקוש במקורות מתחדשים

בתרשים 22 ותרשים 23 רואים את ההשפעה על עלות הקוט"ש המוסב ממקורות מחצביים למתחדשים, וזאת עם העלייה בחדירת המקורות המתחדשים למשק, בתרחישי התייעלות שונים. התוצאות מלמדות כי בתחילה עלות הקוט"ש המוסב היא שלילית, דהיינו עלות ייצור החשמל בתרחיש הכולל מקורות מתחדשים היא נמוכה יותר מאשר בתרחיש ללא מקורות אלו. בהמשך העלות הופכת חיובית ומושגת נקודת האיזון (RN), שבה העלות הייצור הכוללת משתווה לעלות במצב 0/0. אפשר להמשיך ולהעלות את שיעור החדירה של מקורות מתחדשים, אך בנקודה מסוימת (כ־65% בתרחיש ללא התייעלות ו־90% בתרחיש התייעלות מלאה) העלות לקוט"ש מוסב עולה במהירות והופכת את תהליך המעבר למקורות מתחדשים לבלתי כדאי כלכלית.

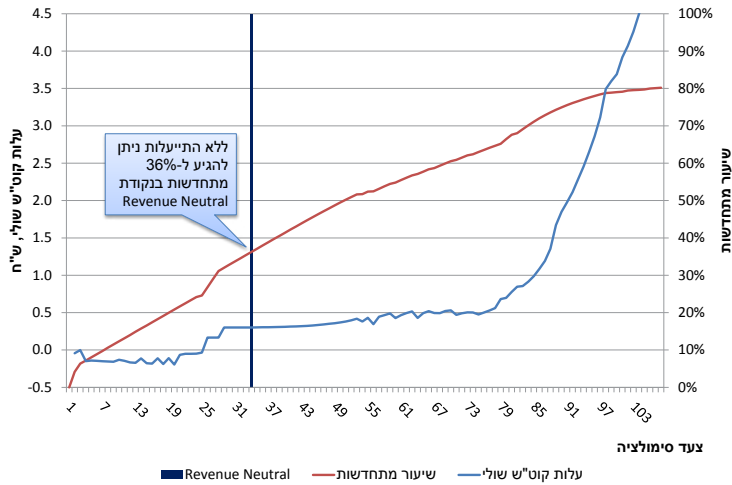
עלות הקוט"ש הנצרך

חלוקת העלות הכוללת למשק בכמות החשמל המסופקת מייצרת את עלות הייצור לקוט"ש נצרך (לאחר הפנמת אבדנים). עלות זו נעה בין 35 אג' לקוט"ש לבין 1.64 אג' לקוט"ש (כולל עלויות הייצור), כמוצג בטבלה 16 שלהלן. בתרשים 24 שלהלן אפשר להבחין בהתפתחות המעריכית (אקספוננציאלית) של עלות הקוט"ש הנצרך כפונקציה של שיעור המתחדשות. בשלושת תרחישי התייעלות ניכרת עלייה מתונה יחסית בעלות הקוט"ש הנצרך כשיעור המתחדשות מטפס מ־0% לכ־70% מהייצור. מנקודה זו ואילך מתייקרת עלות הקוט"ש בשיעור ניכר ובקצב הולך ועולה עד לכ־1.6 ש"ח לקוט"ש (ב־95% מתחדשות). ההתייקרות הניכרת הזו נובעת מהקושי "למלא" את עקומת הביקוש על ידי תוספת מקורות מתחדשים, מה שמוביל להתייקרות ניכרת של הקוט"ש השולי ולכן להתייקרות כוללת של הייצור פר קוט"ש. יש לציין כי בתרחישי התייעלות כמות האנרגיה (קוט"ש) שידרוש משק בית ממוצע תקטן, ולכן העלות הכוללת למשק בית תקטן, עובדה שאינה באה לידי ביטוי בתרשים 24.

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
אפס התייעלות	0.37	0.36	0.35	0.35	0.38	0.41	0.46	0.53	0.74	1.27	1.53
50% התייעלות	0.39	0.38	0.37	0.37	0.39	0.42	0.346	0.351	0.361	1.19	1.64
התייעלות מלאה	0.42	0.42	0.40	0.39	0.40	0.43	0.47	0.52	0.58	0.74	1.28

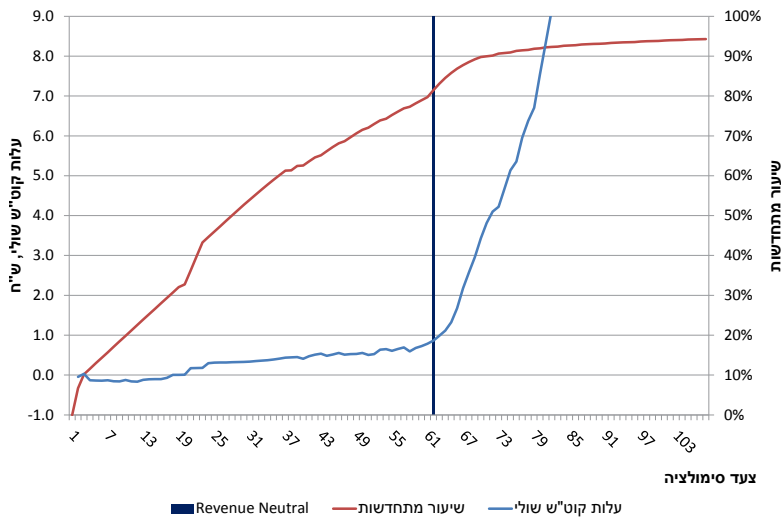
◀ טבלה 16: עלות לקוט"ש נצרך

תוצאות סימולציה להשגת 100% מתחדשות ללא התייעלות במשק



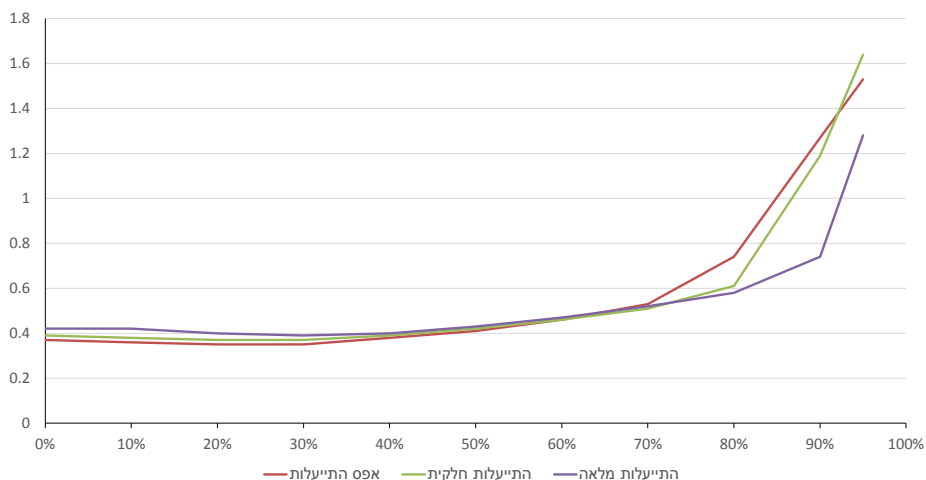
◀ תרשים 22: עלות קוט"ש שולי המוסב ממקורות מחצביים למתחדשים, ללא התייעלות. אפשר לראות כי בשלבי האופטימיזציה הראשונים העלות שלילית, אך לאחר מכן היא עולה מעל האפס. סביב 65% מתחדשות (צעד 77) העלות מטפסת במהירות לכמה שקלים לקוט"ש מוסב.

תוצאות סימולציה להשגת 100% מתחדשות התייעלות מלאה במשק



◀ תרשים 23: עלות קוט"ש שולי המוסב ממקורות מתכלים למתחדשים, בהנחת התייעלות מקסימלית. בנקודת ה-RN (המקום שבו גרף שיעורי החדירה של מתחדשות נחצה על ידי הקו הכחול האנכי), אפשר להגיע עד 80% מתחדשות. מעבר ל-90% מתחדשות עלות הקוט"ש המוסב מטפסת במהירות ומגיעה אף ל-20 שקלים לקוט"ש מוסב, ושיעור המקורות המתחדשים מתקרב ל-95%.

עלות ייצור החשמל בשיעורי מתחדשות משתנים



◀ תרשים 24: עלות ייצור החשמל בשיעורים משתנים של אנרגיות מתחדשות

כפי שצוין, מערכות הגיבוי הפוסיליות תעמודנה מובטלות ברוב ימי השנה (מקדם יכולת נמוך), וכתוצאה מכך עלויות הייצור לגיבוי פוסילי יהיו גבוהות מרוב עלויות הייצור בטכנולוגיות המתחדשות השונות. עם זאת, בסיכום ההשקעה בטכנולוגיות השונות, ההשקעה הגבוהה ביותר, בהפרש ניכר, היא בטכנולוגיית ה-PV. בתרשים 28 רואים את פילוח רכיבי העלות במחיר הקוט"ש המיוצר בטכנולוגיות השונות.

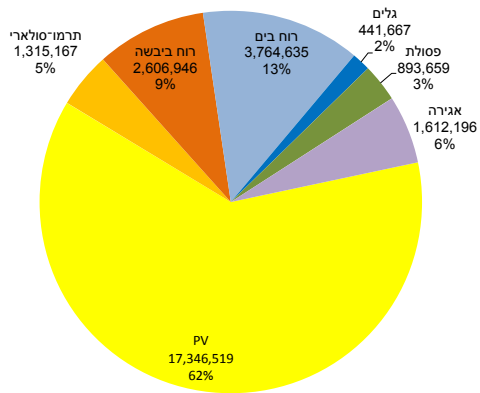
ניתוח מצב Revenue Neutral בהתייעלות מלאה

על פי תרשים 21, בתרחיש התייעלות מלאה אפשר להגיע לשיעור חדירה של 80% מייצור החשמל ממקורות מתחדשים, ללא עלות נוספת לזו של תרחיש "0/0". נבחן להלן את המלצות האופטימיזציה במצב זה. בטבלה 17 להלן פירוט תמהיל מקורות החשמל המומלץ, בצירוף מידע נוסף שחושב במודל הסימולציה:

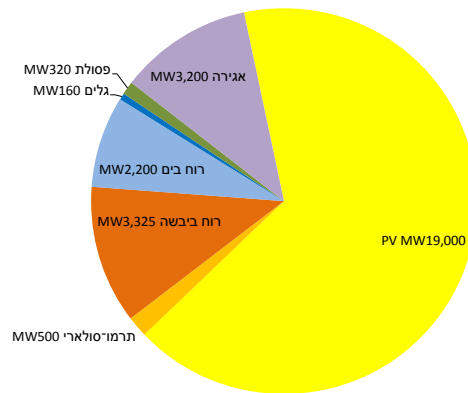
כדי להגיע להספקים המותקנים המומלצים בשנת 2040 יש להתקין בכל שנה עד לשנת 2040 כ-500MW של מערכות PV 110MW של טורבינות רוח ביבשה, 70MW של טורבינות רוח בים, 10MW של מערכות טיפול בפסולת, ו-106MW של מערכות אגירה.

הסימולציה מאפשרת לחשב עבור טכנולוגיות הייצור השונות את העלות לקוט"ש מיוצר ולקוט"ש נצרך. התחשיב לקוט"ש מיוצר כולל את עלויות ההקמה, התחזוקה, התפעול, הדלקים והעלויות החיצוניות - מחולקות בכמות הקוט"ש שיוצרו במשך השנה; התחשיב עבור קוט"ש נצרך מתחשב בעובדה שלא כל החשמל שיוצר אכן נצרך - חלקו יוצר מעבר לביקוש וליכולת האגירה ולכן ירד לטמיון. אי-לכך מחולקת העלות הכוללת בסך הקוט"ש שאכן נצרכו בפועל. היות שמספר זה יהיה נמוך מכמות הקוט"ש שיוצרו, הרי שעלות הקוט"ש הנצרך תהיה גבוהה מעלות הקוט"ש המיוצר. התחשיב בוצע על פי ההנחות שהוצגו בפרק ה. ממצאי הסימולציה לעלויות הייצור בטכנולוגיות השונות עבור נקודת ה-Revenue Neutral בתרחיש התייעלות מקסימלית מובאות בתרשימים 26, 26 להלן.

סה"כ עלויות יצור האנרגיה אלפי ש"ח. ללא עלויות חיצוניות



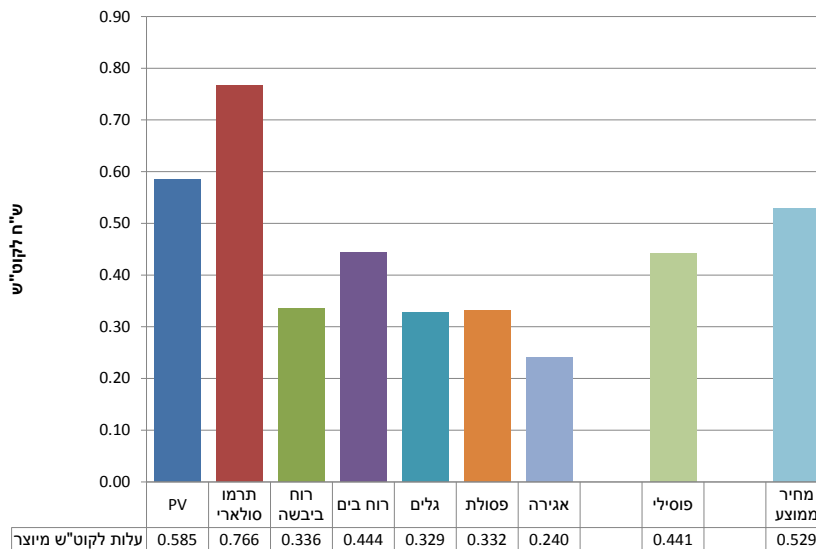
הספק מותקן ממקורות מתחדשים עבור 80% מקורות מתחדשים



תרשים 27: סך העלויות לייצור חשמל בטכנולוגיות השונות בשנת 2040, על פי סימולציה

תרשים 25: ההספק המותקן המומלץ על ידי האופטימיזציה עבור המקורות המתחדשים השונים, במצב של 80% מקורות מתחדשים והתייעלות מלאה במשק

עלות לקוט"ש נצרך כולל עלות אובדנים ועלויות חיצוניות

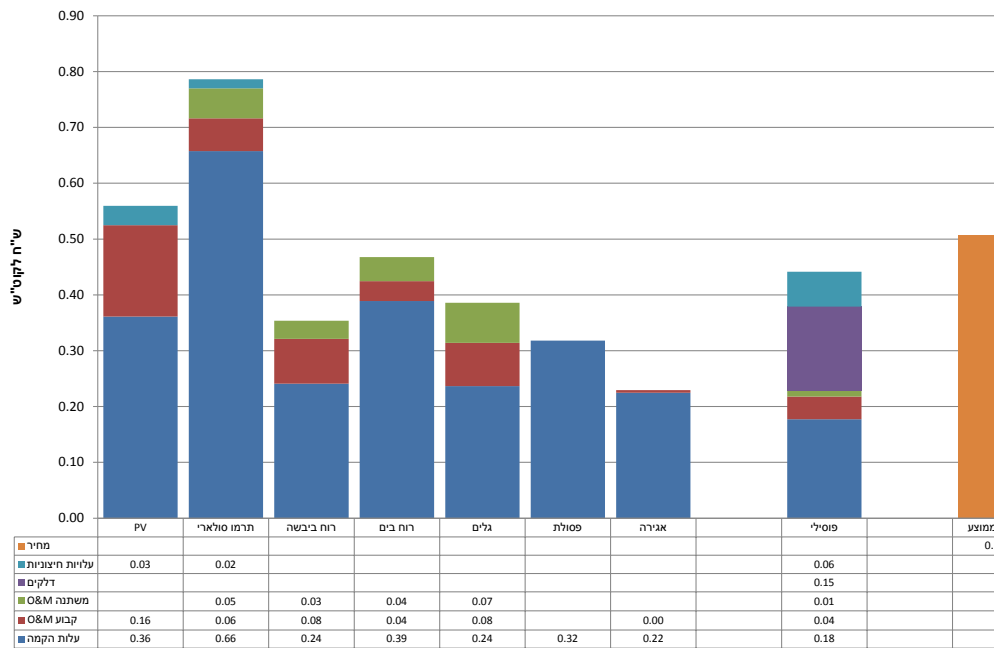


תרשים 26: עלויות הייצור לקוט"ש נצרך בטכנולוגיות השונות, בשנת 2040, על פי סימולציה. עלות קוט"ש נצרך מתחשבת בעלות ההון ה"מובטל" כתוצאה מאבדן אנרגיה המיוצרת מעבר לביקוש, ועלות תחנות הכוח לגיבוי

מקור	הספק מותקן [MW]	תפוקה שנתית [שנה/MWh]	שיעור יחסי	מקדם יכולת	עלות לקוט"ש מיצר	עלות לקוט"ש נצרך
PV	19,000	33.04	52%	20%	0.559	0.585
תרמו־סולארי	500	1.84	3%	42%	0.733	0.766
רוח ביבשה	3,325	8.12	13%	28%	0.321	0.336
רוח בים	2,200	8.87	14%	46%	0.425	0.444
גלים	160	1.41	2%	-	0.314	0.329
פסולת	320	2.81	4%	-	0.318	0.332
אגירה	3,200	7.02	11%	-	0.230	0.240
גז	8,381	10.94	17%	15%	0.421	0.421
פחם	566	0.74	1%	15%	0.746	0.746

טבלה 17: מקורות החשמל השונים המומלצים על ידי האופטימיזציה, במצב של 80% מקורות מתחדשים והתייעלות מלאה במשק

עלות לקוט"ש מיצר, פירוט לפי רכיבים



תרשים 28: העלות לקוט"ש מיצר, על פי תוצאות הסימולציה, בפירוט לפי רכיבים. אפשר לראות כי בטכנולוגיות המתחדשות הרכיב העיקרי הוא עלות ההקמה, ואילו בייצור הפוסילי יש רכיבים משמעותיים של דלקים ועלויות חיצוניות

בדיקות רגישות

כדי לבחון את רגישות המודל לפרמטרים השונים בוצעה האופטימיזציה גם בכמה תנאים נוספים. המבחנים בוצעו הן מצד הכמויות הן מצד המחירים. התוצאות הושוו לממצאים שפורטו לעיל וייקראו מעתה "תרחיש הבסיס" (80% מתחדשות בהתייעלות מקסימלית).

עלות דלקים גבוהה יותר ב־25%

אמנם במחקר זה הנחנו כי בשנת 2040 מחירי הדלקים יישארו זהים למחירים כיום, אך מרב התחזיות הן כי הדלקים הפוסיליים אוזלים, ובעתיד יעלה הביקוש על יכולת ההפקה והמחירים יאמירו (ראו למשל דוח של סוכנות האנרגיה האמריקאית, החוזה כי בשנת 2040 מחירי הפחם יהיו גבוהים ב־51% ממחירי 2010, ומחירי הגז הטבעי (בארצות הברית) יעלו ב־103% (U.S. Energy Information Administration, 2012). בהתאם לכך בחנו את נקודות ה־RN' ואת תמהילי המקורות המתחדשים האופטימליים בתרחיש שבו מחירי הגז והפחם עולים ב־25% בלבד מעבר למחירים הנוכחי (כהנחה שמרנית).

אפשר לראות כי עליית מחירי הדלקים תרמה ליתרון היחסי של טכנולוגיות החשמל המתחדש והעלתה את נקודות האיזון (נקודת ה־RN) בכל אחד מתרחישי ההתייעלות (טבלה 18). בתרחיש אפס ההתייעלות עלתה נקודת האיזון בכ־16%, לכדי 42%. בתרחיש ההתייעלות המלאה, עלתה נקודת ה־RN' מחדירה של 80% מתחדשות לכדי 84%. כמו כן חל שינוי קל בעלות ייצור הקוט"ש הפוסילי בתרחיש 0/0, שעלה בכ־10%.

עלות דלקים נמוכה יותר ב־20%

ישנם מומחים הטוענים כי מחירי הדלקים העתידיים יהיו נמוכים מהמחיר כיום - ראו למשל בדו"ח ועדת צמח, המניח עלות עתידית לגז טבעי נוזלי (LNG) בסך 12\$ - 15\$ ל־mmbtu, מחיר הנמוך עד כדי 50% מהמחיר כיום (משרד האנרגיה והמים, 2012). היות שיש תחליפיות בין LNG לדלקים נזליים ולפחם כדלקים לתחנות כוח, בתרחיש עתידי כזה, שבו יש עודף גז נזלי זול בעולם, גם מחירי הדלקים האחרים ירדו בהתאם.

בטבלה 19 מוצגת ההשפעה של ירידה ב־20% במחירי הדלקים בשנת 2040. מחדגיטא, במצב זה נקודת ה־RN' בהתייעלות מלאה זהה בשיעור ניכר כלפי מטה, אך עדיין אפשר לספק 73% מצריכת החשמל במשק באמצעות מקורות מתחדשים, ללא תוספת עלות ביחס לנקודת ה־0/0. מאידך גיסא, העלויות לא השתנו בשיעור ניכר - נקודת ה־0/0 ירדה בכ־3 מיליארד ש"ח, אך העלות הכוללת בנקודת ה־80% מתחדשות (בהתייעלות מלאה) נמוכה ב־0.4 מיליארד ש"ח בלבד מאותה נקודה בתרחיש הבסיס. המשמעות היא כי בתוספת 2.6 מיליארד שקלים מעבר לעלות נקודת ה־0/0 אפשר להגיע שוב לכדי 80% ייצור ממקורות מתחדשים גם בתרחיש עתידי זה.

עלות מתחדשות נמוכה יותר ב־20%

היות שהטכנולוגיות לייצור חשמל ממקורות מתחדשים מתפתחות גם כיום, יישום הולך וגובר של טכנולוגיות אלו יאפשר ניצול של יתרונות הגודל,

אפשר לצפות כי בעתיד ירדו מחירי ייצור החשמל ממקורות מתחדשים (ראו למשל את נתוני GPRA, אצל Tidball, Bluestein, Rodriguez, & Knoke, 2010): טכנולוגיית שמש תרד ב־60% בין 2010 ל־2050, טורבינות רוח ביבשה יוזלו בכ־30%, ורוח בים ב־50%. בחנו אם כך את ההשפעה של ירידת מחירי המקורות המתחדשים ב־20% (טבלה 20).

כצפוי, הוזלת האנרגיות המתחדשות העלתה את נקודות ה־RN' בשיעורים ניכרים, אם כי הולכים ופוחתים ככל ששיעור החיכוך עולה. בהתייעלות מלאה עולה נקודת האיזון בשיעור ניכר - מ־80% מתחדשות לכדי 87%. כמו כן, העלות הנוספת להשגת 95% מתחדשות יורדת מסך של 46 מיליארד ש"ח בתרחיש הבסיס, לכדי 31 מיליארד בלבד.

צירוף של עלות דלקים גבוהה ועלות מתחדשות נמוכה

בתרחיש האופטימי הנחנו כי תתרחש עלייה במחירי הדלקים, בד בבד עם ירידה במחירי המתחדשות. בטבלה 21 להלן מסוכמים ממצאי האופטימיזציה בהנחת עלייה של 25% במחירי הדלקים וירידה של 20% בעלויות המקורות המתחדשים.

אפשר לראות כי בתרחיש זה נקודת ה־RN' מגיעה בתפוקה של 90% ממקורות מתחדשים - כלומר ללא עלות נוספת על פני מצב ה־0/0! כמו כן אפשר להשיג 95% מתחדשות בעלות של 27 מיליארד ש"ח בלבד מעל למצב ה־0/0.

ללא מגבלת רוח

בהרצת הסימולציות נתקלנו בעובדה שטורבינות רוח, ביבשה ואף בים, מהוות מקור מתחדש זול בהשוואה למקורות אחרים, והגבלת השטח הניתן לניצול ממקורות אלו מאלצת את האופטימיזציה לבחור מקורות יקרים יותר, ובכך להגיע לערך סופי בעלות גבוהה יותר. יתרון נוסף של הטכנולוגיה הוא ביחס הנוציות (Capacity Factor) הגבוה שלה, המאפשר לה לייצר חשמל במינימום בזבז ובצורה יעילה כלכלית. איילך ביצענו בחינה של האופטימיזציה ללא מגבלה של מקורות רוח בים (ביבשה יש שטח מוגבל ואין אפשרות לייצר יותר מההספק שמכתיבה מגבלה זו).

מסקירת מהלך האופטימיזציה (תרשים 29) אפשר לראות כי הכמות הנבחרת של הרוח בים היא יותר מכפולה מתרחיש הבסיס (5,000MW) בתרחיש ללא מגבלה, לעומת מגבלה של 2,200MW בתרחיש הבסיס. מהשלב שבו כ־90% מהחשמל מיוצרים ממקורות מתחדשים (צעד 65) יש הגדלה מתמדת של הכמות הנבחרת של הרוח בים. נוסף לכך, השאיפה האסימפטוטית לשיעור חדירת המקורות המתחדשים עולה ושואפת ל־100%, ונקודת המפנה בעלויות ההשקעה במתחדשות מופיעה סביב 95% מתחדשות (במקום 90% בתרחיש הבסיס).

להלן סיכום ממצאי האופטימיזציה ללא מגבלת רוח בים (טבלה 22): מעניין להבחין כי הסרת המגבלה על טכנולוגיית הרוח בים צמצמה מאוד את העלויות בשיעורי מתחדשות גבוהים. מצב האופטימום, שבו יש 95% מתחדשות והתייעלות מלאה, עולה בתרחיש הבסיס כ־83.4 מיליארד שקלים - כ־60% יותר מעלותו בתרחיש זה.

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
אפס התייעלות	41.61	40.42	38.28	38.37	41.05	44.04	48.41	54.67	76.01	128.67	155.00
50% התייעלות	35.46	34.65	33.02	32.57	34.05	36.35	39.49	43.47	51.43	98.85	136.34
התייעלות מלאה	29.84	29.47	28.29	27.31	27.63	29.33	31.34	34.20	37.87	48.25	83.58

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	RN point
אפס התייעלות	0.00	-1.19	-3.33	-3.24	-0.57	2.42	6.80	13.06	34.40	87.06	113.39	42%
50% התייעלות	-6.15	-6.96	-8.60	-9.04	-7.57	-5.27	-2.12	1.86	9.82	57.24	94.73	65%
התייעלות מלאה	-11.77	-12.15	-13.32	-14.30	-13.98	-12.29	-10.27	-7.41	-3.75	6.64	41.97	84%

◀ טבלה 18: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של התייקרות מחירי הדלקים

להשגת שיעורי חדירה גבוהים של מקורות מתחדשים ירדו אף יותר מאשר בתרחיש ללא מגבלת רוח - 10 מיליארד שקלים בלבד מעל לעלות ה־0/0 כדי להשיג 95% מתחדשות במשק.

באופן טבעי, נקודות האיזון עלו בהשוואה לתרחיש הבסיס, אך השינוי אינו גדול (82% בלבד במקום 80% בתרחיש הבסיס).

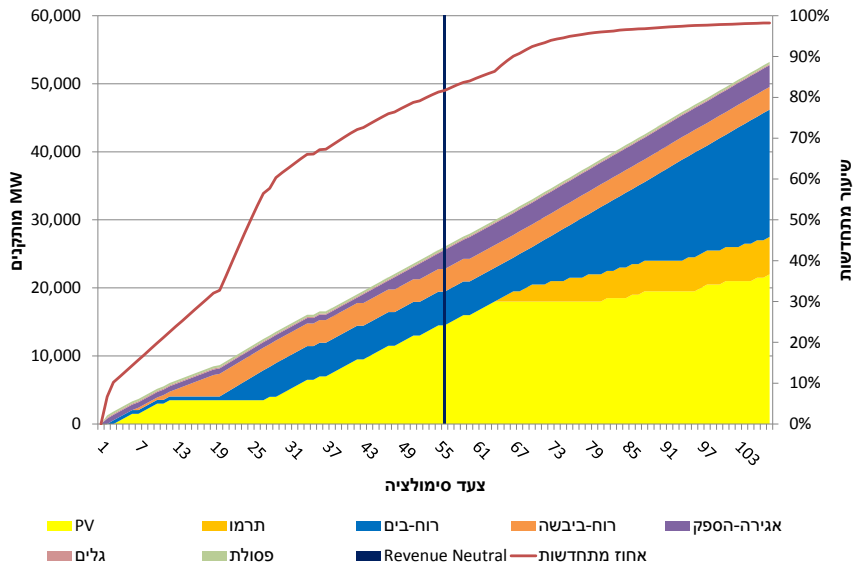
ללא מגבלת אגירה

מגבלה נוספת שזיהינו במהלך בדיקות המודל היא אגירת האנרגיה. היות שאין אפשרות לשלוט במקורות המתחדשים, הרי שהעלייה ביישומם של מקורות אלו מובילה לנקודה שבה תוספת מקורות חדשים אינה יעילה, והחשמל מיוצר ברובו מעבר לביקוש. ללא יכולת אגירה - הוא ירד לטמיון. כדי לפתור בעיה זו יש להגדיל את יכולת אגירת האנרגיה, אך כיום אפשרות זו מוגבלת עקב הטכנולוגיה הקיימת ואספקטים טכנוניים (מוגבלות אתרי האגירה השאובה).

היות שכיום יש מאמץ מחקרי עצום לפיתוח טכנולוגיות אגירה זולות, יעילות, ואפקטיביות (ראו נספח ו'), אפשר להניח שעד לשנת 2040 יגיעו חלק מהן לבשלות ויאפשרו אגירה בכמויות גבוהות מהמגבלה הנוכחית. כדי לבחון הנחה זו ביצענו אופטימיזציה ללא מגבלה על הספק האגירה האפשרי, ובהנחה שמחירי האגירה העתידיים יהיו זהים למחיר האגירה כיום. בתרשים מהלך האופטימיזציה (תרשים 30) רואים כי משיעור חדירה של כ־70% (צעד 45) יש הגדלה מתמדת של כמות האגירה המותקנת, וזאת כתחליף להתקנת מערכות תרמו־סולאריות (שהן יקרות יותר מאשר השילוב של PV עם מערכות אגירה). כמו כן אפשר לראות כי עקומת החדירה של מקורות מתחדשים עולה כעת עד לכדי 100% מתחדשות, וזאת ללא "נקודת מפנה" מובחנת, ההופכת את ההשקעה במתחדשות לבלתי כדאית.

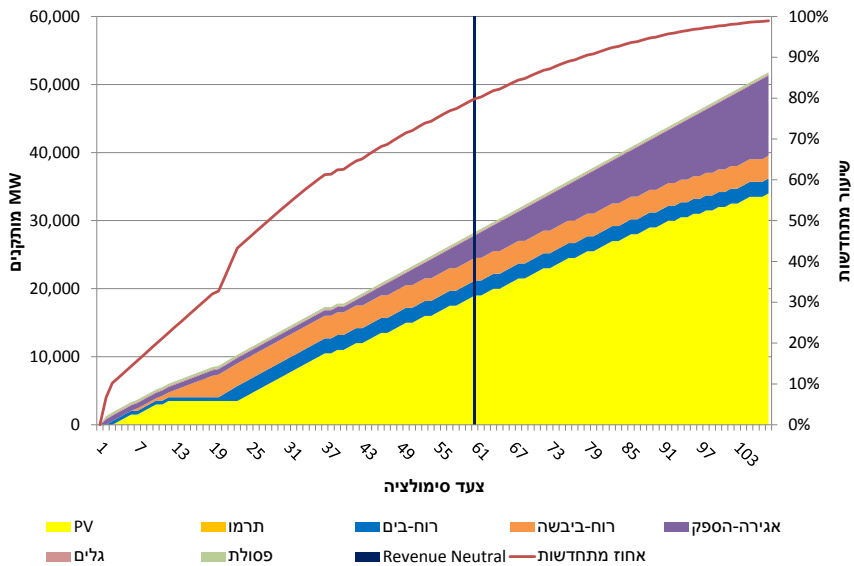
גם כאן אפשר לראות כי נקודת ה־RN לא השתנתה. אולם העלויות

תוצאות סימולציה - הספקי מקורות מתחדשים התייעלות מלאה במשק, ללא מגבלת רוח בים



תרשים 29: תוצאות הסימולציה ללא מגבלת ייצור חשמל מרוח בים.

תוצאות סימולציה - הספקי מקורות מתחדשים התייעלות מלאה במשק, ללא מגבלת אגירת אנרגיה



תרשים 30: תוצאות הסימולציה ללא מגבלת אגירת אנרגיה חשמלית

עלות כוללת

95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
154.67	127.99	74.64	52.59	45.60	40.52	36.81	33.43	32.61	33.85	34.22	אפס התייעלות
136.07	98.30	50.32	41.77	37.22	33.50	30.63	28.57	28.40	29.33	29.47	50% התייעלות
83.37	47.83	37.01	32.91	29.61	27.16	25.02	24.26	24.73	25.36	25.25	התייעלות מלאה

הפרש מול מצב 0/0

RN point	95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
32%	120.45	93.77	40.42	18.37	11.38	6.30	2.60	-0.79	-1.61	-0.37	0.00	אפס התייעלות
52%	101.85	64.08	16.10	7.55	3.00	-0.72	-3.59	-5.64	-5.82	-4.89	-4.75	50% התייעלות
73%	49.15	13.61	2.79	-1.31	-4.61	-7.06	-9.20	-9.96	-9.49	-8.85	-8.97	התייעלות מלאה

◀ טבלה 19: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של הזלת מחירי הדלק

עלות כוללת

95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
126.34	105.02	62.37	45.43	40.68	37.31	35.05	33.05	33.29	35.89	37.51	אפס התייעלות
111.32	80.94	42.63	36.49	33.46	31.04	29.31	28.27	28.97	30.96	32.13	50% התייעלות
68.74	40.22	32.06	29.17	26.96	25.42	24.15	24.04	25.21	26.68	27.29	התייעלות מלאה

הפרש מול מצב 0/0

RN point	95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
51%	88.83	67.51	24.87	7.92	3.17	-0.20	-2.46	-4.46	-4.21	-1.61	0.00	אפס התייעלות
72%	73.82	43.43	5.13	-1.02	-4.05	-6.46	-8.20	-9.23	-8.54	-6.54	-5.38	50% התייעלות
87%	31.23	2.72	-5.44	-8.33	-10.55	-12.08	-13.35	-13.46	-12.29	-10.82	-10.22	התייעלות מלאה

◀ טבלה 20: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של הזלת מחירי האנרגיה המתחדשת

עלות כוללת

95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
126.53	105.39	63.13	46.59	42.24	39.26	37.40	35.79	36.45	39.54	41.61	אפס התייעלות
111.48	81.24	43.25	37.43	34.72	32.62	31.21	30.49	31.53	33.92	35.46	50% התייעלות
68.86	40.46	32.56	29.89	27.92	26.63	25.60	25.74	27.19	28.96	29.84	התייעלות מלאה

הפרש מול מצב 0/0

RN point	95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
58%	84.91	63.78	21.52	4.97	0.63	-2.35	-4.22	-5.82	-5.17	-2.07	0.00	אפס התייעלות
77%	69.86	39.63	1.64	-4.18	-6.89	-8.99	-10.40	-11.12	-10.08	-7.69	-6.15	50% התייעלות
90%	27.24	-1.16	-9.05	-11.72	-13.70	-14.99	-16.01	-15.87	-14.42	-12.65	-11.77	התייעלות מלאה

◀ טבלה 21: הפרש עלויות ועלות כוללת של ייצור החשמל בשנת 2040, בתרחיש של התייקרות מחירי הדלק והוזלת מחירי האנרגיה המתחדשת

עלות כוללת

95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
97.37	73.97	55.50	48.02	42.83	39.41	37.47	35.78	35.13	36.77	37.51	אפס התייעלות
79.45	57.02	45.54	39.76	35.71	33.19	31.74	30.35	30.45	31.70	32.13	50% התייעלות
52.27	42.98	36.32	32.06	29.19	27.59	26.41	25.61	26.31	27.19	27.29	התייעלות מלאה

הפרש מול מצב 0/0

RN point	95%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	שיעור המתחדשות
40%	59.86	36.46	18.00	10.51	5.32	1.90	-0.03	-1.72	-2.38	-0.74	0.00	אפס התייעלות
64%	41.94	19.52	8.04	2.26	-1.79	-4.31	-5.77	-7.16	-7.05	-5.81	-5.38	50% התייעלות
82%	14.76	5.48	-1.19	-5.44	-8.31	-9.91	-11.09	-11.89	-11.19	-10.32	-10.22	התייעלות מלאה

◀ טבלה 22: הפרש עלויות ועלות שנתית של ייצור חשמל בשנת 2040, ללא מגבלת ייצור חשמל מרוח בים

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
אפס התייעלות	37.51	36.77	35.13	35.63	38.69	42.08	46.85	52.24	58.83	66.19	69.88
50% התייעלות	32.13	31.70	30.45	30.35	32.15	34.77	38.23	42.50	47.82	54.87	59.33
התייעלות מלאה	27.29	27.19	26.31	25.61	26.18	28.12	30.38	33.48	37.43	42.98	47.13

הפרש מול מצב 0/0

שיעור המתחדשות	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	RN point
אפס התייעלות	0.00	-0.74	-2.38	-1.88	1.19	4.58	9.34	14.73	21.32	28.69	32.37	36%
50% התייעלות	-5.38	-5.81	-7.05	-7.16	-5.36	-2.74	0.73	5.00	10.31	17.36	21.83	58%
התייעלות מלאה	-10.22	-10.32	-11.19	-11.89	-11.32	-9.38	-7.13	-4.02	-0.07	5.48	9.63	80%

◀ טבלה 23: הפרש עלויות ועלות שנתית של ייצור חשמל בשנת 2040, ללא מגבלת אגירת אנרגיה חשמלית

סיכום ומסקנות

בפרק זה הראינו, באמצעות הסימולציה, כי אפשר לבסס כמעט את כל אספקת החשמל בישראל על אנרגיות מתחדשות, זאת מתוך התחשבות בצרכי הרזרבה וב"בזבז" הנובע מכך שחלק מההספק המותקן מייצר חשמל אשר אינו נצרך. ממצאי האופטימיזציה מורים על כך שבמסגרת המגבלות שהונחו אי-אפשר להגיע ל-100% מתחדשות, אולם ביישום נרחב של התייעלות אנרגטית אפשר להגיע אף ל-95% (אם כי זה לא יהיה כלכלי). יכולת זו למלא את הביקוש מתאפשרת באמצעות תמהיל של טכנולוגיות לייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות, אשר במקובץ נותנות מענה לביקוש כמעט בכל שעה על פני השנה. הסימולציה נותנת מענה לסיכון שבתנאי מזג-אוויר שאינם מאפשרים ייצור משמש ומרוח (סיכוני ההיצע של האנרגיות המתחדשות), ונותנת מענה סביר גם לסיכונים של שיא ביקוש הסימולציה.

הניתוח הכלכלי אמור לתת תשובה לשאלה: מהי העלות של מהלך ייצור החשמל בכל אחת מהנקודות המבטאות קווי מדיניות ביחס להתייעלות וביחס לשיעור המתחדשות? תוצר לוואי הכרחי של שאלה זו הוא התמהיל האופטימלי של מקורות האנרגיה המתחדשת בכל נקודת מדיניות במטריצה. הפתרון לסוגיית העלות הכוללת ולסוגיית התמהיל האופטימלי ניתן סימולטנית באמצעות מודל האופטימיזציה שבנה לצורך המחקר והוסבר בפרקים קודמים.

סיכום הממצאים ביחס לעלויות

בנקודת הבסיס (ללא מתחדשות וללא מדיניות חיסכון בחשמל) העלות

הכוללת של ייצור 101TWh בשנת 2040 תהיה 37.5 מיליארד ש"ח, והעלות לקוט"ש נצרך (עבור רכיב הייצור) תהיה 0.37 ש"ח. העלויות מתחלקות ל-0.25 ש"ח עלויות ייצור ישירות ול-0.12 ש"ח עלויות חיצוניות של זיהום אוויר ופליטת גזי חממה.

בשלב הראשון של ההתקדמות בציר חדירת המתחדשות יש ירידה בעלות הכוללת (כי תוספת העלות הישירה של המתחדשות קטנה מהעלויות החיצוניות הנחסכות). לאחר מכן יש עלייה הולכת וגוברת בעלות למשק, כי הסימולציה "בוחרת" מקורות אנרגיה מתחדשת שהולכים ונעשים יקרים יותר. בנקודת הקיצון, הקרובה ל-100% מתחדשות (מצב אפשרי פיזיקלי, כאמור), העלויות הכוללות תהיינה גבוהות מאוד: 154 מיליארד ש"ח (1.53 ש"ח לקוט"ש) במדיניות שאין בה חיסכון אקטיבי, ו-83 מיליארד ש"ח במדיניות של מיצוי החיסכון (1.26 ש"ח לקוט"ש). ואולם חשוב לציין כי עיקר העלייה היא ב-15% האחרונים.

אם נוקטים מגבלה של אי-העלאת העלות ביחס לנקודת ה-0/0 (ללא חיסכון וללא מתחדשות), אזי אפשר להגדיר שני סוגים של קריטריונים לאיזון. האחד: איזון בסך העלות למשק, קרי לא מעבר ל-37.5 מיליארד ש"ח ב-2040; השני: איזון בעלות לקוט"ש נצרך. נשאל באיזה שיעור מתחדשות מושג האיזון ביחס לנקודת הבסיס. נקודת האיזון הראשונה (אי-העלאת סך העלות, כולל העלויות של מימוש החיסכון) היא פונקציה של שיעור החיסכון. ללא חיסכון והתייעלות נקודת האיזון היא ב-36% אנרגיות מתחדשות (קרי 36% מהחשמל יסופק ממתחדשות). במדיניות חיסכון בינונית (מיצוי מחצית מפוטנציאל החיסכון) האיזון למשק הוא ב-58% מתחדשות ללא הגדלת העלות הכוללת. במדיניות של מימוש

תרחישים נוספים: מחירי אנרגיה משתנים

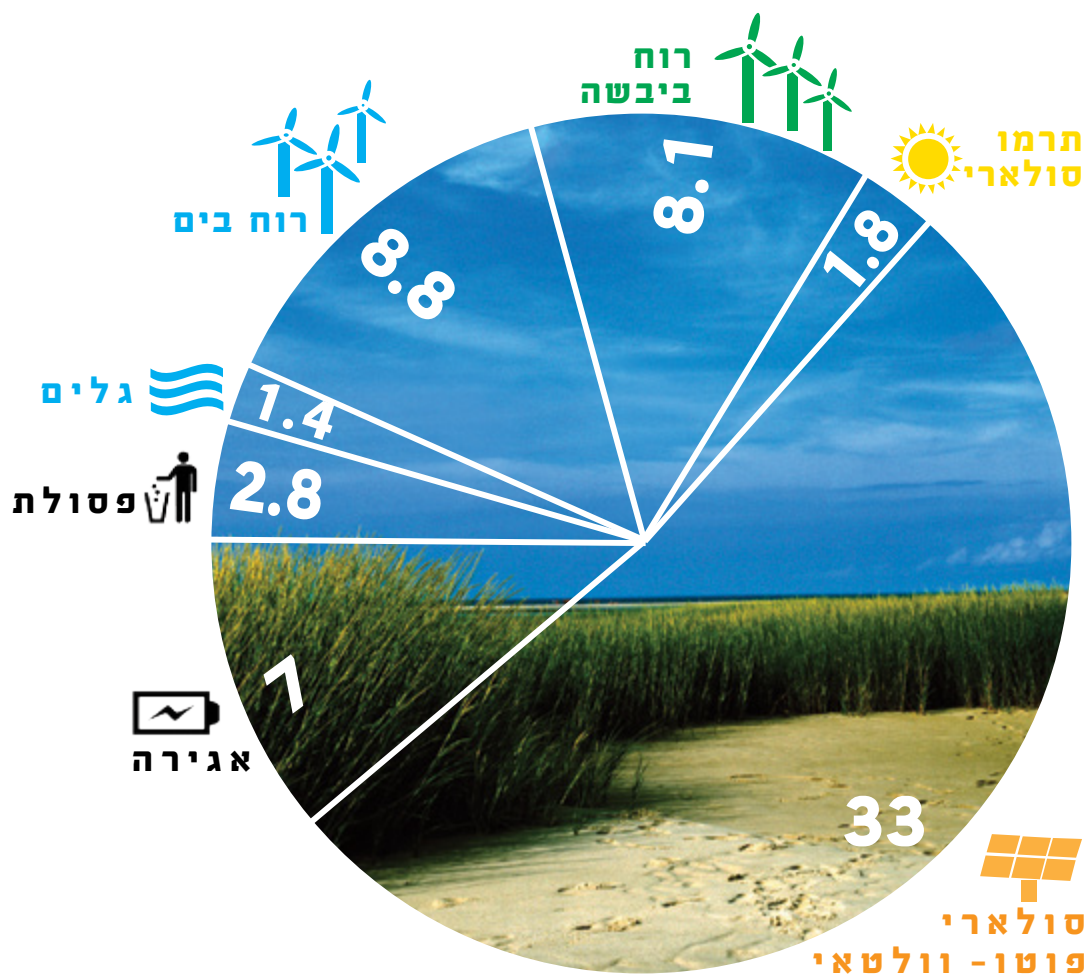
התוצאות הנ"ל מתייחסות למצב שבו אין שינוי בעלויות הדלקים של גז ופחם. אם נניח שמחיר הדלקים יהיה גבוה ב-25% ממחירם ב-2013 אזי נקודת האיזון של העלות הכוללת תנוע בכ-4% בהשוואה לכל מדיניות חיסקון (ולהפך במצב של ירידת מחירי דלקים). אם, נוסף לכך, ירדו עלויות ההון באנרגיות המתחדשות ב-20%, אזי נקודת האיזון תעלה בהתאם לגישות המדיניות לחיסקון (ללא, 50%, מלא) לרמות של 58% מתחדשות, 77% ו-90% (בהתאמה). הסרת המגבלה על ייצור מתחדשות מרוח מרחיקה את נקודות האיזון בעוד 2%.

תמהיל האנרגיות המתחדשות המתקבל בנקודה של מקסימום התייעלות ו-80% אנרגיות מתחדשות הוא כ-73% אנרגיה סולארית (מהם 21% תרמו סולארי והשאר פוטו־וולטאי), כ-23% אנרגיות רוח (מחציתה בים ומחציתה ביבשה, עם מעט תוספת מגלים) ועוד 4% מפסולת.

מלוא פוטנציאל החיסקון בחשמל נקודת האיזון היא בכ-80% מתחדשות. אלו הם שיעורים גבוהים בהרבה מהנחות תכנוניות ומעקרונות מדיניות המקובלים כיום.

מדד האיזון השני הוא מחמיר יותר ודורש שמירה על העלות לקוט"ש כך שלא תעלה על זו שבנקודת המוצא. מבחינת רכיב הייצור מדובר, כאמור, בעלות של 0.37 ש"ח/קוט"ש. עלות הייצור לקוט"ש נשארת פחות או יותר דומה (0.37 0.5 ש"ח/קוט"ש כולל עלויות חיצוניות) עד שיעור מתחדשות של 65%, ורק מעבר לכך היא נוסקת למחירים גבוהים בהרבה. זהו שיעור גבוה בהרבה בהשוואה להנחות המקובלות כיום, התוחמות את שיעור המתחדשות הישים לכ-20% בלבד מסך החשמל המסופק.

יתרונו של המדד הראשון בכך שהוא מאפשר להסב את פרות החיסקון להגדלת שיעור המתחדשות ובכך לתרום לקיימותו של משק האנרגיה בישראל בפרט ושל הכלכלה בכלל.



סיכום והמלצות עקרוניות

מצריכת החשמל לאֶקלום. אמצעים אלו יאפשרו לחסוך כ-7.3% מצריכת החשמל הכוללת בשנת 2040 (שהם כ-19.4% מפוטנציאל החיסכון הכולל). שינויים בהתנהגות הצרכנים יכולים לתרום כ-3.2% נוספים לחיסכון מצריכת החשמל הכוללת (כ-8.5% מהחיסכון).

בתחום ייצור חשמל ממקורות מתחדשים:

- ייצור חשמל באמצעות טורבינות רוח בים אל מול חופי ישראל נבדק באמצעות נתוני רוח מלוויינים. בניגוד לדעה הרווחת, ממצאי הרוח והעלויות כיום מורים כי הפקת חשמל מרוח בים יכולה להיות כלכלית. הפוטנציאל הוא גבוה מאוד, אולם עקב מורכבות הנושא וחוסר הבגרות של הטכנולוגיה הובאה בחשבון כמות מוגבלת יחסית של ייצור חשמל מרוח בים.
- ייצור חשמל מהשמש על גבי גגות בישראל: מצאנו כי ניצול הגגות בישראל (20% משטח הגגות למגורים, ו-60% משטח שאר הגגות), יאפשר להתקין על גגות מערכות סולאריות שיספקו בשנת 2040 16,700MW. כמות זאת תאפשר להגיע לכדי ייצור של 75% חשמל מאנרגיות מתחדשות, ללא צורך בהקמת מערכות על הקרקע.
- ייצור חשמל מהשמש על גבי קירות (BIPV): מצאנו כי ניצול הקירות בישראל (100% מהקירות הרלוונטיים במבנים חדשים, ו-10% מהקירות במבנים ישנים), יאפשר להתקין על קירות מערכות סולאריות שיספקו בשנת 2040 11,700MW, שייצרו כ-6TWh (שהם כ-9% מצריכת החשמל הצפויה בשנת 2040 בתרחיש של התייעלות מקסימלית).
- ייצור חשמל מפסולת: נמצא כי שימוש בכל הפסולת האורגנית בטכנולוגיה של עיכול אנאירובי (עבור פסולת עירונית רטובה, שפכים, ופרש בעלי חיים) וגזיפיקציה (עבור גזם ופסולת חקלאית יבשה) יאפשר בשנת 2040 להחליף תחנת כוח פוסילית בהספק של 320MW בלבד.
- פותח מודל אופטימיזציה ייחודי לחישוב מכלול המקורות המתחדשים בעלות מינימלית למשק – ובשמירה על איזון בין אספקת החשמל מהמקורות השונים לבין הצריכה השנתית. המודל

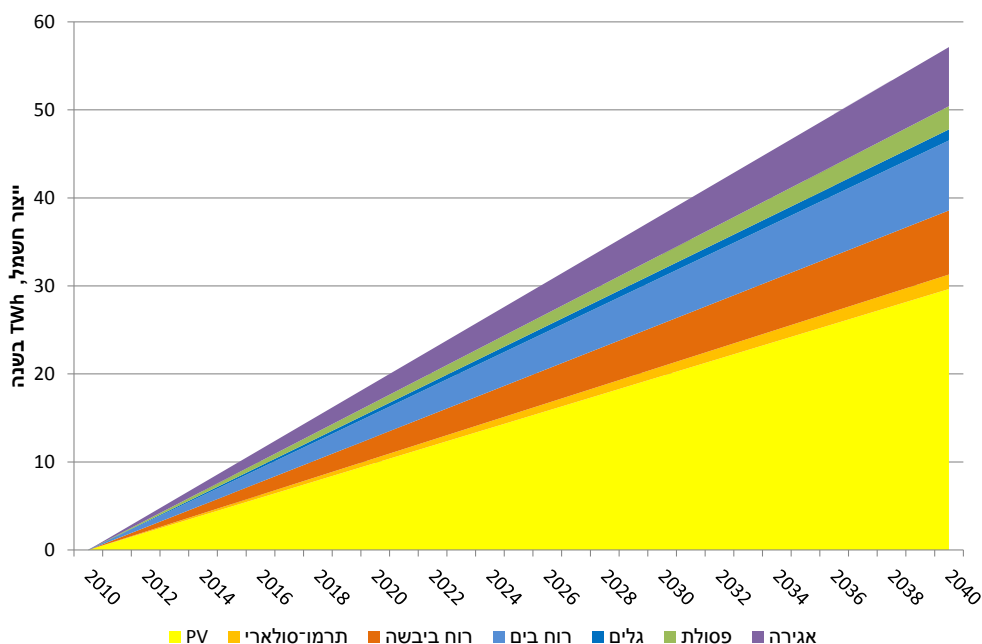
המסקנה העולה מתוצאות הסימולציה היא כי משק המבוסס על מקורות מתחדשים מסוגל לספק בטחון אנרגטי וכלכלי גבוהים יותר: ההשקעה מפוזרת על פני מגוון אפיקים, בין מספר רב של מקורות, ללא תלות בדלקים מיובאים ובגורמים גאו-פוליטיים. כשמביאים בחשבון את מוגבלותם של משאבי הגז הישראליים לאורך זמן, נראה כי ההשקעה במשק מבוסס מקורות מתחדשים היא המוצא היחיד מעתיד של מחסור באנרגיה.

במחקר זה בחנו את האפשרות לייצור 100% מהחשמל בישראל ממקורות מתחדשים. לשם מימושו המלא של פוטנציאל זה בעלות סבירה צריך לממש במלואו גם את פוטנציאל ההתייעלות האנרגטית. לשם כך בוצעו ניתוח עומק ותחשיבים בתחומים רבים, והעלו ממצאים מפתיעים. להלן סיכום הממצאים העיקריים העולים מן המחקר:

בתחום החיסכון וההתייעלות האנרגטית

- בתחום התייעלות הצריכה וחיסכון בחשמל: פוטנציאל ההתייעלות המקסימלית בצריכת החשמל בישראל בשנת 2040, בחישוב "מלמטה למעלה", בחלוקה מגזרית ועל פי שימושים עיקריים (אֶקלום, תאורה, חימום מים) מוערך ב-38%, או כ-1.6% בשנה.
- נמצא כי פוטנציאל ההתייעלות המקסימלית הוא בתחום האֶקלום במגזרים הביתי (פוטנציאל חיסכון של 5.5 מיליארד קוט"ש בשנה) והמסחרי/ציבורי (פוטנציאל חיסכון של 10.5 מיליארד קוט"ש בשנה).
- רכיבים חוסכי אנרגיה בבנייה ירוקה אשר יאפשרו להקטין כ-50%

קצב היישום הנדרש למקורות המתחדשים תפוקת אנרגיה שנתית



◀ תרשים 31: קצב היישום הנדרש עבור המקורות המתחדשים, בהנחה של יישום ליניארי עד לתמהיל המומלץ על ידי האופטימיזציה

על 80% מקורות מתחדשים מתואר בתרשים 31 ובתרשים 32 להלן.

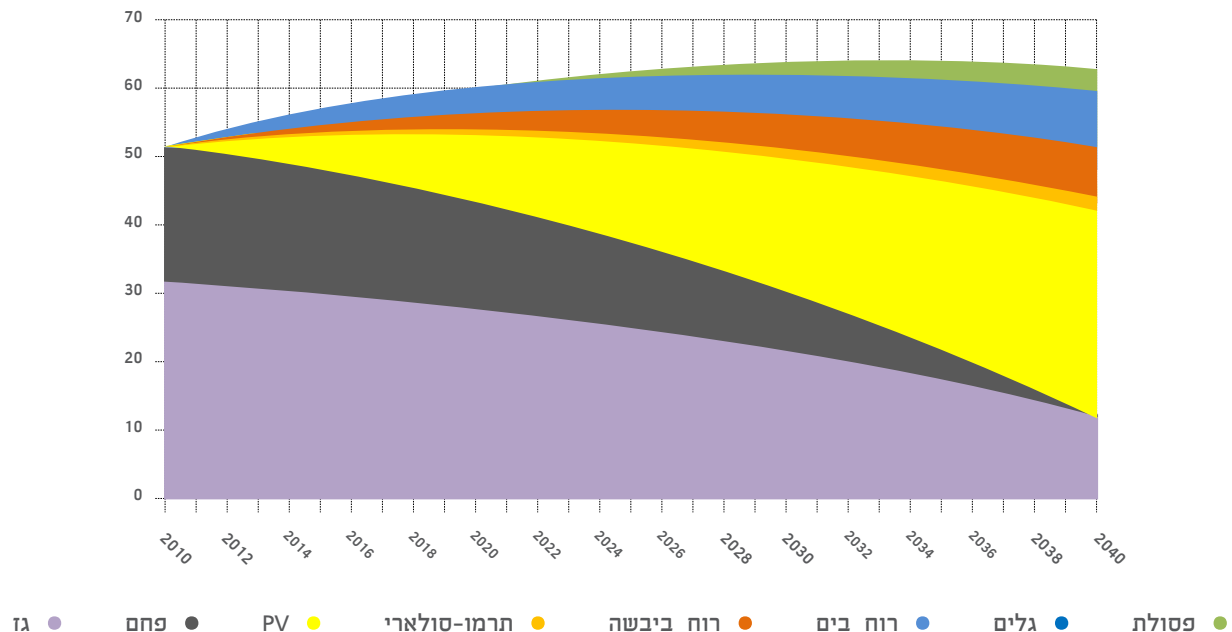
- נמצאו כמה טכנולוגיות קריטיות לניצול מרבי של מקורות מתחדשים במשק ולמענה לעקומת הביקוש בכל עת: אגירת אנרגיה, ניצול הרוח ביבשה ובים, וניהול ביקושי שיא. יש להשקיע כיום מאמץ מחקרי ויישומי בתחומים אלו בישראל, משום שכל התקדמות בתחומים אלו תאפשר חדירה גבוהה יותר של המקורות המתחדשים במשק, ובעלות נמוכה יותר.
- על פי הנחות הסימולציה, כאשר אין מביאים בחשבון את "ההון השקוע" במערכות הייצור הפוסיליות, נמצא כי בשלבי ההסבה הראשונים של האנרגיה הפוסילית למקורות מתחדשים העלות למשק יורדת. בהמשך העלויות חוזרות ועולות.

מכאן שיש נקודת איזון שבה עלות המשק הכולל מקורות מתחדשים משתווה לעלות הראשונית של משק בעל מקורות פוסיליים בלבד. בתרחיש ללא התייעלות נקודה זו תימצא כאשר 30% מהייצור יוסבו למקורות מתחדשים. בתרחיש שבו מיושמת במשק התייעלות מקסימלית, נקודה זו תימצא כאשר 80% מהייצור יוסבו למקורות מתחדשים.

מכליל את יכולת האגירה במשק, את הבזבוז הנובע מייצור יתר במקורות מתחדשים, את הבזבוז הנובע מאי־שימוש במערכות הייצור הפוסילי (המשמשות למילוי הפערים ביכולת הייצור ממקורות מתחדשים), ואת המגבלות הפיזיות שחלות על המקורות המתחדשים השונים.

- ממצאי האופטימיזציה מראים כי מבחינה טכנית אפשר לתת מענה לעקומת הביקוש לחשמל הצפויה בשנת 2040, וכי אפשר לעשות זאת בעלות כלכלית סבירה ולהגיע לשיעורים ניכרים של מקורות מתחדשים, הרבה מעבר ל־20% - 30% כפי שמניחים כיום.
- נמצא כי על פי ההנחות שבבסיס עבודה זו, אין אפשרות למלא את עקומת הביקוש ב-100% מקורות מתחדשים, אך אפשר להגיע עד כדי 90% ואף יותר (תלוי בתרחיש התייעלות במשק).
- בהנחה של התייעלות מקסימלית במשק החשמל, אפשר להגיע עד לכדי 80% מקורות מתחדשים, ללא תוספת עלות מעבר לתרחיש הבסיס (שהוא ללא התייעלות וללא מקורות מתחדשים). המעבר ממשק אנרגיה מבוסס מקורות פוסיליים למשק אנרגיה המבוסס

התפתחות הייצור ממקורות מתחדשים: ייצור אנרגיה שנתי



◀ תרשים 32: התפתחות ייצור האנרגיה ממקורות מתחדשים אל מול הקטנת הייצור ממקורות פוסיליים, על פי התמהיל המומלץ על ידי האופטימיזציה להשגת 80% מקורות מתחדשים בשנת 2040, ללא תוספת עלות אל מול תרחיש "עסקים כרגיל", ובהנחה של התייעלות מקסימלית

עם זאת, הגז הטבעי הוא דלק מעבר אידאלי מעידן מבוסס דלקים פוסיליים לעידן מבוסס מקורות מתחדשים. הגז הטבעי יאפשר את ביזור הייצור באמצעות טורבינות, מיקרו-טורבינות, ומערכות קורנרציה (תהליך הנמצא כיום בהתפתחות מואצת בעקבות פרישת מערך חלוקת הגז הטבעי ברחבי הארץ). השימוש בגז טבעי מאפשר תגובה מהירה לתנודתיות האופיינית למקורות המתחדשים, וכך יאפשר את פיתוח העקרונות והטכנולוגיות הדרושים לניהול רשת ייצור חשמל מבזר – תהליך חיוני לקראת משק מבוסס מקורות מתחדשים.

לקראת אפס פליטות פחמן בישראל: האם הדבר אפשרי?

מניתוח הסימולציה הפיזית ומהניתוח הכלכלי עולה התשובה לשאלת היעד המוגדרת בכותרת המחקר: האם ובאילו תנאים אפשר למזער את פליטות גזי החממה במשק החשמל של ישראל? התשובה לשאלה זו, כפי שעולה מן הסימולציה, היא שמבחינה תכנונית-פיזיקלית הדבר אפשרי, ברמות סיכון סבירות. גם אם לא מדובר ב-100% חשמל מאנרגיות מתחדשות, הרי

ללא התייעלות במשק אי-אפשר יהיה להגיע לשיעורים גבוהים של מקורות מתחדשים עקב עודף הון שקוע במערכות ייצור פוסיליות. לכן יש לבחון היטב כל השקעה פוסילית כיום, משום שבעתיד לא נהיה עוד במצב של גידול מתמיד בביקוש (כיום השקעה עודפת בייצור היא במקרה הגרוע הקדמה להשקעה עתידית). במשק שאין בו גידול מתמיד בביקוש, השקעה עודפת בכושר ייצור פוסילי מהווה השלכת כסף לטמיון, וגורת תמריץ שלילי להתייעלות ולהקמת מתקני ייצור ממקורות מתחדשים.

המסקנה העולה מתוצאות הסימולציה היא כי משק המבוסס על מקורות מתחדשים מסוגל לספק ביטחון אנרגטי וכלכלי גבוהים יותר: ההשקעה מפוזרת על פני כמה אפיקים, בין מספר רב של מקורות, ללא תלות בדלקים מיובאים ובגורמים גאופוליטיים.

כשמביאים בחשבון את מוגבלותם של משאבי הגז הישראליים, ואת הקושי לספק את הביקוש הגדל לאנרגיה בעולם, נראה כי ההשקעה במשק מבוסס מקורות מתחדשים היא המוצא היחיד מעתידי של מחסור באנרגיה, של הוצאות עתק על ייבוא דלקים, ושל אבדן התחרותיות של המשק הישראלי בשווקים הגלובליים.

שאפשר להגיע לשיעורים של 80% ללא תוספת עלות כלשהי למשק החשמל, ול-90% יותר בעלויות כלכליות סבירות.

מבחינה כלכלית חברתית תוצאה זו אפשרית (קרי ששך עלויות החשמל לא תעלינה) אם יתקיימו התנאים הללו:

1. מדיניות גישה תכנונית המשלבת את תחומי החיסכון בחשמל (ניהול הביקוש) ואת החדרת האנרגיות המתחדשות. כפי שהוסבר בפתחת העבודה, החיבור בין שני עקרונות המדיניות הללו הוא הכרחי, כדי למנוע מצב שבו הגישה התכנונית השואפת "להיות בצד הבטוח" תביא למצב תמידי של עודף תחנות כוח, כך שבשוליים חשמל פוסילי יהיה תמיד זול מזה שמקורו באנרגיה מתחדשת. כמו כן, שילוב זה מצמצם את הסיכון של היעדר מקורות גז או פחם או של עלייה דרמטית במחירים.
 2. המדיניות והעקרונות התכנוניים צריכים להפנים את שילוב ההתייעלות האנרגטית במשק והחדרת המקורות המתחדשים בתהליך תכנון משק החשמל, ולהציב להם יעדים גבוהים (אך ריאליים). זאת בשונה מהמדיניות הנוכחית, הרואה בניהול הביקוש ובצמצום פן שולי במשתני התכנון של משק החשמל.
 3. הפנמה של הערכים החיצוניים הקשורים בייצור חשמל פוסילי (זיהום אוויר ופליטת גזי חממה) במסגרת העלויות והתכנון הכלכלי.
 4. הסכמה ציבורית-חברתית כי פרות החיסכון וערכו הכלכלי יופנו להטמעת אנרגיה מתחדשת במשק החשמל, כך שהעלות הכוללת של משק החשמל לא תעלה על זו שבמצב "0/0" (ללא מדיניות חיסכון אקטיבית וללא אנרגיות מתחדשות).
- אם יתקיימו תנאים אלו אפשר יהיה להגיע לשיעור מתחדשות של 80% - 90% מהחשמל המסופק, ללא גידול בעלות הייצור הכוללת.

המלצות מבניות ותכנוניות

מומלץ לאמץ מדיניות כלכלית-חברתית-טכנולוגית חדשה למשק החשמל. מדיניות זו תכריז על שינוי מבני בעקרונות המדיניות התכנונית ותתייחס לכל התחום כאל משק סגור, שבו פרות החיסכון מופנים להגדלת שיעור המתחדשות.

המדיניות התכנונית אל לה להתבסס על חשבונות שוליים של כדאיות לטווח הקצר, שכן אלה יביאו להנצחת טכנולוגיות הייצור ומקורות האנרגיה הקיימים. נהפוך הוא: המדיניות הנוכחית צריכה להיגזר מהמצב הראוי בשנת יעד עתידית וממנו לגזור את המדיניות בהווה ובתקופה הקרובה ("קיפול לאחור").

ביסוסו של ייצור החשמל בישראל על שיעור גבוה של אנרגיות מתחדשות יאפשר הגדלה ניכרת של הביזור ברובד הייצור. שהרי אפשר לפצלו בין טכנולוגיות שונות ובין יזמים רבים, ונעדר ממנו יתרון הגודל המובנה בתחנות כוח של חשמל מדלקים פוסיליים. זאת ועוד, ייצור אנרגיה מבזר יכול להיות גורם מוביל לשימוש כפול בקרקע, למשל בהקמת תשתיות ייצור על גגות מבנים, אשר לו יתרונות סביבתיים.

מבין שני העקרונות המכוננים - התייעלות וחיסכון והטמעת אנרגיות מתחדשות - יש להעדיף בטווח הקצר את החיסכון ואת ניהול הביקוש, כיוון

שהם המנוע שיאפשר להפנות מקורות להפנמת האנרגיות המתחדשות ולהקטין את הצורך בהרחבת הייצור הפוסילי בטווח המידי.

בתחום זה יש להדגיש את החשיבות שיש לפעולה בטווח הקצר בתחומים שהשפעתם היא ארוכת טווח, דוגמת בניינים שאורך חייהם הוא עשרות ואף מאות שנים. מדיניות שתביא לצמצום צריכת האנרגיה בבניינים היא הכרחית באופן מידי. פעולה שלא תתבצע בשנים הקרובות תנציח בנייה בזבזנית מבחינה אנרגטית, ותקשה מאוד על השגת התייעלות בעתיד.

אשר למבנה משק האנרגיה, כפי שמוכיח גם הניסיון ממדינות אחרות, דווקא בתחום ההתייעלות יש חשיבות רבה לשינופי של חברת החשמל ביישום המדיניות. אפשר לנקוט גישה הרואה בניהול הביקוש ובהתייעלות "תחנת כוח וירטואלית". הספק צריך להיות מתמרץ ומתוגמל בהתאם לשיעור השפעתו על ירידת הצריכה. לספק יש יתרונות מובהקים בתחום זה: הוא "מכיר" כל אחד מהצרכנים, ויודע לפלח אותם לקבוצות הומוגניות מבחינת האמצעים המתאימים להניעם לחיסכון בחשמל. מכיוון שקשריו עם הצרכנים הם ארוכי טווח יש באפשרותו להגיע עמם להסדרים מימוניים שיפרסו על פני שנים אחדות. בהסדרים אלה הלוקחות מחזירים את מימון ההשקעה באמצעים טכנולוגיים להתייעלות אנרגטית מתוך החיסכון בהוצאות החשמל בהמשך.

כיום הממשלה נרתעת מלאפשר לחברת חשמל להיכנס לתחום ההתייעלות האנרגטית, משום שהדבר ירחיב, כביכול, את המונופול שלה. ואולם דווקא ביזור הייצור בשילוב עם הכנסת האנרגיות המתחדשות יכולים לצמצם חששות אלו ולאפשר כניסה מהירה של החברה לתחום התייעלות האנרגטית.

כמובן, למדיניות המומלצת תהיינה השלכות מרחיקות לכת על חברת החשמל, והיא תצטרך לאמץ אסטרטגיה חדשה. באסטרטגיה זו תישען חברת החשמל בעתיד הבינוני-רחוק על תחום ההולכה, החלוקה וההתייעלות האנרגטית, ואילו חלקה בייצור יקטן מאוד.

המלצות לקידום התרחיש המוצע

מחקר זה והמתווה המוצג בו אינם מכוונים ואינם מסוגלים להחליף את תכנית האב למשק האנרגיה, הנכתבת בימים אלה עבור משרד האנרגיה. אין בהיקף המשאבים שעמדו לרשותו לנסח תכנית חלופית מלאה ליישום המתווה המוצע בו. למימוש צריכים להיות שותפים גורמים רבים מאוד: הממשלה, גורמי התכנון והרגולציה, חברת החשמל, השחקנים השונים במשק החשמל (אחרי שיעבור רפורמה מבנית), צרכני החשמל הגדולים במשק, ואף הציבור הרחב ונכונותו להיענות לאתגר זה.

ההמלצה המרכזית העולה מן המחקר היא כי פיתוחו של משק חשמל ברקיימה הוא אפשרי וישים. כעת יש לרתום את כל הגורמים יחד כדי להביאו לידי מימוש: רצון פוליטי להוביל שינוי משמעותי, הסרת החסמים התכנוניים והכלכליים המונעים פיתוח אנרגיות מתחדשות לסוגיה, קידום משמעותי של התייעלות אנרגטית בכל מגזרי המשק, חובת עמידה בתקן בנייה ירוקה כבר בטווח הזמן המידי, ורתימת הציבור הרחב למהלכים מרחיקי לכת אלה כשותף אמיתי ולא כ"צרכן" בלבד.

הנספחים נמצאים בקובץ נפרד, להורדה מאתר הפרויקט: www.energia.org.il/ZCI

נספח א: בניית תחזית הביקוש לחשמל

נספח ב: חישוב ההתייעלות הצפויה במזגנים

נספח ג: חישוב ההתייעלות הצפויה בתאורה במשקי הבית

נספח ד: הערכת הפוטנציאל לחיסכון באנרגיה באמצעות בנייה ירוקה בישראל

נספח ה: סקירת פרויקטים ומחקרים על אודות ההשפעה על צריכת החשמל באמצעות שינוי התנהגות הצרכנים

נספח ו: הגדרות ומונחים בתחום אנרגיה מתחדשת ואנרגיה חלופית

נספח ז: תחשיב הפקת אנרגיה מתחדשת בים

נספח ח: הערכת פוטנציאל הפקת אנרגיה סולארית בטכנולוגיה פוטו-וולטאית בשימוש כפול

נספח ט: מתודולוגיית הערכת שטח קירות וגגות בשנת 2040

נספח י: הסימולציה להטמעת אנרגיה מתחדשת בהיקפים גדולים - הנחות ומקורות המידע

נספח יא: הסימולציה להטמעת אנרגיה מתחדשת בהיקפים גדולים - תוצרים נוספים

נספח יב: תוצאות הסימולציה בתרחיש 80% מקורות מתחדשים

- Abu Hamed, T., Flamm, H., & Azraq, M. (2012). Renewable Energy in the Palestinian Territories: Opportunities and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1082–1088.
- Australian Energy Market Operator. (2013). 100 Per Cent Renewables Study – Modelling Outcomes.
- Boot, P. A., & Van Bree, B. (2010). A zero-carbon European power system in 2050: proposals for a policy package.
- Delucchi, M. A., & Jacobson, M. Z. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*, 39, 1170–1190.
- Denby, R. (2009). *Zero Carbon Australia 2020 – Transition To Sustainable Housing*. Brunswick.
- Eicker, U. (2012). Solar Thermal or Photovoltaic Cooling? Presented in Intersolar Europe 2012.
- European Climate Foundation. (2010). *ROADMAP 2050 – A Practical Guide to a Prosperous, Low-Carbon Europe*.
- European Solar Thermal Technology Platform. (2009). *Solar Heating and Cooling for a Sustainable Energy Future in Europe*.
- Federal Planning Bureau. (2013). *Towards 100% Renewable Energy in Belgium by 2050*.
- Helweg-Larsen, T., & Bull, J. (2007). *Zero Carbon Britain – an Alternative Energy Strategy* (p. 105). Machynlleth.
- Hoste, G. R. G., Dvorak, M. J., & Jacobson, M. Z. (2009). Matching Hourly and Peak Demand by Combining Different Renewable Energy Sources. Retrieved from
- International Energy Agency. (2006). *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*. Paris.
- Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39, 1154–1169.
- Jacobson, M. Z., DeLucchi, M. A., Ingraffea, A. R., Howarth, R. W., Bazouin, G., Bridgeland, B., Burkart, K., et al. (2013). Evaluating the Technical and Economic Feasibility of Repowering California for all Purposes with Wind, Water, and Sunlight. *Energy Policy*, in review.
- Kemp, M. (2010). *Zero Carbon Britain 2030 – A New Energy Strategy – The second report of the Zero Carbon Britain project* (p. 368). Machynlleth,.
- Kempton, W., Tomic, J. (2005). Vehicle-to-Grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue. *Journal of Power Sources*, 144, 268–279.
- Libertia, L., Carillo, A., & Sanninob, G. (2013). Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy*, 50, 938–949.

- Oreskes, N. (2004). Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change. *Science* (New York, N.Y.), 306(5702), 1686.
- Peterson, T. C., Connolley, W. M., & Fleck, J. (2008). The Myth of the 1970s Global Cooling Scientific Consensus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(9), 1325-1337.
- Tidball, R., Bluestein, J., Rodriguez, N., & Knoke, S. (2010). Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. U.S Department of Energy. (2005). Energy Efficient Lighting Technology Options. Washington, DC.
- U.S Department of Energy. (2010). Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap. Washington, DC.
- U.S Department of Energy. (2012). Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products.
- U.S. Department of Energy. (2013). Best Practices – Clothes Washer Tips.
- U.S. Energy Information Administration. (2012). Annual Energy Outlook 2013.
- Wald, S. (2009). Future Israeli Energy Mix. Jerusalem.
- Weart, S. R. (2003). *The Discovery of Global Warming*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Wright, M., & Hearps, P. (2010). Zero Carbon Australia – Stationary Energy Plan (p. 171). Melbourne.
- Z.Jacobson, M., Howarth, R. W., Delucchi, M. A., Scobie, S. R., Barth, J. M., Dvorak, M. J., Klevze, M., et al. (2013). Examining the feasibility of converting New York State's all-purpose energy infrastructure to one using wind, water, and sunlight. *Energy Policy*, 57, 585-601.
- Zero Carbon Task Force. (2010). Road to zero carbon – Final report of the Zero Carbon Task Force (p. 80).

אבנימלך, י. (2000). חלופות להפחתת פליטות גזי חממה בישראל. חיפה.

גרוסמן, ג., איילון, א. וגולדרט, ט. (2008). השפעות בריאותיות וסביבתיות של השימוש בגז טבעי בישראל – מפגש מס' 10 של פורום האנרגיה של מוסד שמואל נאמן. חיפה.

גרוסמן, ג. וגולדרט, ט. (2011). ניצול אנרגיית הרוח בישראל – סיכום והמלצות דיון פורום האנרגיה של מוסד שמואל נאמן.

גרוסמן, ג. וגולדרט, ט. (2012). אנרגיית שמש לבנייני מגורים בישראל – מפגש מס' 24 של פורום האנרגיה של מוסד שמואל נאמן. חיפה.

גרינפיס. (2013). Energy [R]evolution, לקראת אנרגיה בת־קיימה בישראל.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. (2011). סקר הוצאות משק הבית 2011. ירושלים.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. (2012). שנתון סטטיסטי לישראל 2012. ירושלים.

המועצה הלאומית לכלכלה. (2013). הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות – המלצות הצוות הבינמשרדי. ירושלים.

המשרד להגנת הסביבה. (2013). עדכון ערכי העלויות החיצוניות של מזהמי האוויר וגזי חממה ל-2013.1.1. ירושלים.

חברת DHV MED בע"מ וקבוצת פארטו. (2012). שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל.

חברת החשמל. (2010a). דין וחשבון סטטיסטי של חברת חשמל לשנת 2010 (p. 68). חיפה: חברת החשמל לישראל.

חברת החשמל. (2010b). דין וחשבון סביבתי של חברת חשמל לשנת 2010. חיפה.

חברת החשמל. (2011a). דין וחשבון סטטיסטי של חברת חשמל לשנת 2011. חיפה.

חברת החשמל. (2011b). דוח תקופתי - חברת החשמל לישראל 2011. חיפה.

חברת החשמל. (2011c). תחזית ביקוש שעתית 2011-2030. חיפה.

חברת חפץ א' ושות' וחברת DHV MED בע"מ. (2009). פליטות גזי חממה בישראל - סקירת המצב הקיים ובחינת אמצעים להפחתה (p. 200). ירושלים.

חברת כיוון וחברת צנובר. (2012). פסולות חקלאיות בסיס נתונים וניתוח עלות תועלת של החוק המוצע.

חברת מקינזי ושות'. (2009). פוטנציאל הפחתת פליטות גזי חממה בישראל (p. 123).

זיאורו, א., שביב, ע. וקפלוטו, ג. (2010). כלי להערכת ביצועי בניינים בהתאם לקוד אנרגיה - גישה תפקודית. ירושלים.

מור, ע., סרוסי, ש. ואיינספן, מ. (2012). תחזית קיימות לישראל 2030. ירושלים.

משרד האוצר. (2011). תכנית פעולה לאומית להפחתת פליטות גזי חממה (p. 114). ירושלים.

משרד האנרגיה והמים. (2003). אטלס אנרגיית הרוח בישראל - הנגב והערבה. ירושלים.

משרד האנרגיה והמים. (2010a). התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית. ירושלים.

משרד האנרגיה והמים. (2010b). מדיניות משרד התשתיות הלאומיות לשילוב אנרגיות מתחדשות במערך ייצור החשמל בישראל. ירושלים.

משרד האנרגיה והמים. (2011). תוצאות מחקר אומדן עלות אי-אספקת חשמל צד הביקוש (p. 35). ירושלים.

משרד האנרגיה והמים. (2012). המלצות הוועדה הבינמשרדית לבחינת מדיניות הממשלה בנושא משק הגז הטבעי בישראל. ירושלים.

פרלמוטר, ד., אראל, א., מאיר, י., עצמון, י. ורופא, י. (2010). המדריך לבנייה ביו־אקלימית בישראל. ירושלים.

רודשטיין, י. (2007). תכנית אב למשק החשמל 2007-2030. ירושלים.

אנרגיה זולה וזמינה היא המשאב הבסיסי והחיוני ביותר לתפקוד החברה והכלכלה המודרניות ולביטחון הלאומי. אולם ספק אם יש תחום שבו הידע ותשומת הלב הציבוריים מצויים ביחס הפוך לחשיבותו כמו במשק זה. הפורום הישראלי לאנרגיה פועל מאז שנת 2007 להרחיב, להעמיק ולפתח את השיח הציבורי בתחום האנרגיה, במטרה לקדם משק אנרגיה ברקיימה לישראל. המחקר שלהלן הוא חלק חשוב ממאמץ זה.

משק האנרגיה של ישראל מצוי בעיצומה של מהפכה דרמטית, אשר תשנה לחלוטין את פניו בשנים הקרובות. במהפכה זו גלומים יתרונות גדולים עבור כל אחד ואחת מתושבי ישראל, אך מימושם מחייב חזון מוגדר וארוך טווח למשק זה. ההחלטות המתקבלות בימים אלו בשורה של נושאים הנוגעים למשק האנרגיה יעצבו את פניו לעשורים הבאים; אולם למצער, החלטות אלו מתקבלות לאורה של מדיניות ממשלתית שמרנית, שאינה הולמת את המציאות במשק האנרגיה העולמי והישראלי.

האם אכן אפשר להסב את משק האנרגיה של ישראל למשק מתקדם, שיבטיח לתושבי ישראל ביטחון אנרגטי ובתוך כך יצמצם את פליטות גזי החממה ואת זיהום הסביבה? האם אפשר לספק את הביקוש הגדל לאנרגיה בישראל ממקורות מתחדשים בני-קיימה? מהי העלות הכרוכה בכך? מטרתו של המחקר "לקראת אפס פליטות פחמן בישראל" היא לתת תשובות יסודיות ומעמיקות לשאלות אלו, ולהציב בפני הציבור ומקבלי ההחלטות חזון בר-מימוש למשק אנרגיה ברקיימה בישראל.

אודות הפורום הישראלי לאנרגיה

הפורום הישראלי לאנרגיה הינו ארגון לא ממשלתי ללא כוונת רווח, המקדם מדיניות אנרגיה בת קיימה בישראל. הפורום פועל באמצעות מחקר, קידום מדיניות ופעילות ציבורית מול מקבלי ההחלטות ובעלי העניין במשק האנרגיה. הפורום עוסק בהתייעלות אנרגטית, אנרגיה ממקורות מתחדשים, משק הגז הטבעי, משק החשמל בישראל ונושאים נוספים. הפורום מעודד שיח ושיתוף פעולה בין בעלי העניין השונים במשק האנרגיה. במועצה הציבורית של הפורום חברים מומחים, אנשי אקדמיה ואנשי מקצוע מובילים בתחום אנרגייה בת-קיימה ומשבר האקלים.



הפורום הישראלי לאנרגיה

פינסקר 21 תל אביב 6342113 | טלפון: 03-6224777 | פקס: 03-6855327 | www.energia.org.il