



מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

מפת דרכים למנהל עצמאי של מערכת החשמל לקראת 2040

מחקר עבור חברת נגה

פרופ' אופירה אילון, ד"ר אורנה רביב

פברואר, 2024

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחבר. ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד שמואל נאמן

תקציר

משק החשמל נמצא בתהליך שינוי מתמיד והוא יושפע בעשורים הקרובים בעיקר מהמדיניות העולמית והמקומית לאספקת חשמל אמינה ולהפחתת פליטות גזי החממה והמזהמים – הפוגעים בבריאות, במבנים, ביבולים חקלאיים ועוד. בכדי לעמוד ביעדים המדינתיים, ארגוני החשמל בכל מדינה כותבים תוכניות ליישום, שמתבססות על תמהיל עתידי של משק החשמל והאמצעים הנדרשים בכדי להגיע אליו. שינוי תמהיל ייצור החשמל בכל מדינה מתוכנן בהתאם למספר תרחישים המושפעים מהתחייבות בינלאומית של השלטון בתחום ההתמודדות עם שינויי אקלים ופליטות פחמן, וכן מהמאפיינים המקומיים של הביקוש לחשמל.

האמצעים ליישום המדיניות כוללים בעיקר מעבר להפקה של 30-100% מהספק החשמל ממקורות מתחדשים ונקיים מפליטות, כדוגמת שמש ורוח, הידרואלקטרי וגיאותרמי, לצד פיתוח וחדשנות בתחומי הפקת חשמל העתידיים, כדוגמת היתוך גרעיני (רצוי של מימן), אגירה, שימוש בבנק צרכנים כאמצעי לאיזון ושימוש במימן כאמצעי להובלת אנרגיה. ניתן להבחין בין מקורות החשמל גם באופן החיבור לרשת, כך שחשמל משמש ורוח הם בעלי תדר משתנה ומחברים לרשת באמצעות ממיר (inverter), בעוד כל השאר מחברים כמקור חשמל בעל תדר יציב. כמו כן, ניתן להוסיף מספר רב של מתקני שמש ורוח (בתלות ביעילות הייצור), בהשוואה למספר מצומצם של מתקנים מבוססי גז מחצבי, שעלות הקמתם יקרה ותלויה באספקת הגז. כל המתקנים תלויים גם בחומרי הבניין הקיימים בעולם כדוגמת מלט וברזל, סיליקון ונחושת, וכן בזמינות המשאבים הנוספים כדוגמת קרקע ומים.

עם זאת, המבנה של משק החשמל בשנת היעד שונה ממדינה למדינה ותלוי בעיקר בשיעורי ההפקה ובסוג של מתקני החשמל, בהווה ובעתיד. ברוב המדינות הספק החשמל צפוי להכפיל ולשלש את היקפו בשנת היעד, בהשוואה לקיים, עקב גידול באוכלוסייה וביקוש לחשמל, חישוב תהליכים בתעשייה ומעבר לתחבורה חשמלית. המעבר להפקת חשמל ממקורות מתחדשים ומבזרים מצמצמת מצד אחד את הצורך במקור אנרגיה מחצבי (פחם, גז ונפט), אך גם מציבה אתגרים רבים למנהל העצמאי של רשת החשמל (ISO – Independent System Operator).

האמצעים להבטחת אספקה אמינה של חשמל במחיר סביר, כוללים –

1. **הספק חשמל גמיש** – השוואת היצע החשמל לביקוש בכל שעה, גם בשעות השיא ובהספק משתנה של החשמל משמש ורוח, וכן ניהול העומסים בקווי ההולכה והאספקה.
2. **יציבות זרם החשמל** – שמירה על תדר, מתח ואינרציה בהתאם לדרישות רשת החשמל
3. **רציפות האספקה** – הימנעות מכשל במערכת והתאוששות מהירה במקרה של כשל, כדוגמת אירועי קיצון אקלימיים – שעוצרים את אספקת הדלק לתחנות ועלולים להפחית ייצור בטורבינות רוח או מתקן סולארי, מלחמות -שמסכנות מתקנים ומשנות את שרשראות האספקה, והשפעות של גלים אלקטרומגנטיים ומתקפות סייבר על רשתות החשמל והנתונים – שמשבשות מעבר של נתונים קריטיים לניהול מערכת החשמל. בנוסף, אירועי אקלים יכולים גם לשבש את מערכות ההולכה ולגרום לאובדן וכשל ברשת.
4. **הפחתת מחיר החשמל** – תפעול שוק תחרותי ואספקת חשמל באופן שמפחית עלויות לאורך זמן ומאפשר חישוב של המחיר לצרכן בהתאם לאופי השימוש ובאמצעות התקנת מונים, ציוד וטכנולוגיה מתקדמים לתפעול וניטור המערכת.

בעולם, מתבצע מחקר ונכתבות תוכניות במטרה לאפיין את רשת החשמל העתידית שתהיה מבוססת חשמל ממקורות מתחדשים ואת האופן המיטבי ליישם את השינוי במעבר מהמצב הקיים לעתידי.

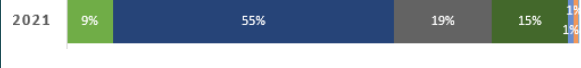
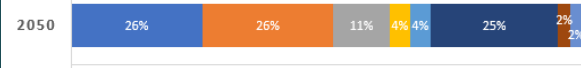
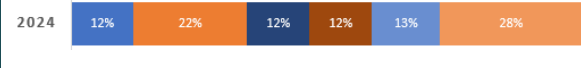
הפתרונות לאתגרים משתנים בכל מדינה בהתאם לגורמים רבים וביניהם:

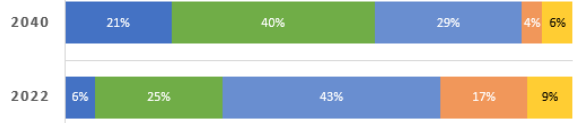
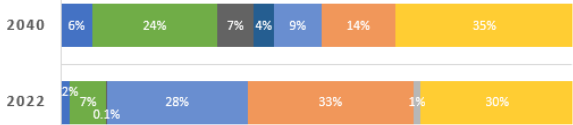
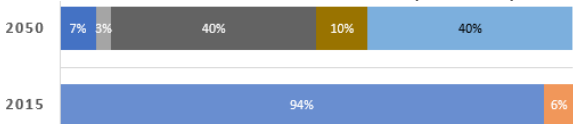
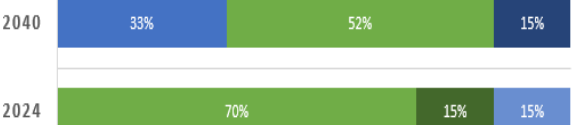
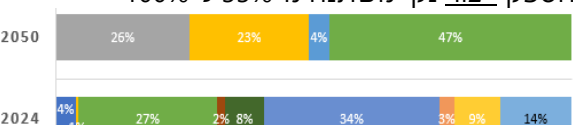
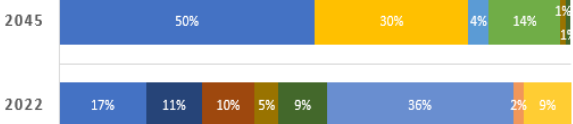
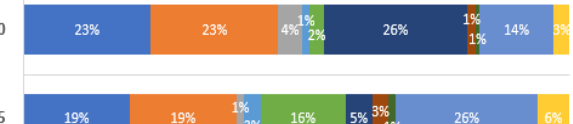
1. **תמהיל נוכחי להפקת חשמל** – שיעור מתחדשות בתמהיל קיים וניסיון שנצבר בניהול רשת גמישה,
2. **מאפיינים גיאוגרפיים** – המצאות משאב השמש/רוח או ביזור אוכלוסייה באי ללא אפשרות לחיבור חיצוני,
3. **דרישות מקומיות בתכנון קווי החשמל** ומתקני השונים – ייצור מבוזר וניהול מקומי של מיקרו-גרید, שימוש באגירה מרכזית או מבוזרת, וחיבור בין-אזורים לצרכי גיבוי הדדי.
4. **אופן חישוב מחיר החשמל** – שוק פעיל של היצע וביקוש או החלטה מרכזית,

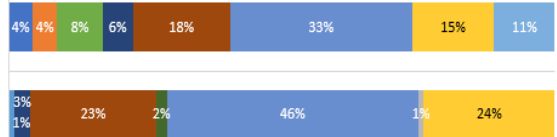
בדוח זה נסקרו תוכניות של שמונה-עשרה מדינות בעלי מאפיינים מגוונים, שהציגו את האתגרים וכן פתרונות משמעותיים. חלק מהתוכניות לשנת 2040 וחלקן לשנים 2045 או 2050, **שש מדינות הן אי** (גיאופיסי ולכן גם "אי-אנרגיה"), **וארבע מדינות מתמקדות בפיתוח חשמל משמש** (50% ב-2050) – אוסטרליה, הוואי, ניו-אינגלנד וקליפורניה.

טבלה 1 מפרטת את עיקר המאפיינים והאתגרים שתוארו בתוכניות שסקרנו, חלקן במדינות שהן אי-אנרגיה וחלקן לא. השמש מסמלת מדינות בהן חשמל סולארי (מתקן ו-PV) הוא מקור מרכזי (לפחות 40%) בהספק החשמל בשנת היעד.  פירוט כל התמהילים זמין בנספח 2.

טבלה 1: מאפייני רשת החשמל העתידית במדינות נבחרות (פירוט בנספח 2)

מדינה ושנת תחזית	מאפיין מרכזי של התוכנית	אופי רשת החשמל בשנת היעד
מדינות שהן אי-אנרגיה, ללא חיבור חיצוני		
ניו-זילנד (2050)	הבטחת אספקה גם בעת אירוע-קיצון אקלימי וכשל בחשמל הידרואלקטרי, חישוב עלות-תועלת של תרחישים	מבוזר, אגירה מרכזית וגם בכלי רכב, בתעשייה, ובמשקי-בית
אוסטרליה (2050)	מיקוד ברשת נתונים יעילה ובטוחה לאיסוף והעברת נתונים של ניטור; שוק חשמל תחרותי, דיווח פעמיים ביום ויותר, תלות חזקה ברשת הנתונים.	המלצה לעבור למבנה HUB ברשת הנתונים; מציאת פתרון לשעות שיא היא קריטית; מיקרוגרید וחשמל מ-PV לשימוש מאחורי המונה.
הוואי (2045)	בנויה משמונה איים גיאופיסיים חשיבות התועלת ליצרן-צרכן	מבוזר מאוד, גמיש, מבוסס על יצרנים-צרכנים, תלוי בזמינות קרקע! ובחדשנות טכנולוגית
הספק ייצור נקי משתנה מ-10% ל-95% הספק נקי מ-59% ל-98%, שמש מ-34% ל-51% הספק ייצור נקי מ-32% ל-100%, שמש מ-4% ל-51%		
2050		
2021		
2050		
2024		
2045		
2022		

הספק ייצור נקי משתנה מ-31% ל-61% 	מיקרו-גרید בכל מחוז, גידול בשיעור שמש ורוח לצד דלק מחצבי, שדרוג קווים ראשיים בין 16 המחוזות	חיבור בין-מחוזות לגיבוי פנימי הדדי (סוג של אי, 90% מהמדינה בניהול (ERCOT)	טקסס (2040)
הספק ייצור נקי משתנה מ-9% ל-42% 	מבוצר עם יותר מיקרו-גריד, שילוב מימן, אגירה ומתחדשות, שוקלים חיבור לאי אנרגיה משותף עם סין ויפן	חיבור השינוי במשק החשמל עם פיתוח תעשייה נדרשת בתחום האנרגיה, ייצור מימן והפחתת פליטות	דרום קוריאה (2040)
הספק ייצור נקי משתנה מ-0% ל-60-80% 	מימן וסולארי מגובה באגירה, נבדק יבוא חשמל ומוכנות לשילוב גאותרמי והיתוך גרעיני	עיר-מדינה צפופה, הנחות יסוד עקב אי וודאות טכנולוגית, וחיבור לשכנות בעתיד	סינגפור (2050)
מדינות בעלות חיבור קווי-חשמל חיצוניים למדינות שכנות			
2050: הספק ייצור נקי משתנה מ-60% ל-100% 2030: 42.5% מתחדשות (בשאיפה 45%)	מתחדשות מגובות ברשת מימן להעברת ואגירת אנרגיה, לשימוש בתעשייה ובבניינים	שיתופי פעולה, אחידות וגיבוי הדדי ברשת החשמל והמימן בכל אירופה	אירופה (2050)
הספק ייצור נקי משתנה מ-70% ל-100% 	תמהיל מקורות גמיש וזמינות תשתיות לניהול גמיש; משק מבוצר ומגובה בקישור דו-כיווני; תכנון מתקני ביוזג באזורי עומס ברשת	אמינות האספקה ע"י חיבור דו-צדדי בין-אזורי ועם תפעול מהיר של ביקוש-היצע, שווקי חשמל מגוונים לגיבוי והוזלת עלויות	דנמרק (2040)
הספק ייצור נקי משתנה מ-33% ל-100% 	ביזור מבוסס מתחדשות, אגירה, מימן, חיבור בין-אזורי, מימן כתחליף דלק בתחנות גז מחצבי.	אמינות והפחתת עלויות עד לאפס פליטות, ייצוב הרשת ע"י תפעול גמיש ומהיר של צרכנים ויצרנים זמינים	אנגליה (2050)
הספק ייצור נקי 60% לפחות הגידול בהספק מבוסס על חשמל משמש ורוח וחיבור בין אזורי לגיבוי	חיבור בין אזורי, שוק תחרותי בין יצרנים בכל אזור הגנה מפני מתקפות אלקטרומגנטיות וסייבר	הפחתת עלויות חשמל – עיקר העלות ביישום התוכניות עד 2035, המחיר והעלות החיצונית ירדו בהדרגה	ארה"ב (2050)
הספק ייצור נקי מ-43% ל-100%, שמש מ-17% ל-50% 	גמישות – יצרן וצרכן מגוונים, שדרוג קווי הולכה כל עשור, גידול פי-10 באגירה יחסית ל-2023, צפוי גידול בגרעין ובמימן	מזג אוויר ים-תיכוני תגובה מהירה לשינויים בביקוש בזמן אמת; אספקת חשמל אמינה וזולה שאיפה להיות עצמאית	קליפורניה (2045)
הספק ייצור נקי מ-67% ל-83%, שמש מ-39% ל-47% 	הפחתת שעות השיא, תיעדוף יישום פתרונות לאתגרים שברשת, שדרוג מתמשך ברשת ההולכה וההשנאה, חשיבות מיקום מתקנים והספק שנאים	שיתוף משאבים ותוכנית רב-מדינתית, תרחישים של הוספת קווי-הולכה מרכזיים בהשוואה לחיבור לאי-אנרגיה ביים, ובהשוואה למזעור ההוספה של קווי הולכה	ניו-אינגלנד (2050)

הספק ייצור נקי משתנה מ-27% ל-41% 	תרחישים לתמהיל קיים משולב עם עדכון מתחדשות על פי חוזים עתידיים ותרחישי ביקוש-שיא	כיום רוב המתחדשות באזור אחד, שאיפה לתמהיל טכנולוגי בכל אזור וחיבור לשכנות, אגירה מעטה - כי לא תצליח לאזן כשל ארוך	ניו-יורק (2040)
---	---	---	------------------------

הפתרונות לאתגרים בעולם, בהתאם לאופי המשתנים המקומיים, כוללים מספר גישות שברובן מתבססות על **תכנון שוק עתידי שונה במהות ובתוכן מהקיים** – מבוסס חשמל ממקור ממחדש, שוק חשמל בעל זמינות גמישה של משאבים רבים, מגוונים ומבוזרים, שמנוהלים באופן אוטומטי – באמצעות רשת-חשמל מסועפת וחכמה, ניטור ותכנון תמידי להתאמת היצע החשמל לביקוש ושמירה על התדר והאינרציה. ניהול רשת-החשמל מתבסס על רשת נתונים שמהווה אמצעי קריטי למעבר נתונים שהכרחי לגמישות התפעול של המקורות המבוזרים והצרכנים המגוונים. רוב הפתרונות משפיעים על מספר אתגרים וביחד הם משרטטים את מאפייני ואתגרי רשת העתיד, כמפורט בטבלה 2.

טבלה 2: האתגרים והפתרונות המוצעים בעולם לניהול רשת חשמל עתידית

פתרון אתגר	ביזור מתקני החשמל	תמהיל מתקנים מגוון <u>גמיש וזמין</u>	אגירה	חיבור קווי חשמל ומימן בין אזורים	מכשור מתקדם ברשת
הספק לפי ביקוש, כולל בשעות שיא	הפחתת שיא ביקוש כללי בעזרת איזון בין-אזורי; טיפול מקומי בשיא ועודף	גמישות וגיוון בזמינות ובמקור האנרגיה שמושפע משוק עולמי	איזון זמין בשעת מחסור, חלק מהמתקנים של ISO וחלק של צרכנים	גיבוי הדדי בין-אזורי בחוסר או עודף הספק יותר קוויים	ניטור, איסוף נתונים לאורך זמן, והבנת נקודות כשל
איזון תדר ומתח	מקורות מתחדשים מבוזרים יוצרים תדר משתנה, ניתן לאזן ברמה המקומית	תמהיל מקורות רבים וזמינים לשימוש מידי באיזון פערי הספק ותדר, מתח ואינרציה	מספקת מקור חשמל יציב ומאזנת.	מסייע לאיזון התדר והמתח (דנמרק). פיתוח רשת מימן לשימוש מהיר בתעשייה	נדרש רכש ציוד, ללא תלות בשיעור המתחדשות
אמינות ורציפות אספקה	כשל מקומי ולא מערכתי, פחות סיכון בהשוואה למקור אחד מרכזי	אפשרות לפתרון מהיר בעת כשל	פתרון בעיות זמניות בקווי הולכה וגיבוי לעת כשל	גיבוי הדדי בין אזורים	ניטור והתראה
ניהול מחיר החשמל	יאפשר שוק חשמל פעיל, תחרות, שיא צריכה נמוך ומחיר נמוך	הפחתה בעלויות הון ותשתיות חירום ולכן גם במחיר החשמל	הפחתה של עלות שעות שיא ולכן את המחיר	הפחתת עלות שעות שיא, עלות קוויים זניחה למתקנים	שימוש במונים חכמים ידייק את החיוב לפי שעה וצרכן
סיכון מתקפת סייבר או גל-אלקטרומגנטי	ניתן לבדוד אזורים נפגעים בשימוש ב-microgrid	ניתן לבדוד תשתיות ולהפעיל חלופות	מאפשרת התאוששות מהירה	חיבור מגדיל סיכון להשפעה נרחבת, אך מיקרוגריד מסייע בבידוד	מגדיל פגיעות וסיכון
סיכון עקב אירועי אקלים	ניתן לבדוד אזורים בעת שרפה ולספק חשמל מאזור שכן	פגיעה חלקית באזור הסיכון, לא בכל הרשת	גיבוי למתקן שנפגע בעת כשל	הטמנת קוויים תקטין סיכון מאירועי קיצון	ניטור ואיתור כשל מידי יקטין נזק

בישראל, המאפיינים המקומיים יכתיבו את התיעדוף של הפתרונות לאתגרים על פי חשיבותם ומידת התאמתם למצב בישראל. מבחינת המאפיינים השונים

1. גיאוגרפית – ישראל התברכה במשאב השמש, מירב הצרכנים נמצא במרכז כאשר מירב ייצור החשמל ממקור מתחדש נמצא בפריפריה, וכן ישראל נחשבת לאי רק מבחינה גיאוגרפית, ולכן ייתכן ומצב זה יושפע מתהליכים פוליטיים (חיבור לקפריסין, לדוגמה)
2. תמהיל הפקת החשמל כולל כרגע שיעור קטן של מתחדשות ונדרש תכנון המעבר לבניית רשת גמישה שבה שיעור ניכר מהפקת החשמל הוא ממקור מתחדש
3. מחיר החשמל נקבע באופן מרכזי ולא בתהליכי שוק חופשי ופעיל ולכן קשה להפחית עלויות
4. קיים ביזור חלקי של קווי ומתקני החשמל וייתכן ניהול-אזורי של רשתות עצמאיות בנגב ובגולן – שם מיוצר רוב החשמל ממקור מתחדש. כמו כן, בישראל עדיין לא קיימות חוות רוח בים ומשק המימן רק בתחילת דרכו – לכן נדרשת חשיבה לגבי אופי רשת החשמל העתידית והדרך ליצור מגוון גמיש ואמין של אמצעי ייצור ואיזון תדר בהתאם למשאבים והמאפיינים המקומיים.

בחינת מהלך התכנון המומלץ לישראל מתבסס על הניסיון בעולם בשילוב עם הניסיון בישראל, והוא מתמקד בשלבים הבאים –

1. איסוף נתונים לגבי הביקוש להספק, מאפיינים גיאוגרפיים שמהווים חסם (קרקע) או הזדמנות (שמש כמשאב), צפי לשינוי בביקוש, טכנולוגיות כדאיות בישראל להפקת חשמל (מלבד שמש) ומתודולוגיות לניהול הרשת ומחיר החשמל (חלקן נסקרו במחקר זה, טבלה 2)
2. הבנת התרחישים המרכזיים על פי המשתנים בתמהיל – טכנולוגית וגיאוגרפית (ביזור ומיקרוגריד), העלות והתועלת בכל שינוי – כולל עלויות חיצוניות-סביבתיות ועלויות קווי הולכה ואספקה, וכן הסיכונים עקב אקלים ורעידות אדמה, סייבר ודופק-אלקטרומגנטי, טרור ועוד.
3. הבנת האפשרויות לניהול האתגרים והפתרונות – איך לנהל חוסר מידע, איך לייצב תדר ומתח ואיך להתאושש מכשל במערכת במסגרת שוק גמיש ומגוון (דוגמאות רבות במחקר זה).
4. הרצת מודל אופטימיזציה מרובד המורכב במשולב משלושת הגורמים הנ"ל – נתוני הספק-ביקוש, סיכונים ועלות וכן ניהול המערכת הגמישה וההומוגנית על פי תמונת המערכת העתידית.

איסוף הנתונים והיישום בהתחשב במטרות המשולבות הכרחי להצלחת השינוי וחשוב שישולב בעבודה של כל הגורמים במשק החשמל בטווח המיידי.

בהתאם לאיסוף הנתונים מהעולם ושלבי התכנון הנדרשים, ההמלצות לצעדים הבאים בישראל כוללות את השלבים הבאים (בסוגריים מוזכרות מדינות כדוגמה) –

1. תכנון הרשת העתידית –
 - החלטה על תמונת משק חשמל עתידית מבוססת מתחדשות ויישומה באמצעות תכנון משולב מטרות, עלויות וסיכונים (כפי שתואר בפרק 3), שמספקים פתרונות לחסמים מקומיים בתרחישי המידול.
 - תמונת הרשת העתידית חשוב שתהיה מבוססת על תמהיל מגוון טכנולוגית, רשת דינאמית וגמישה עם מגוון מתקני יצרן-צרכן זמינים להפעלה לאיזון תדר והספק, גיבוי הדדי בין רשתות מיקרוגריד אזוריות, חיבור לרשתות ביוגז או מימן כגיבוי ולהשלמת חוסרים באנרגיה בתעשייה

ובתחבורה, וניטור חכם בכל הרשת – מונים חכמים אצל הצרכן, ניטור וחיזוי כשלים חכם במתקני הרשת, ועוד

2. הפחתת עלויות –

- הפחתת הביקוש בשעות השיא הוא האמצעי המרכזי וניתן להשיגו בעזרת ביזור ותמהיל גמיש.
- שקלול עלויות חיצוניות במחיר החשמל וקבלת החלטות על תמהיל על פי יעילות הייצור ועלויות סביבתיות בכל תרחיש, בהתאם למתודולוגיה האחידה שפרסם משרד האנרגיה לכדאיות כלכלית של פרויקט [1], במטרה לצמצם את העלות הסביבתית-בריאותית שנכפית על הציבור.
- סיכונים וכשלים מייצרים עלויות בתפעול – ניתוח ההשפעה של כל סיכון על הרשת הוא הכרחי לזיהוי הפתרונות ולשילובם בתרחישים וביישום בשנת היעד

3. רגולציה ותמיכה –

- מיצוי ההזדמנויות ברפורמה בחשמל – עידוד התקנת מונה חכם בכל בית וניהול מבוזר של יצרנים-צרכנים, בשת"פ עם משרד התחבורה והמעבר לכר כשמלי וטעינה, משרד התעשיה וחשמול תהליכים וכן משרד להגנת הסביבה והפחתת הפליטות (הוואי, אירלנד).
- רגולציה לעידוד שילוב שימושי קרקע וחדשנות לפיתוח טכנולוגיות יעילות שמצמצמות את היקף הקרקע הנדרש להפקת קוט"ש חשמל ומגוונות את תמהיל הייצור בכל אזור (הוואי, דרום קוריא)ה
- החלת חוק מס-פחמן ושימוש בכסף לשדרוג רשת החשמל וקידום רשת מבוססת מיקרוגרדי - כמנוף להפחתת שיא הביקוש, מזעור כשלים במערכת וניהול ביקושים מבוזר (דנמרק ואנגליה בפרט)
- יישום הדרגתי של השיפורים ברשת החשמל והחלה הדרגתית של עלויות הרפורמה במחיר החשמל – תעודף שלבי יישום ועלותם על פי רמת ההשפעה על כלל הצרכנים (ניו-זילנד), בהבנה שהעשור הקרוב משמעותי מבחינת עלויות ואחר כך תתכן ירידה (אנגליה, ארה"ב).

4. אמינות אספקה –

- הטמנת קווי חשמל שחשופים לפגיעה - יש לבצע מחקר כמותי להערכת פגיעות קווי ההולכה לשינויי אקלים (טמפרטורות, שריפות, הצפות וכד) ולהעריך את העלויות והתועלות הכוללות של הטמנת קווים (הוואי, קליפורניה).
- מינוי גוף שמפקח על שילוב תוכניות של גורמים שונים במשק החשמל ויישומן - שינויים בהחלטות ובזמני ביצוע של תוכניות מקבילות שיש להן השפעה על תוכנית משק החשמל - כדוגמת התקנת אמצעי ייצור מגוונים בכל אזור ויישום תוכניות רוחביות בקווי ההולכה והאספקה (אוסטרליה, קליפורניה)
- טיפול מקומי בביקוש ובכשלים וחיבור בין-אזורי לגיבוי - מיקום יצרנים וצרכנים מגוונים בכל אזור ושימוש במיקרו-גרדי לניהול מקומי של כל אזור, להפחתת התעבורה בקווי ההולכה המרכזיים וחיבור בין אזורי בעיקר לצרכי גיבוי הדדי (אוסטרליה, ניו-אינגלנד, טקסס, דנמרק, אנגליה, ניו-יורק)
- איזון הספק ותדר באמצעים מגוונים מלבד אגירה - גיבוי ברשת מימן, ביוגז ופסולת וניהול דינאמי של חלופות זמינות (אנגליה, דנמרק)

שקלול הנתונים שנאספו והמסקנות יבטיח תהליך תכנון מבוסס נתונים וממוקד בתמונה העתידית, ובהתאם לשקלול הסיכונים והעלויות - יאפשר במהלך השנים הקרובות את הבניה ההדרגתית של תמונת משק החשמל בשנת היעד .

תוכן העניינים

3	.....	תקציר
12	.....	מבוא
13	.....	1. חברות לניהול עצמאי של מערכת החשמל
14	.....	2. מטרות ואתגרים בתוכניות ISO בעולם
15	.....	2.1 אוקיאניה
15	.....	2.1.1 ניו-זילנד (NZ)
17	.....	2.1.2 אוסטרליה
21	.....	2.2 אירופה
22	.....	2.2.1 דנמרק
24	.....	2.2.2 אנגליה
26	.....	2.2.1 אירלנד
27	.....	2.2.2 מדינות נוספות
27	.....	2.3 ארצות הברית של אמריקה
29	.....	2.3.1 הוואי
32	.....	2.3.2 קליפורניה
34	.....	2.3.3 טקסס
35	.....	2.3.4 ניו-יורק
37	.....	2.3.5 ניו-אינגלנד (NE)
39	.....	2.4 אסיה ואפריקה
39	.....	2.4.1 דרום קוריאה
41	.....	2.4.2 סינגפור
42	.....	2.4.3 מדינות נוספות
43	.....	3. השלכות על התכנון בישראל
44	.....	3.1 הכנות לגיבוש תוכנית
45	.....	3.2 תרחישים נפוצים בתכנון
47	.....	3.3 תמהיל טכנולוגי גמיש
48	.....	3.4 אמינות אספקה וניהול סיכונים
51	.....	3.5 שיטות ניהול הרשת
52	.....	3.6 תיאום ופיקוח על יישום תוכניות בין ארגונים
53	.....	3.7 המלצות לתכנון משק החשמל העתידי בישראל
60	.....	נספח 1 - מערכת החשמל בישראל
63	.....	נספח 2 - תמהילים בעולם

רשימת קיצורים

חח"י חברת חשמל לישראל
פד"ח פחמן דו חמצני

aFFR CM	Automatic Fast Frequency Reserve Capacity Market
DSR	Demand side response
DEFER	Dispatchable emission free resources
ESS	Energy Storage System
E2G	Electrical vehicle to grid
FCR	Frequency containment reserves
H2G	Green Hydrogen (H ₂)
ISO	Independent System Operator
LCOE	Levelized cost of energy
LNG	Liquified Natural Gas
VPP	Virtual Power Plants

רשימת טבלאות

טבלה 1:	מאפייני רשת החשמל העתידית במדינות נבחרות (פירוט בנספח 2)	4
טבלה 2:	האתגרים והפתרונות המוצעים בעולם לניהול רשת חשמל עתידית	6
טבלה 3:	מספר השנאים העמוסים בשעות השיא לפני ואחרי שדרוג רשת החשמל	38
טבלה 4:	עלויות בסיס של רכיבים שונים לשדרוג רשת החשמל	39
טבלה 5:	אתגרים ושילוב פתרונות בתכנון לשנת 2040 – מידע מהעולם שרלוונטי לישראל	43
טבלה 6:	יעדי משרד האנרגיה והתחבורה לשנת 2050 בתחום החשמל והתחבורה	60
טבלה 5:	תמהיל ייצור החשמל במדינות שהן אי-אנרגיה בשנת הבסיס	63
טבלה 6:	תמהיל ייצור החשמל במדינות שמחוברות לאחרות בשנת הבסיס ובשנת היעד	65

רשימת איורים

- איור 1: התלויות ההדדיות בין התוכנית לאספקת חשמל סדירה ושאר התוכניות במשק בניו זילנד... 15
- איור 2: האינרציה ברשת החשמל בהתאם לגורמי הייצור השונים... 17
- איור 3: תחזית להטמעת מתחדשות ואגירה בתוכנית ל-2050 באוסטרליה... 18
- איור 4: גורמים המעורבים בתפעול משק החשמל באוסטרליה (DSO הוא מנהל המערכת) ... 19
- איור 5: התייעלות באופן העברת המידע בין הגורמים השונים ברשת החשמל באוסטרליה... 20
- איור 6: האמצעים לטיפול בתדר המשתנה בדנמרק... 23
- איור 7: שילוב מתקני ביוגז באזורים עם רשת עמוסה להפחתת עומסים... 24
- איור 8: הצפי למקורות חשמל ב-2050 בשוק הגמיש באנגליה... 25
- איור 9: עלות המעבר לאפס פליטות עם שדרוג מקורות האנרגיה ורשת החשמל בארה"ב... 28
- איור 10: התאמת היצע לביקוש בתלות בזמינות קרקע באי הוואי בשנים 2030, 2035 ו-2045... 30
- איור 11: שינוי בתמהיל הכולל בהוואי לאיפוס פליטות ב-2045... 31
- איור 12: תמהיל הספק מותקן מתחדשות ואגירה בקליפורניה לקראת 2045... 33
- איור 13: מחוזות רשת החשמל בטקסס, בהן שודרגו הקווים האדומים וישודרגו האחרים בהמשך... 35
- איור 14: כיסי האנרגיה במדינת ניו-יורק, מרכיבי השדרוג, הסיכון וההזדמנות... 36
- איור 15: מיפוי השינוי בהספק בין תרחיש הבסיס לתרחיש המתחדשות... 36
- איור 16: תמהיל הפקת החשמל הצפוי ואופן ההתמודדות עם שעות שיא ב-NE-ISO... 37
- איור 17: תחזית הייצור בשני ימים של שיא ושפל בייצור חשמל ממקור מתחדש בשנת 2050 ב-NE... 38
- איור 18: המערכת המשולבת של חשמל ממתחדשות ואגירה, אנרגיה (גז/מימן) ותחבורה נקיה... 40
- איור 19: סופר גריד בצפון מזרח אסיה, לחבר את קוריאה לשכנותיה... 41
- איור 20: עלויות הפקת חשמל מטכנולוגיות מרכזיות בעשורים הקרובים (LCOE)... 46
- איור 21: איומים וחסמים מרכזיים לפיתוח רשת החשמל... 48
- איור 22: תכנון רשת משולב ניהול סיכונים... 50
- איור 23: תמהיל ייצור החשמל במדינות שהן **אי-אנרגיה** בשנת הבסיס ובשנת היעד... 64
- איור 24: תמהיל ייצור החשמל **במדינות שמחוברות** לאחרות בשנת הבסיס ובשנת היעד... 66

מבוא

הדרך שבה מייצרים, מספקים, ומשתמשים בחשמל הינה בעלת השפעות נרחבות על הכלכלה, החברה והסביבה, ברמה הלאומית וברמה המקומית. אספקת חשמל בטוחה, אמינה ובמחיר סביר הינה עורק חיים חיוני לתושבי המדינה, לעסקים ולתעשייה שבה. בעולם עד 2040 צפוי מעבר לייצור חשמל "נקי" – למזער פליטות ולהפחית עלויות ייצור. משום כך, תפקידו של מנהל המערכת הוא קריטי באספקת השירות באופן רציף, אמין ובעלות סבירה.

הטכנולוגיות שניתן יהיה באמצעותן לייצר חשמל ולהפחית פליטות בשנת 2050, בהשוואה לשנת 2024, כוללות הפקת חשמל ממשאב מתחדש – כדוגמת שמש ורוח, הידרואלקטרי וגיאותרמי, ובעתיד גם היתוך גרעיני של מימן¹, או חשמל ממקור מחצבי – כדוגמת גז מחצבי, שמחליף מתקני פחם ונפט. ניתן להבחין בין מקור משתנה למקור יציב באופן החיבור לרשת, כך שחשמל משמש ורוח הם בעלי תדר משתנה ומחוברים לרשת באמצעות ממיר (inverter), בעוד כל השאר מחוברים כמקור חשמל בעל תדר יציב. כמו כן, ניתן להוסיף מתקני שמש ורוח במספר כמעט אינסופי (בתלות ביעילות הייצור), בהשוואה לשאר המקורות המתכלים שתלויים במשאב ולכן גם במספר התשתיות שניתן להקים. כל המתקנים תלויים גם בחומרי הבניין הקיימים בעולם כדוגמת מלט וברזל, סיליקון ונחושת, וכן בזמינות המשאבים הנוספים כדוגמת קרקע ומים. כמו כן, קיימת אי וודאות לגבי 15% מהטכנולוגיות שנמצאות בשלבי פיתוח לקראת השימוש בהן בשנת 2030, ולגבי 45% מהטכנולוגיות שבפיתוח לקראת שנת 2050 [2].

עם זאת, אופן ייצור ואספקת החשמל משתנה תדיר עקב השפעות מקומיות וגלובליות. לדוגמה, מבחינה מקומית ועקב ייצור החשמל משמש ורוח, קיים ביזור וריבוי של מקורות החשמל שמחייב הטמעה של שינויים טכנולוגיים לייצוב רציפות הזרם והתדר לצד שדרוג קווי ההולכה. מבחינה עולמית, מחיר החשמל מושפע מתנודות במחיר מקורות האנרגיה המחצבית ומס הפחמן המושת במדינות רבות וכן קיימים סיכונים הנוגעים לשינויי האקלים והשפעתם על מתקני האספקה המבוזרים עקב עליית פני הים, גלי חום, שרפות, הצפות ואירועי קיצון אחרים.

בנוסף, קיימות השפעות בצד הביקוש לחשמל, עקב שינוי בתהליכי ייצור בתעשייה ובכלי התחבורה המתחשמלים, המרת טכנולוגיות מיושנות בחדשות ושימוש מוגבר בטכנולוגיות מידע ושירותים אחרים שמגדילים את השונויות בביקוש. שימוש מוגבר בחשמל מעלה גם את הסיכון לעלויות במתח, להפסקות חשמל, ולהעלאת עומסי שיא, אשר מעמידים את תשתיות החשמל בסיכון של הפרעה מערכתית, ועלולים להביא לשיבושים בעסקים ובמסחר, ובשירותי הרפואה והתחבורה.

בעולם קיימים מנהלי מערכות חשמל רבים בעלי ניסיון בהתמודדות עם שינויים אלה ובעלי תוכנית סדורה ומסגרת תפעולית, שנדרשות כהכנה לניהול של מערכת חשמל עצמאית בעשורים הקרובים.

מחקר זה סוקר את התוכניות הקיימות במדינות שונות בעולם לשינוי ושדרוג מערכות החשמל לשנת 2040, בוחן מה בתוכניות מתאים לישראל ומה ניתן ליישם בטווח הקצר והארוך. מטרת המחקר היא לספק מידע למנהל המערכת בישראל, חברת נגה, לגבי חידושים, איומים והזדמנויות למערכות החשמל,

¹ קיימים דוחות של ISO שמתייחסים רק לשמש ורוח כמקור מתחדש, בעוד מקור גיאותרמי, הידרואלקטרי והיתוך גרעיני של מימן נקראים מקורות אנרגיה **נקיים**, אך לא מתחדשים עקב ההספק המוגבל שלהם. בדו"ח זה נצמד להגדרה של IEA ולפיו כולם נחשבים מקורות מתחדשים [3].

לנוכח שינויים שצפויים בעשורים הקרובים. המחקר בוחן את התאמת ושימויות הממצאים לישראל ואת החלופות האפשריות לניהול מיטבי של מערכת החשמל בישראל.

העבודה כוללת סקירת ספרות נרחבת למיפוי התוכניות הקיימות למערכות חשמל בעולם – שינויים טכנולוגיים במתקני הייצור, האגירה, האספקה והביקוש לחשמל במגזרים השונים (מגורים, מסחר, תעשייה) ודרכי התמודדות עם השפעות שונות – הן בצד הביקוש והן בצד ההיצע. בנוסף, נאסף מידע להשלמת פערים ולסיכום הממצאים באופן ששופך אור על פוטנציאל היישום של פתרונות שונים להתמודדות עם האתגרים ולזיהוי הזדמנויות לחיזוק העמידות של מערכת החשמל בישראל.

תוצרי המחקר יסייעו לחברת נגה בתהליכי קבלת החלטות בנושא מדיניות להטמעת פתרונות ולהיערכות של מערכות החשמל לאתגרים בשנים הבאות.

1. חברות לניהול עצמאי של מערכת החשמל

בעולם קיימים מנהלי מערכות חשמל רבים בעלי ידע וניסיון בתפעול ותכנון הגידול של רשת החשמל בהתחשב בשינויים הצפויים באוכלוסייה, במשק ובטכנולוגיה, ובהתאם לתקנים ולמסגרות התפעוליות שנדרשות לקראת העשורים הקרובים.

חברות לניהול מערכת חשמל עצמאית (ISO – Independent System Operation) הן יחידה עצמאית ומוסדרת, המתאמת את תפעול רשת החשמל האזורית כדי להבטיח גישה אמינה לרשת החשמל. החשיבות של חברות ה-ISO היא קריטית, הן עקב החשיבות העולמית באספקת מוצר בסיסי לצרכנים, על פי הגדרת המטרות של האו"ם לפיתוח בר קיימא [4], והן עקב התלות בחשמל של שירותים חיוניים אחרים, כדוגמת אספקת מים [5].

התוכנית של כל מנהל מערכת תלויה בכמה גורמים ובעיקר ב- (1) מצב משק החשמל בשנת הפקת הדו"ח – לדוגמא % חשמל ממתחדשות או אופן ההחלטה על מחיר החשמל בהתאם להיצע וביקוש, (2) אופן חלוקת תחומי האחריות בין הגורמים השונים במשק החשמל – לדוגמא, קיום רשות נפרדת לניהול קווי ההולכה או לניהול מחירי החשמל בזמן אמת, וכן (3) קיום מנהלי רשת אזוריים במדינה בה קיימות כמה רשתות משנה כחלק מרשת החשמל הכללית.

כך לדוגמא, חברות ISO בארה"ב נוצרו בעקבות החלטות מספר 888 ו-889 של הוועדה הפדרלית לתחום האנרגיה (FERC), כדי לעודד שיתוף פעולה בין כל הגורמים הנוגעים לאספקת חשמל, כולל תחנות כוח שאינן בבעלות חברות החשמל האזוריות. חברות ISO אינן המפעילות היחידות של קווי ההולכה בארה"ב. ישנם גם ארגונים לתפעול אזורי (RTO – Regional transmission operators) המבצעים באופן כללי את אותן משימות כמו ISO, אך עם סמכות על שטח גאוגרפי גדול יותר [6]. שיתוף הפעולה ביניהן מתבסס על סטנדרטים אחידים ושיתוף ידע.

באירופה יש כ-40 חברות לניהול מערכת חשמל שותפות בארגון גג בשם (ENTSO-E European Transmission System Operators). כל חברת TSO מספקת גישה לרשת החשמל לגורמים השונים בשוק החשמל, וביניהם חברות יצור, סוחרים, ספקים, מפיצים ולקוחות המחוברים לרשת החשמל [7]. חברות דומות קיימות גם באוסטרליה ובמדינות מפותחות אחרות בעולם [8].

קיימים גורמים רבים שמשפיעים על רשת החשמל ולכן ההיערכות לקראת ניהול המערכת בשנים הבאות דורשת תכנון דקדקני, שלוקח בחשבון את המצב הקיים ואת התחזית לעתיד, בהתחשב בהשפעות האפשריות על הרשת והדרכים להתמודד עם השפעות אלה.

כך לדוגמא, בניו-אינגלנד בארה"ב, בה יש שלג ברוב האזור למשך מחצית מהשנה, נבחנו תוכניות לניהול מערכת החשמל בשנת 2050 במיקוד על העמידות התרמית של קווי ההולכה בשעות העומס בביקוש, בהתחשב בשינויים הצפויים עד שנת 2050 ובהתאם לדרישות מנהל המערכת העצמאית המקומית [9].

בדוגמא אחרת, הרשת האירופאית לתפעול מערכת החשמל (ENTSO-E) פרסמה את התוכנית שלה לניהול מערכת החשמל בשנים 2030 ו-2040 [10]. לממצאיהם, רשת החשמל האירופאית משתנה בקצב מהיר ונדרשות הכנות לקראת שנת 2040 לאבטחת זרימת זמינות החשמל בכל מקום בו הוא נדרש, ובהתחשב במטרות להפחתת פליטות מזהמים וגזי חממה. לשם כך יידרש גידול של כ-40% בקווי ההולכה בשנים 2025-2030 וגידול נוסף של 80% נוספים עד 2040.

בקליפורניה, בה תנאי האקלים דומים לישראל, נערכה לראשונה ב-2022 תכנית לעשרים שנים לניהול המערכת ושדרוגה [11]. התוכנית מתמקדת במעבר לאנרגיה ממקורות מתחדשים ותדרוש השקעה גדולה בתשתיות, למימון מתקני ייצור החשמל המבוזרים, אגירה וקווי הולכה מבוזרים. עקב השינוי המהותי נדרשת תוכנית לטווח הארוך, מעבר לעשור, ולכן התוכנית היא לשנת 2045 ונעשית בשיתוף פעולה עם ארגוני אנרגיה ממשלתיים ותשתיות מקומיות, כדי להסתמך על המידע העדכני ביותר. גם בתוכנית של קליפורניה המיקוד הוא בהשפעה של המעבר למתחדשות על הצורך באגירה ובשדרוג קווי ההולכה.

עם זאת, כל ISO מתאים את האתגרים שלו למצב מערכת החשמל עליה הוא מופקד וליעדים המקומיים של שוק האנרגיה, לאור התחזיות העולמיות. לכן, פרק שכולל את המטרות ובתחזיות של מערכת החשמל בישראל נוסף כנספח. הפרק הבא סוקר אתגרים ופתרונות מתאימים במערכות דומות בעולם, ולאחריו ייבחנו אתגרים בישראל והיכולת להפיק תועלת מהנעשה בעולם.

2. מטרות ואתגרים בתוכניות ISO בעולם

הגדרת התפקידים בארגונים האחראיים לתפעול העצמאי של רשת החשמל בכל מדינה או אזור, תלויים מאוד באופי השטח עליו אחראי הארגון, אופי הסחר בחשמל והגדרת מחירו ושיעור החשמל ממקורות מתחדשים שיש בתמהיל להפקת חשמל בכל אזור. כך למשל, באוסטרליה, בה מירב האוכלוסייה מרוכזת סביב מספר ערי חוף, חולקו תחומי האחריות בין מנהלי רשת אזוריים. כך גם בארה"ב ובאירופה בתחום כל מדינה ובתוכניות שמחברות בין מדינות בהתאם לקרבה גיאוגרפית ושיתוף מטרות ומשאבים.

בהתאם לכך גם חלוקת התפקידים בין הגורמים השונים האחראיים על התחום משתנה, ובפרט הגדרת תפקידו של מנהל המערכת. כשהאזור קטן ומהווה אי-אנרגיה, רוב הסמכויות יהיו בידי גורם אחד, אך באזור נרחב ורשת חשמל מבוזרת, יהיו כמה גורמים שכל אחד אחראי על חלק אחר בתפעול הרשת. כך למשל באוסטרליה, רשות אחת אחראית על הסחר בחשמל וקביעת ההיצע, הביקוש והמחיר, רשות אחרת אחראית על קווי ההולכה ותחזוקתם ושלישית אחראית על תפעול כולל של כל משק החשמל, בהתאם ליעדי המדיניות ובהפעלת רגולציה בהתאם. המצב דומה בקליפורניה. ככלל, ביזור הרשויות עולה בהתאם לביזור הגיאוגרפי של ייצרני וצרכני החשמל.

הסקירה להלן מפרטת את האתגרים והמנועים השונים בכל אזור ומדינה, בשילוב מידע מהגורמים השונים העוסקים במלאכה, ולאחר מכן תתמקד באתגרים המתאימים בישראל ובהמלצות לטפל בהם.

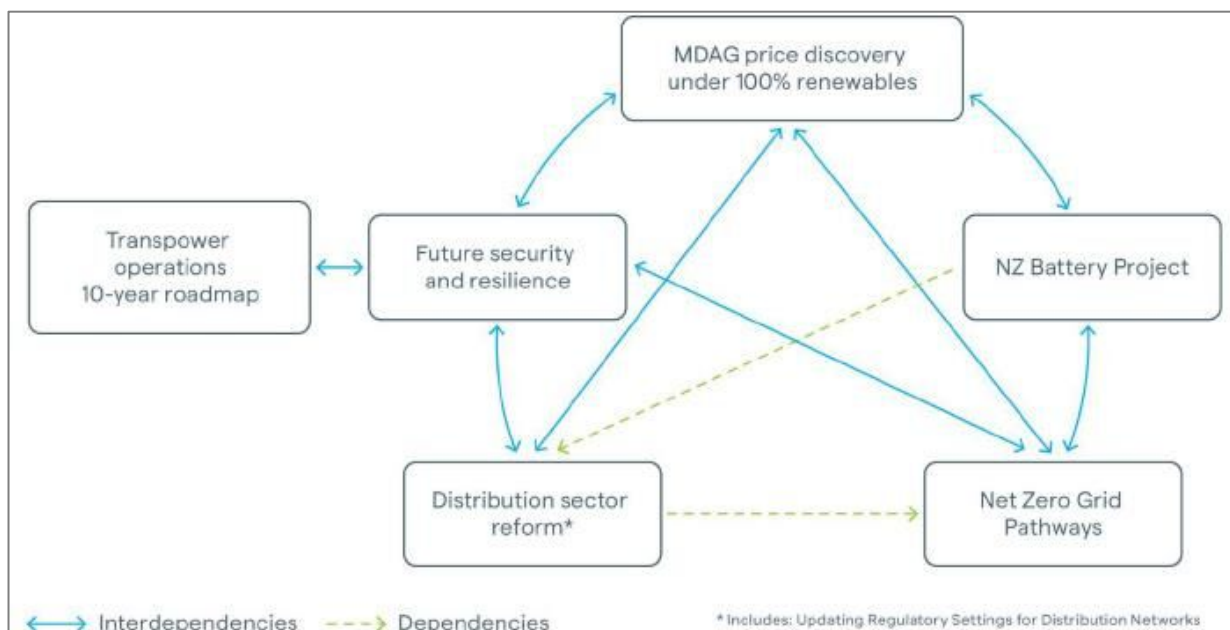
2.1 אוקיאניה

אוקיאניה כוללת מספר מדינות, שכל אחת מהן היא "אי-אנרגיה", ללא יצוא ויבוא של חשמל לצורך גיבוי הדדי.

2.1.1 ניו-זילנד (NZ)

בניו-זילנד, שמהווה אי מבחינת אספקת חשמל, הביקוש לחשמל בשנת 2050 צפוי כמעט להכפיל את עצמו, בהשוואה לשנת 2021. כיום האספקה של החשמל (כ-48,000 GWH) מתבססת בעיקר על חשמל הידרואלקטרי 55% וגיאותרמי 19%, לצד גז מחצבי 9%, דיזל ופחם 12% ואנרגיה מרוח 7%. התחזית ל-2050 תכלול גידול משמעותי בעיקר באנרגיית רוח ומעט בסולארי, לצד הפחתה קלה של הייצור מגז מחצבי, ותתבסס על 46%-רוח, 33%-הידרו, 13%-גיאותרמי, 5%-גז ו-4%-סולארי [12]. מבחינת אופי האספקה, ב-2050 כמחצית מהאספקה תהיה ממקור מתחדש (מסומנת כאספקה שמחוברת לרשת באמצעות ממיר – Inverter, בניגוד למקור יציב), בהשוואה לכ-10% בשנת 2021.

תוכנית ההכנה לשנת 2050 מתמקדת באבטחת אספקה סדירה של חשמל (Security and resilience) ומפרטת את התלויות ההדדיות בתוכניות אחרות (איור 1), שייתכן ויביאו לעדכון התוכנית בעתיד. התוכנית התבססה על מחקרים מקומיים ולמידה מתוכניות במדינות אחרות שהן אי – כדוגמת אוסטרליה, הוואי וסינגפור, אנגליה ואירלנד.



איור 1: התלויות ההדדיות בין התוכנית לאספקת חשמל סדירה ושאר התוכניות במשק בניו זילנד מקור: [12]

זאת, לאור השינויים הצפויים במדיניות להפחתת פליטות ובטכנולוגיות (זמינות ומחיר) לאספקת החשמל – עם המעבר למשק מבוסס מקורות מתחדשים ואגירת חשמל, בתחבורה - עם 90% מכלי הרכב שיתבססו על טעינה חשמלית חכמה, ובתעשייה - עם 50% מתהליכי החימום שיתבצעו באמצעות חשמל.

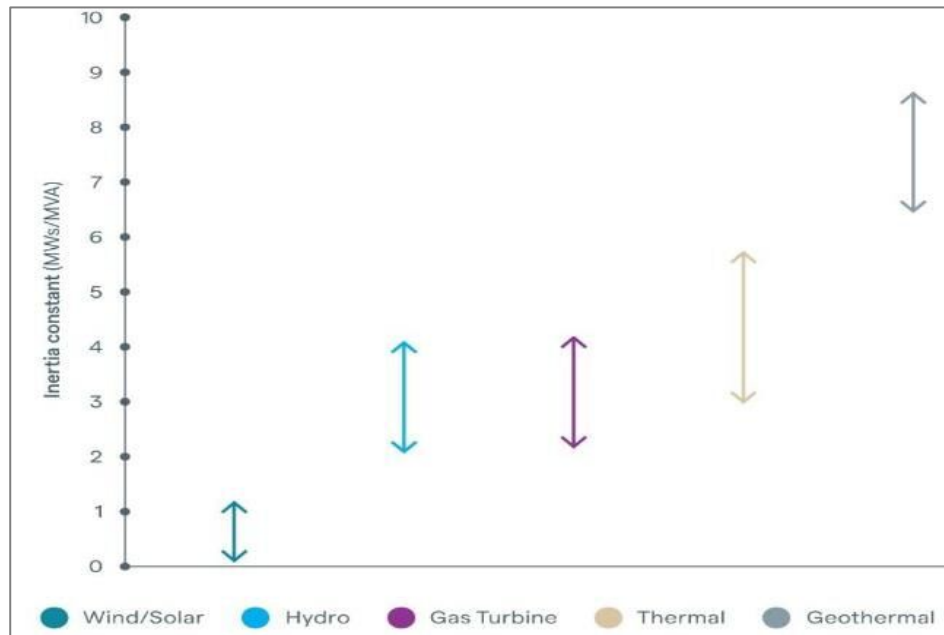
ההזדמנויות למשק החשמל, על פי מחקרים של רשות החשמל ב-NZ, הן [13] –

1. הפחתה בעלויות לתשתיות הייצור, ההולכה והחלוקה של החשמל, הודות להורדת הפער בין היצע לביקוש בשעות השיא.
2. שימוש בטכנולוגיות חדשות להתמודדות עם השינויים ברשת – פתרונות אגירה (בכלי רכב, בתעשייה ובמשקי הבית) צפויים לשמש מאגר חשמל שימתן את השפעת המתחדשות על התדר, המתח והאינרציה (system inertia). אמנם המערכת ככלל פחות יציבה, אך אמצעי האגירה ניתנים להפעלה מהירה יותר בעת אירוע (בהשוואה לאמצעים קונבנציונאליים). כמו כן, סינון ההרמוניות ברשת החשמל דורש מימון לצידוד בכל חלופה ואין השפעה מיוחדת על העלויות עקב הגידול בשיעור הייצור של חשמל ממקור מתחדש. התדר במצב יציב הוא 49.8-50.2 הרץ, 48-52 הרץ בכל מקרה של אירוע ברשת, ו-47-52 הרץ בזמן התאוששות מאירוע ברשת (באי הצפוני, בהשוואה ל-45-55 הרץ באי הדרומי, הגדול יותר).
3. הפחתת הסיכון לאספקת חשמל עקב שנים עם מיעוט משקעים, שנובע מההסתמכות על הפקת חשמל הידרואלקטרי.
4. התועלת מהגדלת שיעור המתחדשות ומעבר למשק מבוסס עולה על העלות וכוללת הן את התועלת ליצרני החשמל והן את התועלת לצרכנים. התועלת לצרכן עקב שילוב מתחדשות במשק החשמל נובעת מהפחתת הסיכון להפרעות באספקה הודות לגיבוי ההדדי שמספקים הגורמים השונים שמחוברים לרשת החשמל, וכן הודות לשימוש ביישומים חכמים לניהול השימוש בחשמל. ההערכה היא שהתועלת לצרכן מגיעה לגבה של כשני שליש מגבה התועלת ליצרן החשמל.

בהתאם להזדמנויות קיימים גם **אתגרים**, וביניהם [12] –

1. העלייה בביזור ובשיעור חשמל ממקור מתחדש – תשפיע על היכולת לאזן את התדר, המתח והאינרציה (איור 2) ברשת החשמל ותדרוש ניטור וטיפול במתקנים רבים שמחוברים לרשת (בהשוואה לייצור שאינו מבוסס).
2. ניהול השינוי בתמהיל ייצור החשמל – האמצעים לאיזון הספק הייצור ממקור מתחדש, שמשתנה בהתאם לזמינות הרוח והשמש; התפעול של רשת פחות יציבה מהרגיל ואופן ההכלה של שינויים עתידיים במסגרת הדרישות הטכניות של רשת החשמל.
3. אתגרים אחרים – איבוד שליטה עקב מתקפת סייבר על רשת הנתונים והמכשור החכם ברשת החשמל, התיאום בין מספר הולך וגדל של נקודות התחברות לרשת, וכן הרחבת הכישורים הנדרשים בצוותי העבודה.

תיעדוף הפתרונות: החשיבות הגבוהה ביותר וזמן הפתרון המהיר ביותר (עד 3 שנים) ניתן לאתגרים של הכללת השינויים בהתאם לדרישות המערכת, התיאום בין נקודות חיבור רבות והכשרת כוח העבודה. חשיבות בינונית (זמן טיפול של עד 7 שנים) ניתן למתקפות סייבר, הניטור של רשת מבוססת, תפעול של רשת פחות יציבה והכנייה של רשת-העתיד המבוססת. שאר האתגרים הוגדרו כסיכון נמוך וזמן פתרון משתנה (חלקם כבר בתהליך יישום, כדוגמת המעבר לטכנולוגיות חדשות).

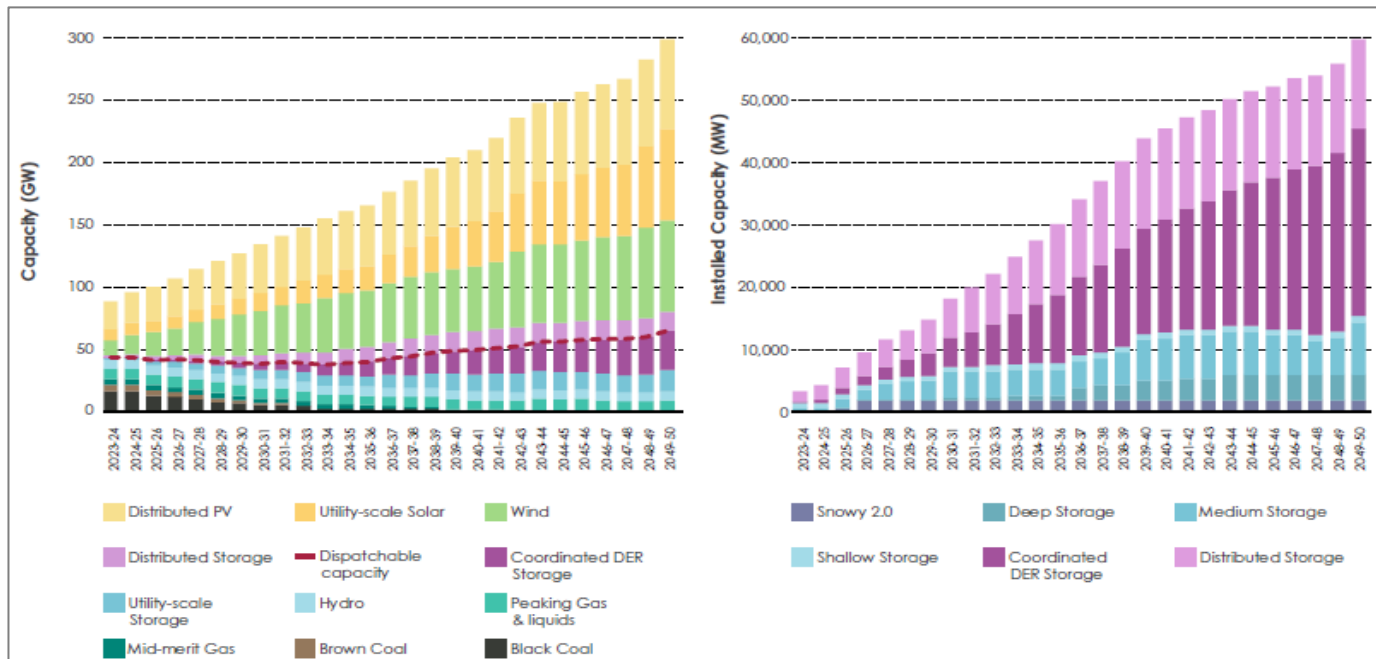


איור 2: האינרציה ברשת החשמל בהתאם לגורמי הייצור השונים
מקור: [13]

מעבר לטיפול באתגרים, חשוב לכתוב מחדש את הדרישות הטכניות, כך שלא יהיו מבוססות על טכנולוגיה מסוימת, לווזא שטכנולוגיות חדשות מותאמות לדרישות המערכת וכן לווזא שפיזור המתחדשות ברשת הוא בהתאם לקיבולת האפשרית וכוח האדם מוכשר ובהיקף הנדרש לתמוך במערכת המשתנה.

2.1.2 אוסטרליה

רשת החשמל באוסטרליה מספקת בשנת 2023 כ-85 גיגה-ואט חשמל, כ-40% מהם מבוססי דלק מחצבי – בעיקר פחם חום ושחור ומעט גז, ו-60% מתחדשות – בעיקר PV עם מעט הידרואלקטרי ואגירה. הצפי לשנת 2050 הוא לייצור של 275 גיגה-ואט ובהם 70% מתחדשות – במתקן סולארי גדול, PV ורוח (כשליש כל אחד), 20% אגירה (חצי במתקנים של ISO, רבע מבזר ורבע במתקן אגירה גדול), וכן 5% הידרואלקטרי ו-5% תחנות גז וגז נוזלי (Picking Gas & Liquid). המטרה העיקרית באגירה היא לתת פתרון לשעות העומס היומיות והשינויים עקב התנודות באספקת חשמל ממתחדשות (4-12 שעות). מתקני אגירה גדולים (utility-scale) נדרשים במקומות בהם יש בעיות בקווי ההולכה שעדיין לא טופלו, והכוונה היא להפחית עד כמה שאפשר את השימוש בהם. כמו כן, מתקני אגירה גדולים בשילוב עם חשמל הידרואלקטרי משמשים כאגירה לטווח ארוך (Deep storage), בין עונות ובמקרים של הפסקות חשמל ארוכות. הם מהווים תחליף למירב תשתיות הפחם הקיימות. צפוי גידול גם באיבודי הספק החשמל עם הגידול בשיעור המתחדשות והאגירה, מ-6% ל-20% בין 2023-2050 (איור 3) [14].



איור 3: תחזית להטמעת מתחדשות ואגירה בתוכנית ל-2050 באוסטרליה
מקור: [14]

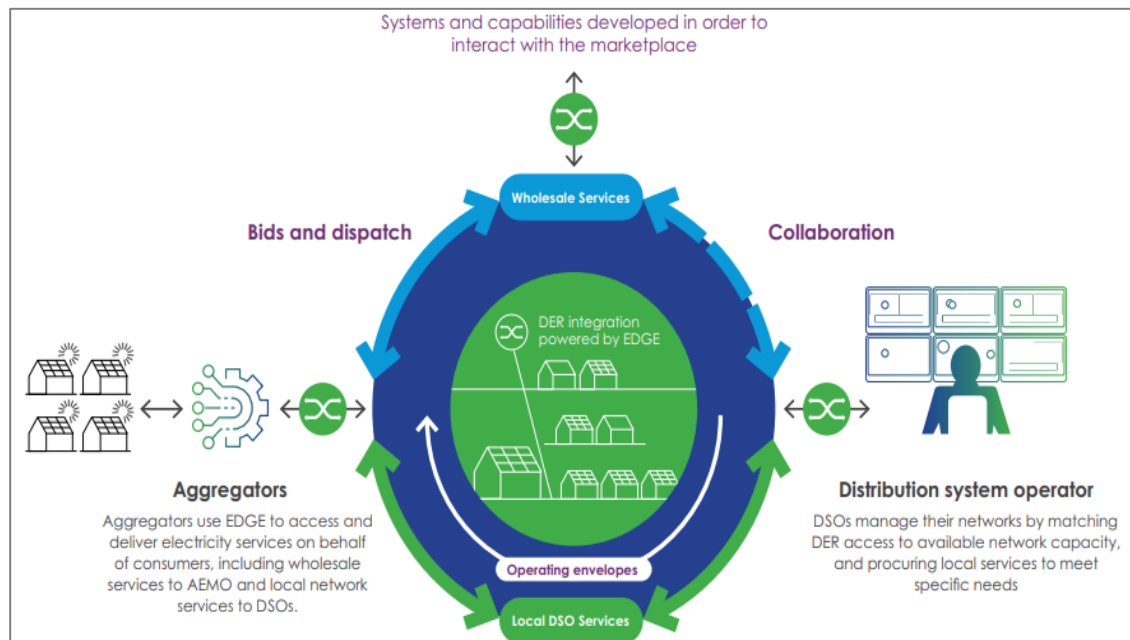
הפרויקט לתכנון רשת החשמל ב-2050 כלל מספר תרחישים, על בסיס הנחות שונות, והגדיר את התוכניות עבור מנהל הרשת המבוצרת (Distribution-System's Operator – DSO). הפרויקט נעשה בשיתוף עם ארגון האנרגיה המתחדשת האוסטרלי (ARENA), משרד האנרגיה, מפעיל שוק האנרגיה (Australian Energy Market Operator – AEMO), חברה להעברה וניתוח תקשורת-נתונים (DNSP – Distribution Network Service Provider) של מונים חכמים ואוניברסיטת מלבורן [15].

המיקוד המרכזי היה לעבור מתכנון המטרות ורשת החשמל ליישום על סמך מידול של נתוני אמת של צרכנים וספקים, באמצעות הוכחת התכנות ופתרון של מספר אתגרים מרכזיים. **המטרות** היו –

1. הדגמה כיצד הגורמים השונים במשק החשמל יכולים להשתתף בשווקי אנרגיה קיימים ועתידיים
2. הדגמת דרכים שונות להבנת המגבלות ברשת ההולכה בתהליך העברת ההספק ממקורות החשמל
3. בחינת האמצעים לתפעול יעיל של סחר תחרותי הולך וגדל בשירותי רשת-החשמל המקומית.
4. בחינת האמצעים להעברת מידע יעילה ובטוחה בין הגורמים השונים ברשת החשמל המבוצרת
5. פיתוח תוכנה שתבצע את הסחר היעיל ברשת – על פי ארבעת האתגרים שהוזכרו קודם
6. הגדרת התפקידים ותחומי האחריות של כל גורם ברשת-החשמל ותפעולה
7. בחינת העלות והתועלת של כלים רגולטוריים לתפעול שוק החשמל, המבוסס על טכנולוגיות יצור שונות
8. שילוב בעלי העניין, ספקים ולקוחות, בהגדרת הפתרונות לתפעול מערכת חשמל מבוצרת

בהתאם למטרות, **האתגרים** למפעיל רשת החשמל (איור 4) הם בתכנון של שתי רשתות – רשת החשמל ורשת התקשורת להעברת הנתונים. זאת, מאחר ותפעול וניטור רשת החשמל, תכנון ותמחור בזמן אמת של אספקת החשמל והעברת נתונים בין כל הגורמים במשק תלוי תלות קריטית ברשת הנתונים. ולכן המשימות העיקריות הן-

1. מתן פתרון לבעיית תקשורת-הנתונים שמונעת מעבר מידע הכרחי בין הגורמים השונים ברשת
2. התאמת התפעול למגבלות רשת החשמל וההולכה בכל זמן נתון
3. ניהול אקטיבי של מתקני ייצור מבזרים שלא יכולים לקלוט איתותים מרחוק
4. יישום תהליך יעיל כלכלית לאורך זמן



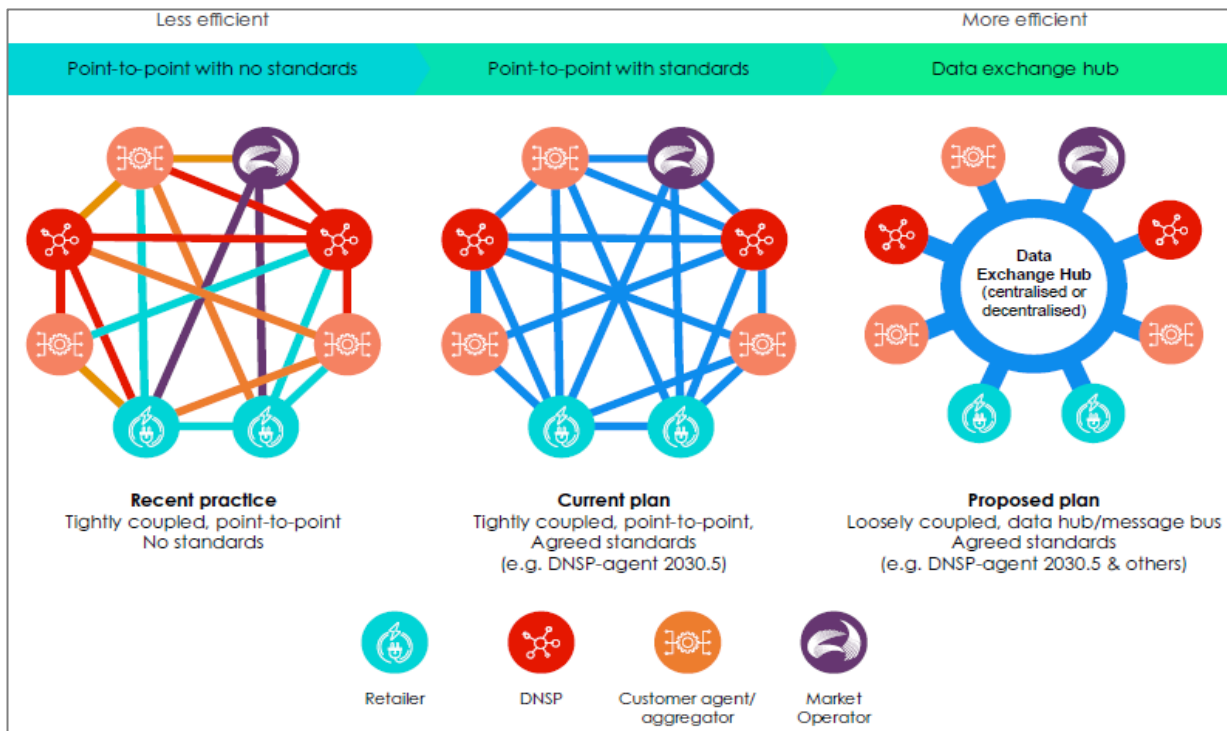
איור 4: גורמים המעורבים בתפעול משק החשמל באוסטרליה (DSO הוא מנהל המערכת) מקור: [15]

ובהתאם לאתגרים, הפתרונות כוללים התייחסות גם לרשת החשמל וגם לרשת תקשורת הנתונים, ובפרט –

1. **הקמת אזורי-אנרגיה מתחדשת** (Renewable energy zones – REZ) או רשתות VPP (Virtual Power Plants) – איגוד יצרנים קטנים כמו סולארי ואגירה, שמנוהל בכל אזור במטרה לסגור פערי היצע וביקוש מקומיים, לנהל בעיות ופתרונות באופן מקומי, ולשמש נקודת תקשורת עם מנהלי הרשת. זהו פתרון אפשרי משותף לסעיפים 1-2-3. הניהול המקומי כולל ניטור הספקי ייצור וביקוש, ניטור ושמירה על תדר רצוי, שירותי תקשורת-נתונים מקומיים, ניהול פיילוטים של פיתוח וחדשנות עתידית, סחר מקומי בין ביקוש להיצע, ועוד.
2. **ניהול רשת-החשמל יהיה מבוזר** כך שבכל אזור-אנרגיה מנהל הרשת מחליט איזו כמות מיוצרת, על ידי מי, ולאן היא תועבר, בכל תקופת זמן. **כולל החלטה לגבי אגירת החשמל שבתחומו**. לשם כך נדרש שיתוף ידע מכל הגורמים בזמן אמת, שיאפשר לנטר התנהגות ולעדכן תחזיות לתפעול הרשת, בהתאם למידע שנאסף. **ובפרט, בחישוב העלות-תועלת מנוטר הזמן בו הרשת לא מנוצלת בהשוואה לזמן בו היא עמוסה**. תרחישי המודל כוללים אופנים שונים של יבוא/יצוא הספק מאי לאי וההשפעה הצפויה על התמחור.
3. **איסוף תדיר של מידע** על תחזיות אספקה וביקוש לחשמל – דיווח "בזמן אמת" מספר פעמים ביום. תקשורת המידע כוללת תחזיות היצע וביקוש, ניטור משאבים וביצועים ברשת החשמל, מגבלות הספק וחסימים בקווי ההולכה, ונתונים שוטפים כגון תדר, הספקים שסופקו ונוצלו בפועל, מתח

ועוד. השינוי באופן דיווח הביקוש יתמקד בניטור וחיזוי מאפייני המתח, בהשוואה להספק (Feeder-head voltage).

4. **מעבר לתקשורת-נתונים במבנה HUB**, בהשוואה לתקשורת-נתונים בחיבור של נקודה-לנקודה, יהווה שינוי משמעותי שיהיה יעיל יותר, יוריד עלויות ויהיה כדאי כלכלית לאורך זמן. תפעול רשת-הנתונים (DNSP), שניתן ליישום הן בכלל המדינה והן בכל אזור-אנרגיה, ידרוש התייעלות גם בצד של המשתמש, באופן שלא יגרום לעלויות והשקעה נוספת, או לקושי בהתחברות ודיווח במערכת (איור 5).



איור 5: התייעלות באופן העברת המידע בין הגורמים השונים ברשת החשמל באוסטרליה
מקור: [15]

ההמלצות על אופן זרימת הנתונים והחיבור ב"האב" באוסטרליה התבססו גם על הניסיון ברשת החשמל ובתקשורת-נתונים באנגליה [16, 17] ובתקשורת-נתונים באוסטריה [18].

האתגרים ביישום התוכניות התייחסו למורכבות רשת-החשמל הפיזית, המעבר למתחדשות תוך כדי עליה תמידית בביקוש לחשמל מצרכנים חדשים, וכן אי הוודאות לגבי שוק החשמל העתידי ושרשראות האספקה בעולם – גם באספקת דלק מחצבי וגם בביקוש לחומרי בניה לתשתיות חשמל. לכן חשוב שהביצוע ייפשט את מורכבות הרשת ויאפשר גמישות במהלך היישום כדי לאפשר התמודדות טובה יותר עם ההשפעות של שינויי האקלים בעיקר על אספקת חשמל ממתחדשות.

התרחישים שנותחו במודלים, בהתאם לאתגרים וההמלצות לפתרונות, כללו שלוש אפשרויות ליישום איטי, יישום מדורג או יישום מהיר באמצעות מעבר למשק מבוסס מימן. היישום המדורג נבחר ככדאי ביותר בטווח הקצר, לצד בחינה תמידית של המעבר למשק-מבוסס-מימן, שנראה מהיר יותר בהשגת המטרות אך גמיש פחות ודורש שינויים מהותיים בתעשייה ובתחבורה. בהתאם לכך הוחלט על התמחיל של 90% מתחדשות ב-2050.

יישום מדורג של התמהיל לקראת 2050 ייעשה באמצעות תוכנית מדורגת להקמת אי אנרגיה, שהראתה כדאיות כלכלית (עלות-תועלת חיובית) ושולבה בתוכנית לשדרוג קווי ההולכה, במטרה לאפשר זרימה דו-כיוונית של חשמל בקווי ההולכה ברחבי אוסטרליה [14]. התוכנית מפחיתה עלויות וסיכונים לרשת החשמל הודות לגיוון במקורות החשמל ומשפרת אחזקה וניטור של קווי ההולכה והתשתיות. הפרויקטים ליישום התוכניות תוזמנו לעשור הקרוב במסגרת של שלושה טווחי זמן – מחויבים ליישום בשנים 2022-2026, ניתנים ליישום בשנים 2026-2031, ועתידיים להיות מיושמים ללא התחייבות לזמן ביצוע (יתוזמנו בתוכנית לעשור הבא). התכנון כלל, מלבד הקצאת כספים, גם פירוט לגבי ציוות והכשרת כוח האדם הנדרש ליישום כל אחת מהתוכניות בזמן.

כך למשל, מפת הדרכים של תשתיות החשמל של מדינת ניו סאות' וילס שואפת להתקין לפחות GW12 הספק אנרגיות מתחדשות ו-GW 2 של אחסון לטווח ארוך. לאחרונה הוכרזו זוכים בהספק כולל של GW5.79 לייצור חשמל ו-MW 574 של קיבולת לאחסון לטווח ארוך. בין הזוכים פרויקט 200MW/1,600MWh, באוויר דחוס, 275 MW/2,200 MWh ו-49 MW/392 MWh, באגירה בסוללות ל-8 שעות [19].

יישום של מיקרוגרید לאספקת חשמל ממתקני PV מקומיים החל בתחילת 2024 ע"י חברת Ausgrid. המתקנים הם ללא חיבור לרשת ויספקו חשמל למספר חברות ושירותים בניו סאות' וילס [20]. המיקרוגרید במתח נמוך הוא חלק מפרויקט משותף עם חברת שירותי האנרגיה של הממשל המקומי, והוא יכול לייצור חשמל (small-scale) עם אגירה וגיבוי של גנרטור דיזל, ועם טכנולוגיות של בקרה. מטרת המיקרוגרید היא להבטיח אמינות ורציפות באספקת חשמל והוא יופעל אוטומטית בכל מקרה של כשל באספקת חשמל לאזור. זהו פרויקט חלוץ שבאמצעותו ילמדו איך להתמודד עם אירועי-קיצון אקלימיים או סיכונים אחרים כדוגמת שריפות, הצפויים להתגבר באזור לקראת שנת 2050.

2.2 אירופה

מדינות אירופה, שכיום מייצרות ביחד כ-60% מהחשמל שלהן ממקור מתחדש, משתפות פעולה בתוכניות, בסטנדרטים ובגיבוי הדדי כחלק מהשינוי המתרחש במשק החשמל. מטרתם להיות היבשת הראשונה ללא פליטות פחמן בשנת 2050 ולספק חשמל במחיר זול יותר מהקיים. על פי ממצאיהם, נדרשת השקעה רבה בהרחבת קווי ההולכה כדי לעמוד ביעדי אספקת החשמל והפחתת הפליטות. **ההשקעה בתשתיות צפויה להביא לירידה בעלות אספקת החשמל בשנים 2030 ו-2040 ותמנע עליה חדה במחירי החשמל** [10, 21]. התוכנית מפרטת את השילובים העדיפים טכנית וכלכלית לשדרוג המערכת ועמידה ביעדי אספקת החשמל, אך מציינת גם חלופות לשילובים שהוצעו. התוכנית כוללת הצעות להרחבת ההספק המועבר בקווי ההולכה, אגירת חשמל, מתקני ייצור חשמל היברידיים בים (מבוססים על כמה שיטות ייצור), רשת חכמה והמרת חשמל למימן. כמו כן נדרשת ליישום התוכנית השקעה כספית גדולה, שתתורגם להשקעה בכוח אדם, יצירת מקומות עבודה, גידול בתוצר הלאומי ועמידה ביעדי הפחתת הפליטות.

אחת ההשקעות המרכזיות כתמיכה ברשת החשמל והגברת הגמישות שלה גם באמצעות אגירה והובלה של אנרגיה וחשמל היא הקמת חמישה קווי שדרה באירופה להובלת מימן ירוק (GH₂), שיחברו בין מדינות אירופה. המימן, בעיקר כשנוצר בהמרת עודפים מחוות טורבינות רוח בים (ככל שהמתקן גדול ורווחי יותר הכדאיות להמרה למימן עולה) – יאפשר דרך מהירה להולכת אנרגיה שניתן להמיר לחשמל במהירות ולתמוך ביכולת של מערכת החשמל להתמודד עם פערי אספקה ושינויי תדר [22].

לפיכך, ממוקמים בכל רחבי אירופה לצד מתקנים גדולים להפקת חשמל ממקור מתחדש גם מפעלים להפקת מימן ואמוניה ירוקים (מאמוניה ניתן במהירות להפיק מימן וכן קל יותר לייצב אותה כימית לאורך זמן בהשוואה למימן). ההובלה של המימן הוכחה ככלכלית יותר בהשוואה להובלת חשמל ולכן גם תורמת להורדת עלויות החשמל.

מבחינת ניהול המערכת, צפויה ירידה באינרציה של המערכת עקב שילוב רב של חשמל ממקור מתחדש וייצור חשמל מבוסס, שיובילו לסיכון גבוה של אי תאימות בתדר. לפיכך, **פתרונות גמישים לאתגרי הרשת** יהיו חשובים יותר בעתיד הן מבחינת הביקוש והן מבחינת ההיצע, ותפקידו של מנהל המערכת יהיה קריטי. למדידת הסיכון לאספקת החשמל הרציפה הוגדר מדד למעקב אחר השינוי בסיכון (Loss of Load Duration – LLD) והוא נבדק מחדש בתוכנית הפרויקטים המעודכנת כל שנה, באמצעות הרצה של מאות תרחישים במודלים שונים שמשכללים עלות תועלת ישירה וסביבתית [23].

2.2.1 דנמרק

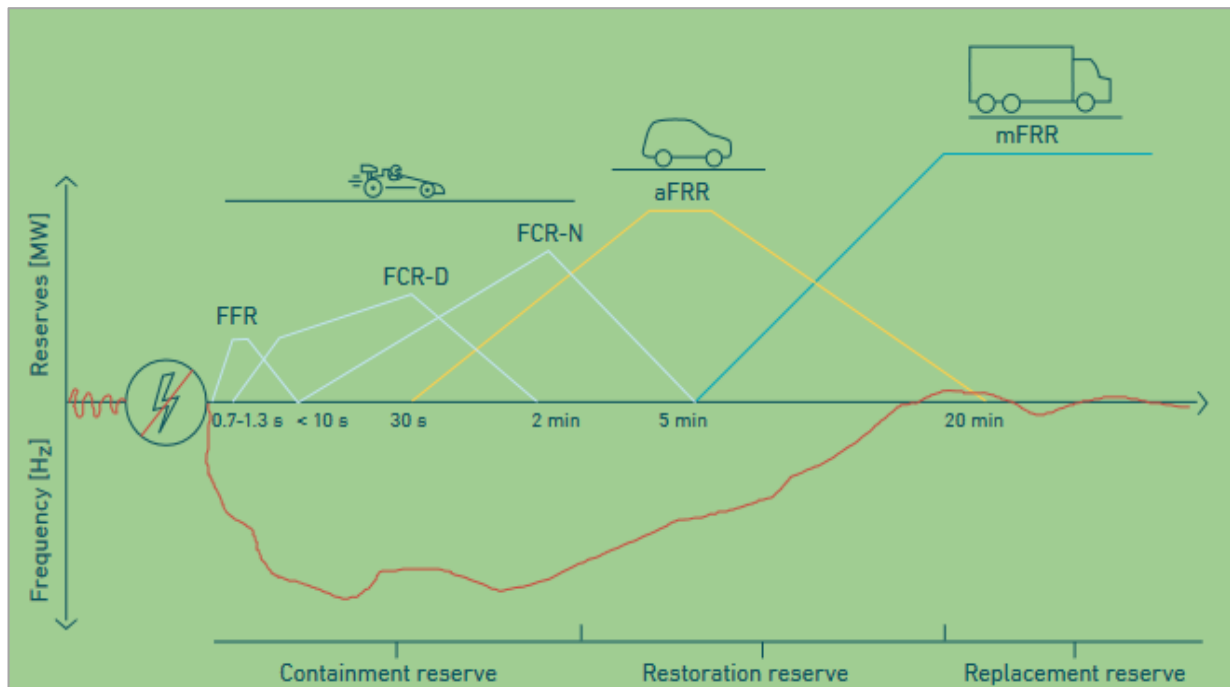
בדנמרק קיים שוק חשמל מתקדם ונכתבו מספר תוכניות לקראת שנת 2045 ובהן תובנות לגבי רשת החשמל בשנת 2040, אפס פליטות בשנת 2050, צרכי הרשת והפתרונות כדי ליישם אותם [24] [25]. דנמרק היא אמנם חצי אי גיאופיסי מבוסס מאוזן, אך בעלת קשרי יצוא ויבוא של חשמל עם כל שכנותיה (הולנד, גרמניה, נורבגיה ושבדיה). בכל קו חשמל שמחובר למדינה שכנה מועברים עד 700 MW חשמל. איי אנרגיה מוקמים בים במטרה לספק חשמל מטרבינות רוח ולאפשר 100% חשמל ממקור מתחדש בשנת 2040. בינואר 2024 בשעות שיא הביקוש (כ-4000 MWh) תמהיל ייצור החשמל הוא גמיש וברובו 60-80% מתבסס על רוח, בתוספת חשמל מביומסה (10-18%), משריפת פסולת וכן מגז ומנפט מחצבי (עד 15% מהיצור).

הביקוש לחשמל ב-2040 אמור להכפיל ויותר את הביקוש כיום ולהתבסס על ייצור נוסף של חשמל מרוח ביבשה ובים ומשמש, וכן בהתבסס על אי אנרגיה חדשים בדנמרק ובמדינות שכנות ועל יבוא ויצוא של חשמל עם מדינות שכנות. לפיכך, התמהיל בשנת 2040 יהיה מבוסס על 33%-חשמל סולארי, 32%-רוח בים, 15%-רוח ביבשה, 10%-אי אנרגיה בדנמרק ו-10%-אי אנרגיה במדינות שכנות [25].

בשנת 2022 הוקם השוק להספק חשמל (aFFR CM – Automatic Fast Frequency Reserve Capacity) שמטרתו לעשות שימוש בהספקי החשמל שמוצרים באזורי הסחר (bidding zones) בדנמרק כדי **לנהל את שירותי-הרשת-הגמישה, ובהם בחירת התשתיות והאמצעים לאיזון התדר ואספקת גיבוי לכשל אפשרי, התאמת היצע-לביקוש והשלת עודפים-Ancillary services**. מטרת השוק היא לספק חשמל ירוק במחיר הוגן ובאמינות להגדלת הרווחה החברתית בדנמרק. הסחר החל בהספק קטן וכיום כל ההספק מנוהל בשוק, שחוסך למשק כמה אלפי יורו ביום. בשנת 2023 הורחב השוק לסחר בין אזורי אנרגיה שונים (mFFR CM) והמטרה היא להרחיב אותו לרמה בינלאומית, כך שיוכלו לספק בשנת 2040 בעת הצורך עד כמחצית מהביקוש בדנמרק (20 TWh).

עם הייצור ממתחדשות נדרש איזון התדר ברשת וזה נעשה באופן יזום ופרואקטיבי בהתאם לנתוני ניטור שגאספים תדיר בשילוב תחזיות לביקוש והיצע, כפי שמדווח על ידי המשתתפים במשק ובמטרה לסגור פערים. לאיזון התדר נעשה שימוש בכמה אמצעים, שתלויים בזמן התגובה – כמה זמן יעבור עד שיחידת ההיצע או הביקוש תתחיל לעבוד, זמן ההפעלה של המתקן – כמה זמן המתקן צריך לעבוד בכל הפעלה. המתקנים המהירים ביותר נקראים "עתודות לאיזון תדר" (frequency containment reserves – FCR).

המתקנים האיטיים יותר (aFRR, mFRR) והמתקנים לאספקת חשמל יתופעלו ויחליפו את הציוד המהיר (איור 6).



איור 6: האמצעים לטיפול בתדר המשתנה בדנמרק
מקור: [24]

לצורך ההכנה לשנת 2040 זהו **שלושה אתגרים – 1.** חשמל ממקור מתחדש צריך להגיע למקום בו ישתמשו בו באמצעות קווי ההולכה, **2.** אמינות האספקה לצרכנים היא קריטית, **3.** רשת חשמל ותיקה דורשת השקעה בשדרוג.

הפתרונות לאתגרים ייתכן ויימצאו באמצעות בנית מתקנים, תפעול ותחזוקה של הרשת, שינויים בשוק החשמל או שיתופי פעולה ויוזמות עם גורמים חיצוניים לשוק החשמל.

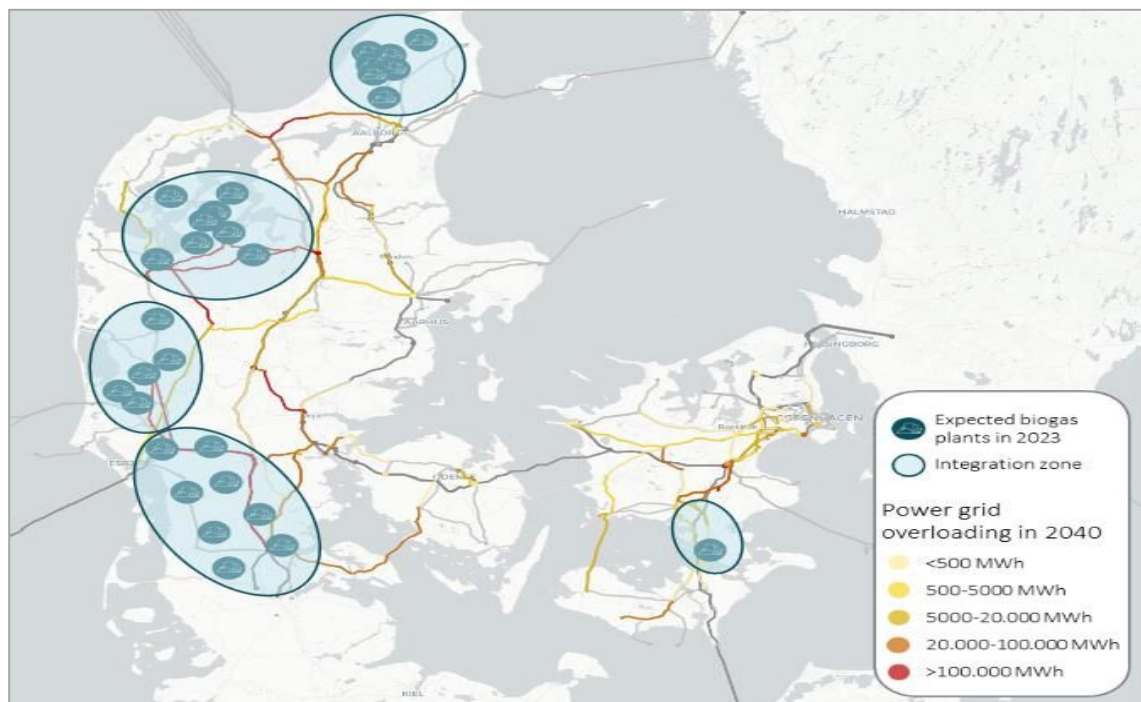
כך לדוגמא, עקב עומסים בקווי ההולכה יידרש רכש נוסף של מתקני FFR ו-FCR כדי להתמודד עם ההספק הגדל ממקור מתחדש והרחבת רשת החשמל. הדו"ח מפרט את המתודולוגיה לקבלת ההחלטה לגבי הרכש הנדרש בהתאם לניתוח רב משתני שכלל את נתוני הרכש ב-2023, הרגולציה באירופה לגבי רמת השינוי והסיכון המותר בתדר, עלות הרכש ל-MW והצפי ל-2040. מכשור ה-FCR מופעל כיום באופן אוטומטי בהתאם להפרשי היצע-ביקוש ושינויים בתדר בכל אזור. הרכש של מתקנים דומים צפוי לגדול פי-50 מהקיים עד שנת 2040 [24].

כך לדוגמא –

- באחד מאזורי הרשת בדנמרק DK2, קיים מכשור FFR שתפקידו לטפל בפילוט גדולות בתדר ואספקה מהירה של הספק מווסת שכולל אגירה ברכב בהיקף של 0.5 MW, סוללות בהיקף של 1.1 MW ובולרים-חשמליים בהיקף של 8.5 MW.
- באזור DK1 ה-FCR משמש כרזרבה עיקרית לטיפול בתנודות בתדר וייצוב הסנכרון ברשת באמצעות שימוש גמיש בכלי רכב חשמליים בהיקף של 1 MW, מתקן אספקה בהיקף של 8 MW ובולרים בהיקף של 56 MW. מכשירים אלה זמינים להפעלה תוך 30 שניות.

- באזור DK2 קיים גם FCR-D (Frequency Containment Reserve – Disturbance), שמשמש כרזרבה עיקרית, ותפקידו לאזן באופן אוטומטי הפרעות בתדר. זהו מתקן א-סימטרי שבו וויסות שמעלה הספק מופעל כשהתדר יורד מ-49.9 הרץ והוא שונה מוויסות שמוריד הספק ברשת ושמופעל כשהתדר עולה על 50.1 הרץ. היקף ההספק שמופעל נכנס לשימוש תלוי בפער בתדר בהשוואה ל-50 הרץ. כך מתבסס המאגר להעלאת התדר על MW5 סוללות, MW104 ממתקן הפקת חשמל, MW3.6 מבילרים חשמליים, MW0.5 מאגירה ברכב ו-MW0.5 מ-PV. להורדת התדר מאגר המתקנים כולל MW2.1 של סוללות, MW48 של מתקן להפקת חשמל, MW2 מבילרים, MW1.7 מרכב חשמלי ו-MW15 מ-PV.

כמו כן, אחת הדרכים שמסייעת בהפחתת העומסים על הרשת היא שילוב של מפעלים צורכי חשמל באזורים עמוסים (איור 7). כך למשל המיקום של מתקני ייצור של ביו-מתאן סינטטי – הפחמן הדו חמצני (פד"ח) שנפלט מייצור ביוגז (מכיל 35% פד"ח) נאסף ומורכב עם מימן לייצור של ביו-מתאן. הפד"ח הוא תוצר-משנה בתהליך השיפור של הביוגז לרמה של גז מחצבי. הביומתאן המופק יהווה דלק נקי יותר מהביוגז ויעשה בו שימוש במשק האנרגיה.



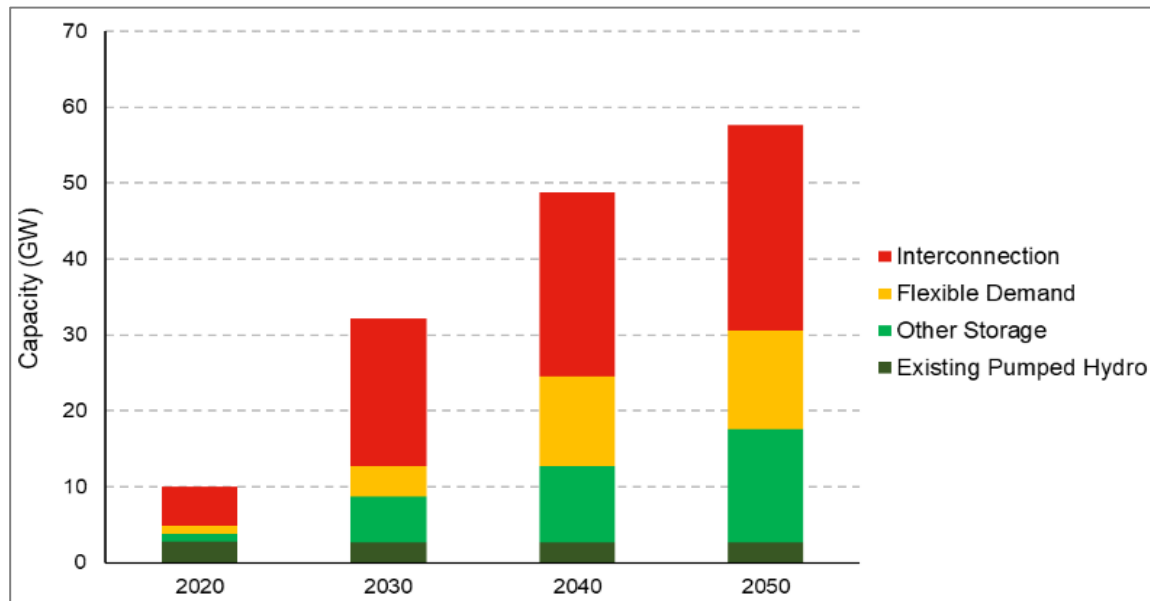
איור 7: שילוב מתקני ביוגז באזורים עם רשת עמוסה להפחתת עומסים

מקור: [25]

2.2.2 אנגליה

תהליך השינוי לקראת איפוס הפליטות באנגליה כלל מספר מטרות מרכזיות וקריטיות לאספקה אמינה של חשמל – תכנון מחדש של מערכת חשמל חכמה ובפרט קווי הולכה מחודשים, תפעול גמיש של משק בעל מקורות חשמל מגוונים, ותפעול על סמך נתונים בזמן-אמת (Real time operations). בשנת 2024 אנגליה מתבססת על חשמל מגז מחצבי 34%, רוח 27%, סולארי 4%, ביומסה 15%, גרעין 9%, פחם 3%, הידרו 2%, יבוא ממדינות שכנות 14% ומקורות אחרים 2% [26]. ברשת הגמישה בשנת 2030,

כאשר תמהיל אספקת החשמל יכלול GW40 מאנרגיית רוח, יידרשו כ-GW30 של תשתיות חשמל גמישות, שיתבססו על אגירה, תגובה מהירה לביקוש (DSR – Demand side response) וחיבור בין-איזורי. בשנת 2050 יידרשו כ-GW60 של הספק ממקורות גמישים שיתבססו על GW30 של אגירה לזמן קצר ו-DSR ועוד GW27 של חיבור בין-איזורי (איור 8). לשם כך תידרש בתחילה השקעה רבה אך העלות הכוללת תהיה פחותה בהשוואה לתפעול של משק לא גמיש. התפעול יעשה על ידי גורמים מוסמכים בכל תחום, שכל אחד מהם אחראי על תחום אחריותו והתקשורת ביניהם יעילה ואיכותית [16].



איור 8: הצפי למקורות חשמל ב-2050 בשוק הגמיש באנגליה
מקור: [16]

כאמצעי לביצוע יוגדרו מפעילי רשת אזוריים שיתפעלו שוק חופשי באזור שבאחריותם ויתקשרו עם שאר הגורמים במשק החשמל והרשויות באזורם. בנוסף יוגדר מתפעל משק חשמל מרכזי שיתאם בין הדרישות ברמה הארצית לאזורית. תפקידם של מפעילי הרשת האזורית יכלול פיתוח תוכניות לאספקת חומרי גלם לייצור חשמל (לדוגמא – גז מחצבי) וקווי-הולכה לחשמל, תפעול רשת-החשמל האזורית ותיאום בין כל הגורמים השותפים בה, פיתוח תוכניות אסטרטגיות בתיאום עם התוכנית הארצית להפחתת פליטות ובטחון אנרגטי, וכן איסוף וניתוח נתונים שימשו בתהליכי קבלת ההחלטות, בעיקר בתחום קביעת מחיר החשמל.

מתפעל המשק ברמה הארצית יכלול מספר מחלקות – הובלה אסטרטגית, תיאום שוק-חשמל, וניטור היישום –

1. ההובלה האסטרטגית

- נדרשת לתרגם את החזון של שוק חופשי לתוכניות תיאום בין כל הגורמים במשק,
- נדרשת לנטר ולזהות אתגרים ביישום – בהתאם למדיניות, רגולציה, חדשנות ושווקי חשמל קיימים
- תזהה מקומות בהם נדרש שינוי בתפעול המערכת או בתפקידים ובתחומי האחריות
- תיעץ למנהל הרשת ולממשלה במקרים בהם קיים פער או נדרש שינוי במדיניות או ברגולציה

2. תיאום שוק-חשמל (Market coordination)

- תכנון תמהיל זול ואמין, עם ההבנה שהעלות תרד ככל שיהיה יותר חשמל ממקור מתחדש בתמהיל.
- הגמישות בשוק מתבטאת בשילוב ניתוח ביקושים והיצע, שימוש באגירה, העברת עודפים בין תתי-אזורים ברשת, וכן הכנסה של טכנולוגיות להפקת מימן "ירוק" בהתבסס על אלקטרוליזה שעושה שימוש בשאריות חשמל ממתחדשות [27]. המימן ישמש כתחליף דלק לתחנות גז מחצבי להפקת חשמל.
- ניהול השוק והצעת חלופות לתהליך קיים, בהתייעצות עם בעלי עניין ובמעורבות מחקר וניתוח נתונים
- קבלת החלטות בנוגע לסטנדרטים, יעול התהליך ותחומי אחריות של בעלי תפקידים

3. ניטור היישום של משק-חשמל

- ניטור היישום של ההחלטות בכל הגופים על פי סטנדרטים וחוקים, ויידוא יישום בזמן וכפי שתוכנן
- ניתוח אופן היישום והעברת משוב בדרכים מוגדרות מראש
- דיווח על בעיות ביישום למנהל הרשת

2.2.1 אירלנד

אירלנד צופה להכפיל עד שנת 2040 את הספק ייצור החשמל ולאפס פליטות בשנת 2050. כיום מירב החשמל מיוצר מטורבינות רוח ביבשה (78%) לצד אחוזים בודדים של חשמל משריפת ביומסה (9%), הידרואלקטרי (5%), טורבינות רוח בים (4%), PV (2%) ושריפת פסולת (2%). בשנת 2040 צפוי לגדול בעיקר ייצור החשמל מטורבינות רוח בים (62%), מטורבינות רוח ביבשה (29%), PV (5%) הידרואלקטרי (2%) ושאריות של פסולת וביומסה (2%). בין אירלנד וצרפת קיים "החיבור הקלטי" להעברת חשמל וגיבוי הדדי ביבוא ויצוא של חשמל, וכן קיימים 3 חיבורים לאנגליה. אירלנד העלתה את שיעור ייצור החשמל ממתחדשות באופן מהיר מאוד בשנים האחרונות והחיבורים לצרפת ואנגליה לצד השימוש בגז מחצבי סייעו בייצוב הרשת. במקביל לדרישות הטכניות, אופן חישוב מחיר החשמל משתנה תדיר ונדרש לעדכון בהתאם לתמהיל העדכני ולרגולציה המשתנה באירלנד ובאירופה, כולל בעניין סחר הפחמן [28].

האתגרים בניהול הרשת מתמקדים בחיבור הצרכנים לרשת כדי ליהנות מייצור עצמי של חשמל, מטכנולוגיות חדשות וממונים חכמים, שיותקנו בכל הבתים עד שנת 2024. כמו כן יתבצע פיילוט של PV (micro-generation) ותוכניות ליישום היבוא והיצוא לצד אגירה מקומית וקידום חדשנות ומחקר. פיתוח התשתיות בים יעשה בהתאם להנחיות הסביבתיות וקווי החיבור לגיבוי לצרפת ואנגליה ימשיכו להיות מתופעלים. כמו כן נשקלים חיבורים נוספים לסקוטלנד ושיתופי פעולה אזוריים בהקמת טורבינות רוח בים. תוכנית קווי ההולכה היא עד 2030 (EirGrid) והיא כוללת מטרות להגמשת רשת החשמל באמצעות רשתות חכמות, חלוקה לתתי רשתות, ביזור הייצור ואגירת חשמל. כמו כן ייבנו המסגרות לחישוב מחיר החשמל בזמן אמת והתהליכים לניהול מהיר של ביקוש מול היצע. היבוא מהקישור לצרפת ואנגליה יפחת והיצוא יגדל בהדרגה עד שנת 2040.

2.2.2 מדינות נוספות

■ איטליה

באיטליה, מדינה ים-תיכונית, נכתבה בשנת 2023 תוכנית למשק החשמל שכוללת את יישום המטרות שהציב האיחוד האירופי להפחתת 55% מהפליטות, הגדלת שיעור המתחדשות בתמהיל, פיתוח קישוריות בקווי החשמל עם מדינות שכנות, שיפור אמינות אספקת החשמל ועמידות הרשת, והשקעה בדיגיטיזציה של רשת החשמל [29].

אחד האמצעים ליישום המטרות של החיבור למדינות שכנות ושיפור אמינות האספקה הוא ההשקעה בפיתוח רשת Hypergrid, שעושה שימוש בטכנולוגיות ה-HVDC (High Voltage Direct Current) ותאפשר העברה של עד 30 GW בין אזורים, בהשוואה ל-16 GW שמועברים כיום. לאורך ולרוחב המדינה יוקמו חמישה רשתות-שדרה שיעבירו חשמל מאזורי ייצור לביקוש. קיימת תוכנית באיטלקית אך לא נמצאה תוכנית ISO ל-2040 באנגלית.

■ ספרד

בספרד, מדינה ים-תיכונית, רשת החשמל מנוהלת על פי התוכניות באירופה וספרד מחוברת בקווי הולכה למדינות שכנות ומתכננת לחיבור לקווי השדרה של המימן (Europe Hydrogen – EHB Backbone) באירופה. התוכנית המקומית היא לשיפור רשת ההולכה בשנים 2021-2026. התוכנית מייחדת 27% מההשקעה לשיפור אמינות האספקה ובין היתר מתוכנן חיבור ימי דו-כיווני בהספק של 1,500-5,000 MW לצרפת, פורטוגל ומרוקו וכן לאיי ספרד בים הבלארי (אזור פאלמה) [30]. קיימת בספרדית תוכנית מורחבת להפחתת פליטות ומשק האנרגיה עד 2030, אך לא נמצאה תוכנית ISO באנגלית לשנת 2040.

2.3 ארצות הברית של אמריקה

אמנם לכל מדינה ואזור האתגרים שלו באבטחת אספקת החשמל הסדירה, אך ישנם אתגרים משותפים לרשת החשמל, האזורית והעולמית, שנבחנים במשותף על ידי כל ארצות צפון אמריקה וכן בשת"פ עולמי מסוגים שונים.

מחקר בפרנסטון ניתח תחזית לאיפוס הפליטות ושדרוג מערכות החשמל בצפון אמריקה ככלל ובכל מדינה בפרט, והראו מהן האפשרויות והעלויות הנלוות עד שנת 2050 [31].

המחקר כלל **שישה תרחישים** מרכזיים ובהם (1) [REF] – חישמול מהיר של כל התהליכים במשק ללא תלות בעלויות דלק ואספקתו או בפליטות, (2) [E+RE-] – חישמול מהיר של כל התהליכים במשק בתלות בקצב גידול איטי של מתחדשות בדומה לקיים, (3) [E+] – חישמול מהיר בבניינים ובתחבורה, ללא הקלות בזמינות קרקע לביו-דלק (4) [E-B+] – תהליכי חישמול איטיים והכנסה מהירה של אנרגיה מביומסה, כולל קרקע מופשרת לגידולים נדרשים, (5) [E-] – חישמול איטי, ללא שינוי בקרקע לביו-דלק, וכן (6) [E+RE+] – חישמול מהיר והגדלה מהירה של שיעור המתחדשות במשק, עד לסיום השימוש בדלק מחצבי וגרעיני ב-2050, ללא שינוי בזמינות קרקע לביו-דלק או לאגירת פחמן תת-קרקעית.

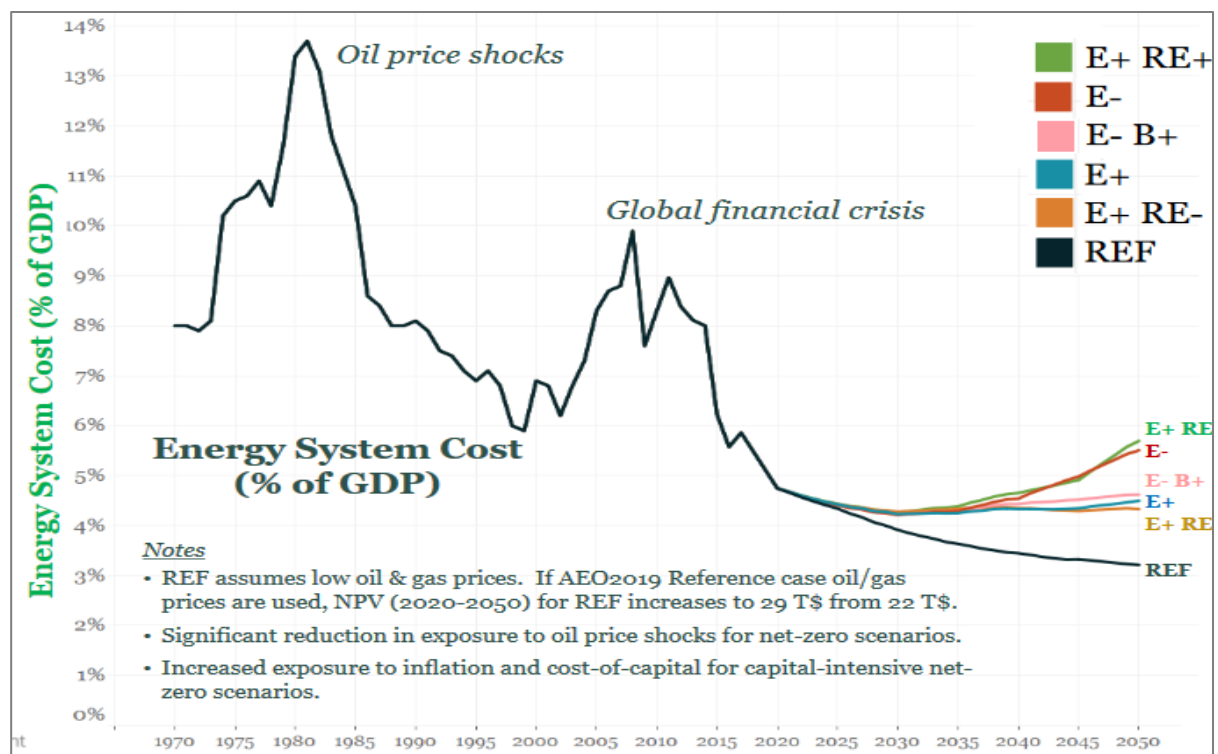
בכל התרחישים מסתיים השימוש בפחם בשנת 2030 וחשמל מרוח ושמש יהוו מעל 60% מתמהיל האנרגיה לשנת 2050. מבחינת עלויות – הן עולות במעט עם השינוי במשק האנרגיה (לא רק חשמל), אך עלות איפוס הפליטות קטנה בהשוואה לשינויים בעלויות הדלק או בשווקי העולם (איור 9).

כמו כן, בכל התרחישים – הקפיצה בעלויות צפויה להגיע בעשור הקרוב ולפני שנת 2035, ולאחריה השינוי בין התרחישים קטן יותר בהיקפו. כמו כן, ההשפעה הצפויה על העלויות החיצוניות והמחיר לצרכן הן בכיוון ירידה וצפויה עליה בגידול בכוח העבודה המקצועי.

בין ההשפעות האפשריות על אספקת חשמל סדירה ואמינה נכללים מתקפת סייבר או פעימה אלקטרו-מגנטית, אירועי-קיצון אקלימיים כדוגמת שרפות והוריקן, צונאמי והפרעה גיאומגנטית מהשמש או החלל, וכן מגפות וזיהומים. ההשפעה של פעימות-אלקטרומגנטיות (Electromagnetic EMP – Pulses), משתנה בהתאם למקור – טבעי או אנושי [32]. הפרעה ממקור גיאומגנטי (שקשור לשמש) תהיה בעיקר על קווי הולכה ארוכים שמעבירים מתח למתקנים גדולים, וייתכן שלא ישפיעו על ידי צרכני החשמל. בהשוואה לכך, הפרעה ממקור טכנולוגי-אנושי תשפיע על כל רכיבי הרשת, כולל קווי הולכה, שנאים, תשתיות ומרכזי ניטור, ובהחלט תתכן השפעה שלהם גם על צרכני החשמל. ההמלצות לפעולה הן בכמה תחומים –

1. מדיניות –

- הבנת ההשפעות האפשריות עקב הפרעה אלקטרומגנטית, בנזק – השבתת ציוד או הפרעה זמנית, בעלות – קצר וארוך טווח, ובאפשרות לפתור בעיות – הן במתקני האספקה והם ברשת ההולכה והחלוקה
- שיתוף ידע עם התעשייה והציבור בנושא הפרעות או מתקפות אלקטרו-מגנטיות והשפעתן, שיתוף ידע תקופתי לאורך זמן.
- שת"פ עם גורמים אחרים שבסיכון כהכנה להתמודדות משותפת בפני הפרעות עתידיות – כדוגמת תשתיות לאומיות בתקשורת-נתונים, אספקת דלק ותחבורה, אספקת מים וטיפול במים.



איור 9: עלות המעבר לאפס פליטות עם שדרוג מקורות האנרגיה ורשת החשמל בארה"ב
מקור: [31]

2. מחקר ופיתוח –

- סקירת המצב – מה פותח עד היום ומהם פערי-הידע להתמודדות עם אירוע, סקירה מתמשכת של עדכונים לאורך זמן והבדלה בין סוגים שונים של מתקנים – ממסרים אלקטרו-מכאניים בחשמל ממקור מחצבי וממירים במתחדשות, שנאי זרם ומתח, וכן ציוד הניטור שלהם.
- זיהוי האמצעים הנדרשים להגנה (לפני) והתאוששות (אחרי) מאירוע של הפרעה אלקטרומגנטית.
- זיהוי ההשפעה האפשרית על הצרכנים ובכלל – באמצעות הרצת אירוע-דמי, וזיהוי הרכיבים ברשת שמהווים נקודת רגישות ובעלי השפעה על הרשת כולה

3. אמצעים להגנה והתאוששות –

- הוספת אמצעים לזיהוי מוקדם של אירוע, בשיתוף עם התעשייה
- תיעוד ותרגול המהלכים להתמודדות עם אירוע והוספת מערכות חילופיות לניטור וניהול האירוע

בנוסף, כהכנה לכל אירוע הפרעה או השבתה של המערכת, רצוי לאמץ שישה כללי יסוד – (1) לבצע ביקורת תקופתית למערכות קריטיות, (2) להיות תמיד מוכן לאירוע, (3) לשמור על ערוצי תקשורת תקינים עם הגורמים שנדרשים בעת אירוע, (4) לבזר את מקורות החשמל וההולכה, (5) להבטיח גיבוי לכל המערכות והנתונים הקריטיים, וכן (6) לקחת חלק בתרגול אירוע ובשקלול התוכניות להכנה לאירוע [33].

2.3.1 הוואי

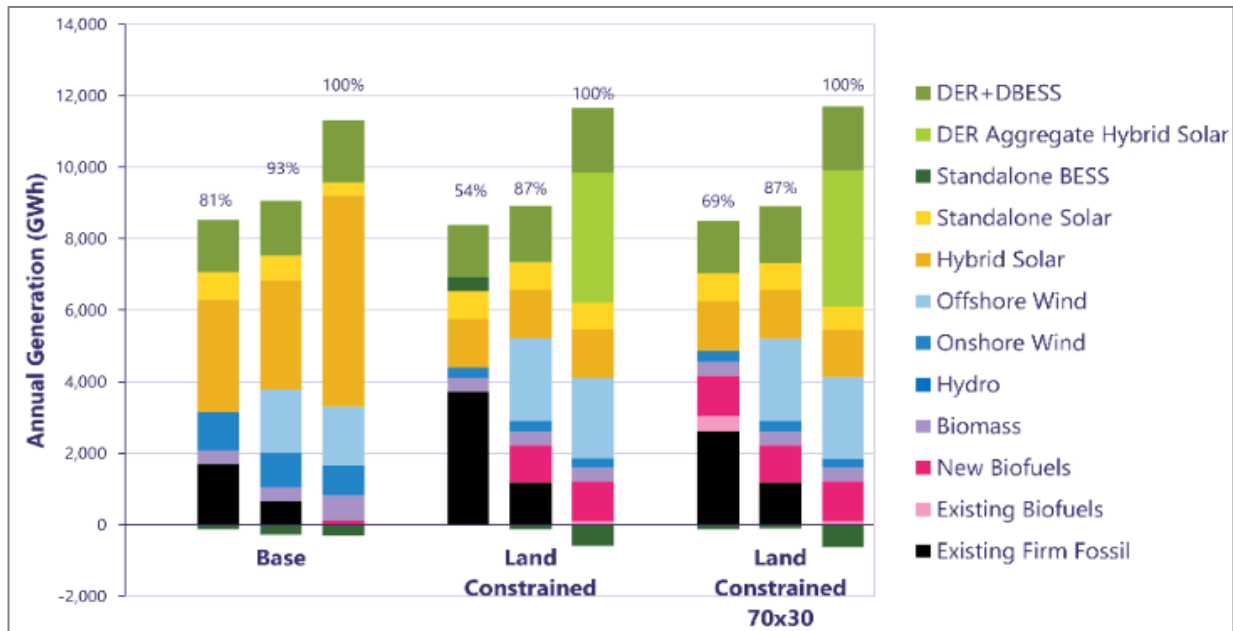
בהוואי היעדים מתבססים על שלושה עקרונות – הצורך, ההזדמנות והצדק החלוקתי. הצורך הוא להפיק בשנת 2045 חשמל שמבוסס כולו על מקורות מתחדשים, בהתחשב במגבלות זמינות הקרקע, ובשנת 2040 להפיק 70% מהאנרגיה (כולל דלק לתחבורה ותעשייה) ממקור מתחדש. ההזדמנות היא לספק חשמל במחיר סביר באמצעות עידוד הקמת תשתיות ברשות האזרחים לצד פיתוח תעשייה וחדשנות מקומית בתחום המתחדשות. הצדק החלוקתי נוגע לחשיבות שתהליך הפיתוח והשותפות יכלול את כל התושבים. התוכנית כוללת רגולציה למספר נתיבי מימון ותמיכה בתושבים ובעלי התשתיות שיעודדו פיתוח מתחדשות [34].

בהוואי שמונה איים מיושבים בחמישה אזורים מרכזיים² ולכן ביזור הרשת הוא הכרחי ובהתאם לכך גם התוכנית לרשת החשמל שמפרטת את השינוי בכל אחד מארבעת האיים המרכזיים לצד התוכנית הכוללת. התמהיל בכל אי יהיה מגוון כדי לבסס יציבות והביזור יהיה תלוי גם במשאבי הקרקע, כך שבמקרה של מחסור – יותקנו מתקנים היברידיים, ובעיקר שילוב סולארי עם רוח (איור 10).

שילוב סולארי עם רוח נמצא לאורך זמן כאפשרות העדיפה גם מבחינת מחיר, בהתאם לחישוב ה-LCOE (Levelized cost of energy) הצפוי עד 2050. התרחישים התחשבו במחיר, בזמינות הקרקע, בשינויי הטכנולוגיה וביציבות אספקת החשמל [35]. התמהיל המומלץ לייצור חשמל בשנת 2045 כולל

² האיים המרכזיים הם – O'ahu, Hawai'i Island, Maui, Moloka'i, Lāna'i

51% סולארי³, 16% מטורבינות רוח בים ועוד 5% מרוח ביבשה, 19% מתקנים להפקה ואגירה של חשמל מבזר בבעלות הצרכנים (Customer Energy Resource – CER) ו-9% נוספים מבוססי ביו-דלק, גיאותרמי וביו-מאסה. זאת, בהשוואה לשנת 2022 בה 68% מהחשמל הופק מדלק מחצבי (איור 11).



איור 10: התאמת היצע לביקוש בתלות בזמינות קרקע באי הוואי בשנים 2030, 2035 ו-2045
מקור: [35]

(BESS= Battery energy storage system, D=Distributed, 70x30= 70% Renewables in 2030)

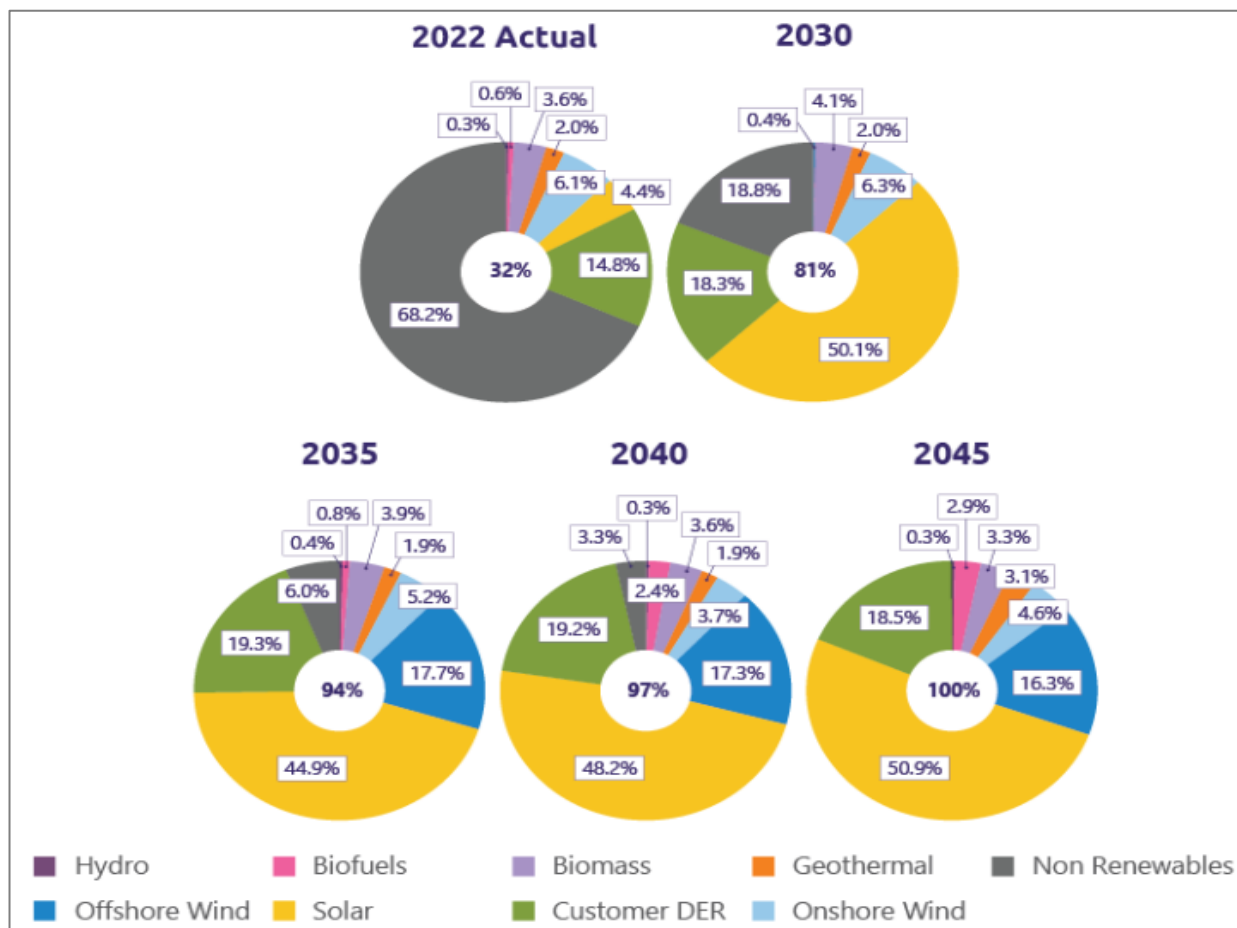
התהליך ליישום יכלול תוכניות לשדרוג הרשת ואמצעי הייצור בכל עשור, בעזרת תהליך חוזר-ונשנה של איסוף וניתוח נתונים לשיפור התוכניות ואמצעי הרגולציה הנדרשים [35]. ההמלצות להמשך יישום השדרוג כוללים (1) ייצוב עלויות הפקת החשמל וקידום צדק-אנרגטי (גישה לחשמל נקי וזול לכולם), (2) הגדלת קצב ההקמה של מתקנים גדולים וקטנים-מבזרים להפקת חשמל ממקור מתחדש, (3) הקמת רשת-חשמל מודרנית וגמישה לשינויים, וכן (4) אבטחת אמינות האספקה באמצעות ייצור חשמל ממקורות-אנרגיה וטכנולוגיות רבות ומגוונות.

הנחות הייסוד בתכנון העתידי הן (1) מקורות מתחדשים לייצור חשמל במחיר סביר הן תמיד האופציה הראשונה ליישום, כדי למצות את אבטחת המחיר הנמוך לצרכנים, (2) שינוי תמהיל האנרגיה חייב להסתמך על כלל הצרכנים, (3) אמינות אספקת החשמל ועמידות הרשת הן קריטיות, (4) ההחלטות היום חייבות להיות בסיס לחדשנות ושינוי בעתיד, (5) רשת החשמל חייבת להיות מתקדמת, (6) התוכנית לשינוי חייבת להתבסס על השפעות שינוי האקלים והיעד להפחתת פליטות, (7) אין אפשרות מושלמת, לכל אפשרות יש השפעות כלכליות ופיזיות שניתן למתן.

הסיכונים שסומנו הם (1) ההשפעה של סגירת מתקנים קיימים על התאמת ההיצע לביקוש ושמירה על הרזרבות הנדרשות בכל מצב חדש, (2) ניתוח של ערך ההספק הנוסף משמש, רוח ואגירה בהשוואה

³ לא מפורט ההבדל בין מתקן-סולארי למערכת PV על גגות הצרכנים. המשך הדוח מתבסס על הבהרות צפויות בעתיד בהתאם לחדשנות בתחום.

לחישובי ההיצע-ביקוש יהוו גורם חשוב בהחלטה על אמינות הרשת לאספקת-החשמל, (3) ניתוח ההיתכנות של השימוש במתקני ייצור קיימים כדי לפתח טכנולוגיות חדשות בעלות מהירות הצתה, יעילות שימוש בדלק וגמישות בהספק הייצור, במטרה לתמוך בקווי ההולכה ואספקת הדלק הקיימים, שיהיו זמינים יותר ככול שיתקדם יישום השינוי ברשת. כמו כן התוכנית תפתח בשלבים הבאים אמצעים להתמודדות עם השפעת אירועי קיצון אקלימיים על אספקת החשמל, כדוגמת הרס של מתקנים סולאריים עקב סערות או מלחמה. הפתרונות צפויים להגיע בחדשנות עתידית.



איור 11: שינוי בתמהיל הכולל בחווי לאיפוס פליטות ב-2045
מקור: [35]

האמצעי של מנהל הרשת, מעבר להורדת העומס בשעות השיא, הוא המעבר לגמישות בניהול ההיצע והביקוש, באמצעות ייצור חשמל בכל שעה ובכל טכנולוגיה באופן מבוזר, ניתוב עודפים בין אזורים שונים ואגירת חשמל. מתקני PV על גגות לא יספיקו, נדרשים מתקנים בהספק גבוה וגמיש-לשינוי גם במרכזי הביקוש וגם באופן מבוזר. המשאבים של הצרכן להפקה ואגירה של חשמל הם האמצעים והטכנולוגיות ש"מאחורי-המונה" (behind-the-meter) שמשפיעים על צריכת החשמל.

הגמישות ואמינות האספקה תתבטא גם בשדרוג של קווי ההולכה והאספקה, שיתבסס על חיזוק קווי ההולכה הקריטיים ועמידותם בתנאי אקלים קיצוניים, שדרוג קווי האספקה שמשרתים מתקנים קריטיים, חיזוק עמודי חשמל שיהוו סיכון לתפעול מחדש של רשת החשמל במקרה של פגיעה עקב תנאי אקלים קיצוניים, שדרוג וניטור תשתיות למניעת שריפות והשפעתן, ניטור מתקנים שיש בהם

סיכון מהצפות, הסרה של עצים וענפים שמסכנים קווי חשמל, **הטמנה של קווי חשמל בעלי חשיפה גבוהה להשפעות אקלים**, חיבור בקווי חשמל בין תתי-אזורים ברשת כגיבוי לאספקת חשמל בעת תקלה בקווים, פיתוח מודלים ומערכי סימולציה למקרים של תקלות ברשת למציאת נקודות התורפה וטיפול בהן. בין היתר נבדקו גם תרחישים של כניסת טכנולוגיות חדשות למשק החשמל ומצב ללא רוח בים.

כמו כן תידרש גמישות בתפעול המערכת ושינוי מהיר של גורמי היצור הפועלים בזמן-אמת, ולשם כך ישודרגו גם כלי ניהול המערכת וניהול המתח והתדר באזורים השונים ובמערכת כולה. ציוד הניהול יכלול את המערכות הקיימות לניטור וניהול לצד הוספה ושדרוג יזום של מתקנים מבזורים של רשת-חכמה (smart fuses, smart reclosers, motor-operated switches and smart fault current indicators), מונים חכמים ומתקנים מבזורים ברשות הצרכנים, מתקנים בהספק גבוה לייצור ממקור מתחדש, שנאים בתחנות משנה ותוכנית סייבר להגנה על הנתונים במערכת. ביזור הייצור החל בפיילוט של מכסות להפקת חשמל בחמישה איים מרכזיים (MW8) ובשלב השני יגדלו המכסות ויבזרו בכל האיים (MW235). נרכשה מערכת לניהול המקורות המבזורים (DERMS) ומוגדרים הסטנדרטים הטכנולוגיים לחיבור ממירים מתקדמים ומונים חכמים לרשת, שבהם קיימת יכולת לטפל בהפרשי מתח, תדר וזרם בהתאם לסטנדרט IEEE 1547-2018. המערכת לניהול הביזור תכלול ניטור של הנעשה ברשת וניתוח הנתונים שנאספים לצורך קבלת החלטות.

אופן חישוב המחיר לצרכן החשמל משתנה גם הוא בהתאם לאופי הייצור והשימוש, אם בשימוש מייד מקומי בחשמל והפרשת שאריות לרשת או בהפרשת כל כמות החשמל המיוצרת לרשת. תכנון מראש של ההספק שמועבר לרשת החשמל יזכה את הצרכן בנקודות זכות, בעיקר אם קיימת גם אגירה מקומית והיצוא לרשת החשמל הוא בשעות השיא של הביקוש. ניתן גם לאגד מספר ספקים ביחד ברשת אזורית באמצעות מיקרו-גריד ולהתייחס אליהם כישות אחת. כמוכן קיימת הגדה נפרדת לצרכנים שלא עושים שימוש בקווי הולכה, כדוגמת השימוש בחשמל ממקור PV על גגות הבית, אגירה, התייעלות בשימוש בחשמל ותוכנה לניהול השימוש ברשתות מקומיות. רשתות וייצור חשמל מקומי יפחיתו את הצורך בשדרוג רשת החשמל המרכזית ויאפשרו אספקת חשמל עצמית בכל אחד מאיי הוואי. ייצור עצמי צפוי לעודד השקעות בתשתיות החשמל, תעסוקה ושגשוג כלכלי לאזורים השונים.

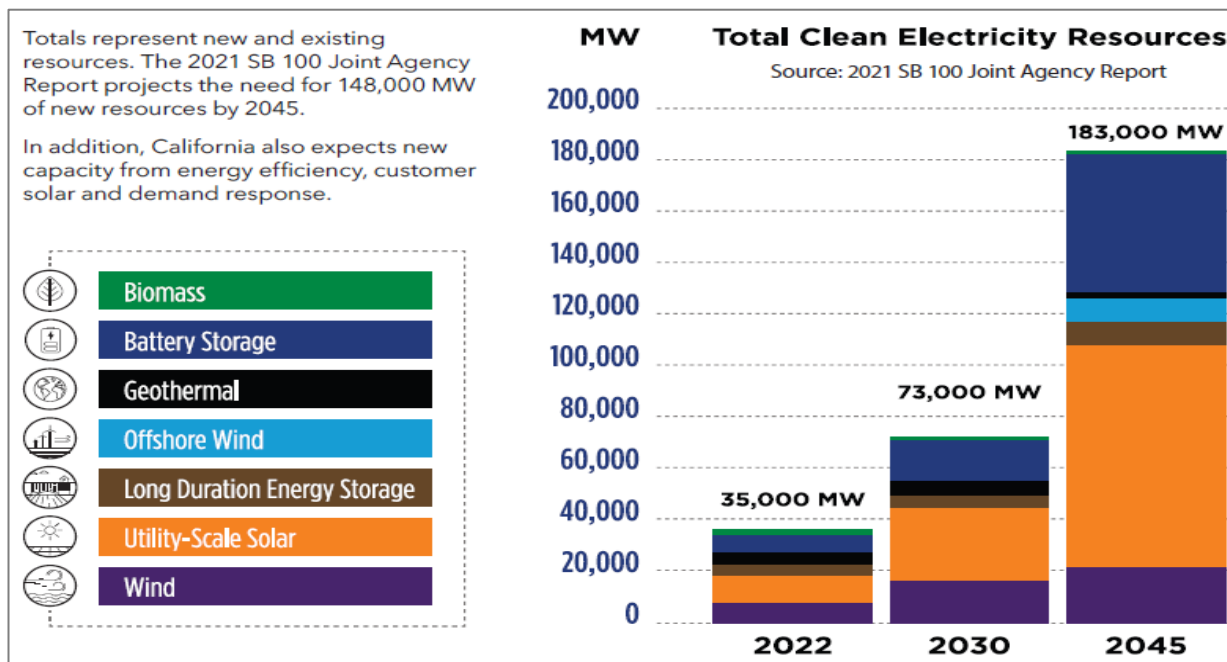
2.3.2 קליפורניה

בקליפורניה בשנת 2021 - 37% מתמהיל החשמל הוא ממתחדשות (ביומסה, אגירה, רוח יבשתי ובים, סולארי וגיאותרמי), 11% ממימן ו-11% גרעין. שאר החשמל (41%) ממקור מחצבי ובעיקר גז. היעד להורדת פליטות ומעבר למתחדשות צופה 90% אנרגיה "נקיה" (מתחדשות, מימן וגרעין) ב-2035 ו-100% ב-2045. כחלק מהשינוי, הספק האגירה יגדל עד שנת 2045 פי עשרה מהיקפו ב-2023 (איור 12) [36].

כדי ליישם את המטרות, תוכנית הפעולה זיהתה חשיבות ביישום האמצעים הבאים –

1. **גמישות מערכת החשמל** – פתוח היכולת של המערכת לאפשר התחברות של סוגי משתמשים מגוונים, בעיקר עקב המגמה לחישמול רוב התהליכים במשק. המטרה היא שרשת החשמל תגיב טוב יותר לעדכונים בביקוש בהתאם לשינויים בזמן אמת. השינוי כולל תקשורת טובה יותר עם יותר מ-40 ספקי חשמל, שמספקים 75% מצרכי המדינה. כהכנה לכך, חשוב להתקין מונים חכמים בכל נקודת חיבור של משתמש (consumer).

2. **הכנת תוכנית, מימון ושדרוג רשת ההולכה** - מנהל רשת החשמל (CAISO) יפתח תוכנית לשדרוג קווי ההולכה והחלוקה כל עשר שנים, כדי להבטיח רשת אמינה, בעלות סבירה ובהתאם למדיניות ורגולציה. התכנון יכול שדרוג רכיבים לטכנולוגיה מתקדמת ושיפור הביזור של קווי ההולכה והתשתיות כנדרש. שיפור הביזור יכול גם שדרוג של תהליכים לחיבור ביו תתי-רשתות (Interconnection processes).



איור 12: תמהיל הספק מותקן מתחדשות ואגירה בקליפורניה לקראת 2045
מקור: [36]

3. **שיפור הניטור של הביקוש לחשמל** – לנטר בפרט את השימוש בתנאים של טמפרטורות קיצון, לשפר את השימוש בנתוני אמת כדי לאבחן בעיות זמניות או אזוריות בביקוש לחשמל, וכן לשים לב למצטרפים חדשים והביקוש שלהם עקב חישמול של תהליכים במשק.
4. **אספקת חשמל אמינה וזולה** – באמצעות הגדלת ייצור חשמל ממקור מתחדש, ובעיקר מרוח בים ובאגירה – באמצעות סוללות, מימן, ואגירה לטווח ארוך. עדכון אשרות ייצור ורכישת חשמל באופן נגיש וזמין אלקטרונית, שדרוג המודלים לתמחור החשמל ושיתופי פעולה וידע להתייעלות והפחתת עלויות
5. **שיתופי פעולה** עם הממשלה והרשויות לתיאום השיפור במערכות החשמל, מעקב אחר בעיות ומציאת פתרונות, בין היתר באמצעות יצירת תתי אזורים וחיזוק שיתופי הפעולה עם כל תתי האזורים.
6. **מעקב וניטור קצב העמידה ביעדים** – התבססות על מגוון מקורות אנרגיה כדי לא לגרום לסיכון עם צמצום המגוון, פרסום אשרות לייצור ותמריצים ברגולציה, הקמת צוות מיוחד למעקב והסרת חסמים

אמינות הספקת החשמל עלתה במהלך השנים 2020-2024 הודות **לשדרוג האגירה בסוללות** של חשמל סולארי מ-500 MW ל-5000 MW. מתקני האגירה בסוללות שהותקנו במהירות בהשוואה לכל

מקור חשמל אחר, הם אלה ששמרו על רציפות ההספקה של החשמל גם בשעות השיא בערבי הקיץ. מחצית ממתקני האגירה הם בדו-שימוש ביחד עם המתקן הסולארי, ומחציתם נבנו כמתקן נפרד [37].

אמצעים נוספים לשדרוג אמינות האספקה הוא המעבר **לרשתות מיקרוגרید ולהטמנת קווי החשמל** באזורי סיכון. אחד הסיכונים לרשת החשמל בקליפורניה הן **שריפות היער**, הנגרמות עקב עונות יובש ארוכות. השריפות פוגעות בקווי ההולכה ובתשתיות לאספקת חשמל, משבשות אספקת חשמל לאזורים רבים לאורך זמן (ימים ושבועות), מקשות על הגישה לטיפול בבעיה וגורמות לעלויות אחזקה גבוהות מהרגיל [33]. השימוש ברשתות חשמל חכמות ומבזדרות (micro-grid) מסייע בהפחתת ההשפעה של השרפות והעלויות לתיקונה הודות לאפשרות לבדד את אזור ההשפעה של השריפה ולהפחית את ההשפעה על שאר רשת החשמל. **הבידוד וההטמנה של קווי ההולכה והשנאים באזורי הסיכון מסייע בהפחתת הנזק והעלויות בעת שריפה. הדבר נכון גם להשפעות אחרות של איתני הטבע כדוגמת רעידת אדמה או גלי צונאמי.** ההשפעה על מתקני ייצור החשמל היא מורכבת יותר, כך לדוגמה במקרה של שריפה באזור בו מתקן סולארי קרקעי לייצור חשמל או מתקן הידרו-אלקטרי שנמצאים בשטחים פתוחים וחשופים יותר לסכנות אלה.

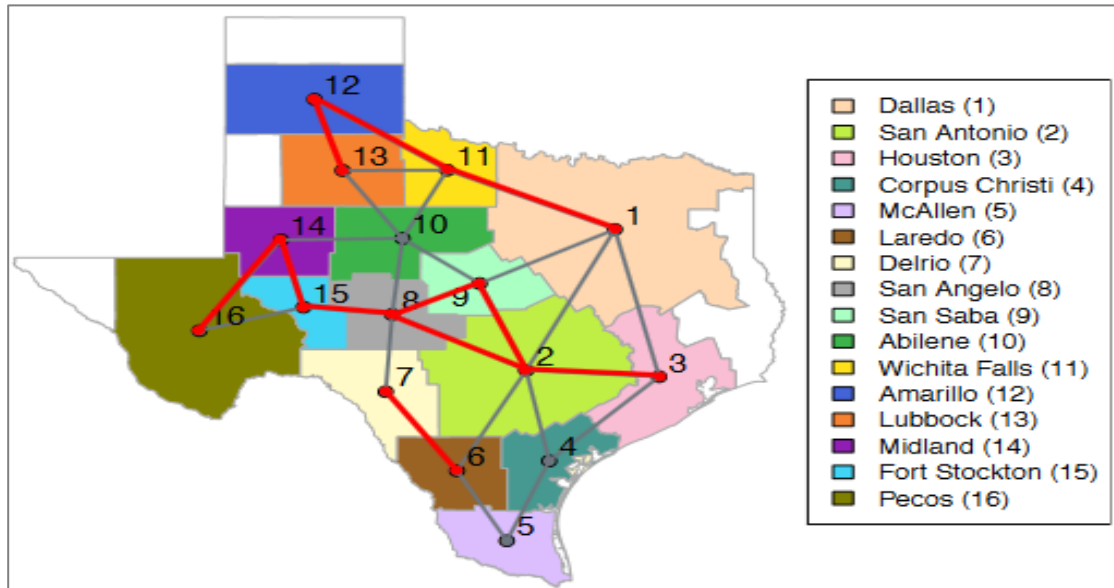
2.3.3 טקסס

בטקסס, שברובה נחשבת לאי-אנרגטי ללא חיבור למדינות שכנות⁴, קיימים 16 מחוזות, שמחוברים ביניהם ברשת חשמל מסועפת (איור 13) [38]. תהליך השדרוג של רשת החשמל החל (קיום אדומים באיור 14) במטרה לעמוד בצפי הביקוש בשנת 2040 ולהוזיל עלויות לצרכני החשמל.

כיום מתבסס ייצור החשמל על גז מחצבי (43%), אנרגיית רוח (25%), פחם (17%), אנרגיה גרעינית (9%), וסולארי (6%). בשנת 2040, על פי תרחיש הבסיס, הכוונה היא להפחית את שיעור החשמל מפחם (4%), מגז מחצבי (29%) ומאנרגיה גרעינית (6%), ולהעלות את שיעור החשמל מרוח (40%) וממתקנים סולאריים (21%). ובסך הכול 40% ממקור מחצבי ו-60% ממקור מתחדש. הצפי לגבי העלויות לצרכן עקב השדרוג הוא שהחיסכון בעלויות ילך ויגדל עד שנת 2040, מכיוון שרוב העלויות עקב שדרוג של התשתיות ברשת החשמל יהיו בעיקר בטווח הקצר.

בטקסס צריכת החשמל היא מהגבוהות בצפון אמריקה וצפוי שצריכת החשמל תגדל בכ-30% בעשור הקרוב, על פי הועדה לאמינות רשת-החשמל (ERCOT - Electric Reliability Council of Texas), שאחראית על 90% מאספקת החשמל בטקסס ו-80% מהפליטות [38]. התשתיות להפקת חשמל מבוססות נפט וגז מחצבי שמופק במקום, לצד חשמל מטורבינות רוח, והצפי הוא לפתח את תחום החשמל ממקור סולארי. מטרת התכנון היא להפחית עלויות לצרכן לצד שמירה על אמינות האספקה והפחתת פליטות. זאת, בפרט בעקבות אירוע קפאון קיצוני בפברואר 2021 (Winter Storm Uri) שגרם לנפילת רשת החשמל ולמחסור בחשמל ובמים למשך שבוע. נפילת החשמל נבעה מהפסקת השאיבה של כמחצית ממקורות אספקת הגז עקב הפסקות חשמל, ציוד שקפא ותנאי מזג אוויר קיצוניים. גם חלק מטורבינות הרוח קפאו ורק מעט תחנות מבוססות פחם עבדו [39].

⁴ כ-90% מהחשמל מנוהל על ידי ארגון ERCOT שמבוסס דלק מחצבי ולא מקיים קשרים עם רשתות חיצוניות. עם זאת 10% מהחשמל מנוהל על ידי ארגונים קטנים יותר להם יש חיבור לגיבוי על ידי מדינות שכנות, ושיעורי התמחיל שלהן לא נכלל בסיכום הקיים.



איור 13: מחוזות רשת החשמל בטקסס, בהן שודרגו הקווים האדומים וישודרגו האחרים בהמשך
מקור: [38]

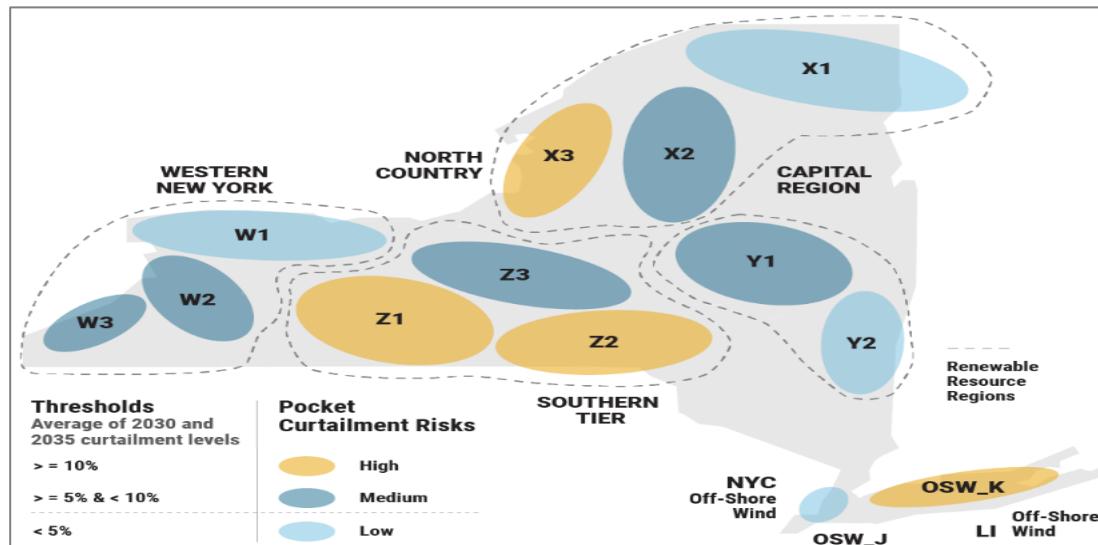
2.3.4 ניו-יורק

במדינת ניו יורק מתכוונים בשנת 2040 לא להסתמך כלל על חשמל מבוסס דלק מחצבי, למרות שרוב ייצור החשמל בשנת 2021 מבוסס על דלק מחצבי. אתגר נוסף הוא שחלק מהאזור מתבסס בעיקר על חשמל ממקור מחצבי בהשוואה לחלק אחר שמתבסס על חשמל ממקור מתחדש, והשאיפה היא לאזן ולגוון מקורות בכל האזורים.

ה-ISO מתכנן לעשורים הקרובים ומזהה את הגורמים הקריטיים להצלחה [40], ובהם:

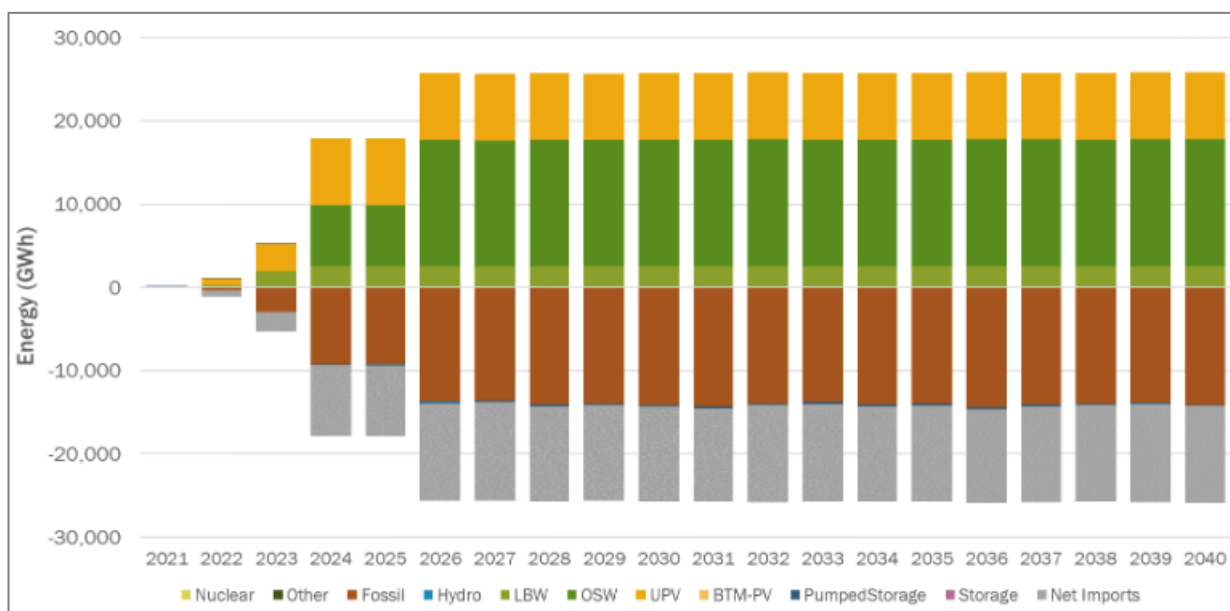
1. נדרשת השקעה רבה בתשתיות להפקת חשמל כדי לספק את צרכי העתיד. מבחינת הספק מדובר בכמות גדולה פי חמישה מהקיים, שתדרוש גם השקעה בקווי הולכה.
2. הוספת חשמל ממקור מתחדש – תהיה בעיקר משמש ורוח, לצד מקורות גמישים להפקת חשמל נקי – שניתן להוסיף ולהסיר בכמות הנדרשת בכל עת (dispatchable emission free resources – DEFRs).
3. חשובה שימת-הלב לתשתיות וקווי הולכה באזורים שכנים ובאפשרות לייבא/לייצא אליהם חשמל לאיזון.
4. אי-וודאות היא הדבר הוודאי ביותר לגבי עתיד רשת החשמל, לכן חשוב בכל מקרה להבטיח אמינות באספקת החשמל באמצעות איסוף תמידי של משוב ושימוש בנתונים להתייעלות.

לשם כך חולקה המדינה לאיי אנרגיה (כיסים) שבהם זהו ההזדמנויות להפקת חשמל והסיכון ביישום כל אחת מהמטרות. כל כיס כולל כמה מרכיבים של תשתיות שרק חלקם בעלי סיכון גבוה וביחד מהווים תמהיל שמאפשר את הבטחת האספקה על פי הביקוש באותו כיס, ובהתחשב בגיבוי האפשרי מהכיסים השכנים (איור 14).



איור 14: כיסי האנרגיה במדינת ניו-יורק, מרכיבי השדרוג, הסיכון וההזדמנות
מקור: [40]

כחלק מהתוכנית חושבו ההבדלים בהספק ובעלות בין תרחיש הגידול בחשמל ממקור מתחדש לתרחיש הבסיס שמגדיל את ההספק בגורמי היצור הקיימים (איור 15). כמו כן זוהו קווי ההולכה שלא יאפשרו מעבר של ההספק הנדרש, בהתאם לתרחישים שונים של חוזים עם ספקי משנה לחשמל ממתחדשות ולניהול של שעות השיא.



איור 15: מיפוי השינוי בהספק בין תרחיש הבסיס לתרחיש המתחדשות
מקור: [40]

(LBW=land-based-wind; OSW=off-shore-wind; UPV=utility-scale-solar; BTM-PV=behind-the-meter-PV)

2.3.5 ניו-אינגלנד (NE)

ניו אינגלנד הוא אזור גאוגרפי בקרן הצפונית-מזרחית של ארצות הברית, המכיל את המטרופולין של בוסטון ושש מדינות – ורמונט, מיין, מסצ'וסטס, ניו המפשייר, קונטיקט ורוד איילנד. החזון המשותף שלהן לעשורים הקרובים כולל ביזור מערכת החשמל והכנת תוכניות להוספת מקורות מתחדשים להפקת חשמל, בפרט מרוח ביבשה ובים, ושדרוג קווי ההולכה – היכן שהכרחי ובהתחשב בעלויות הנדרשות לשם כך. בכוונתם לעודד גם פתרונות אחרים מלבד שדרוג קווי ההולכה, וביניהם – התייעלות בשימוש בחשמל ובאנרגיה והפחתת פליטות בייצור חשמל, וכן חישמול תהליכים ואצירת פחמן.

תמהיל הפקת החשמל ב-NE יכלול בשנת 2035 כ-33% ממקור לא נקי (גרעיני, ביומסה וגז מחצבי) וכ-67% ממקור מתחדש ונקי (PV – מתקן וגגות, רוח ביבשה ובים, הידרואלקטרי ואגירה במתקן הידרואלקטרי ובסוללות). לקראת 2050 יגדל שיעור החשמל הנקי בלבד (PV, רוח בים ואגירה בסוללות) כך שיהווה 83% מהתמהיל (איור 16). הספק המתקנים להפקת רוח מהים משמש כמכסה כללית להכנסת חדשנות עתידית מלבד מתקני רוח בים.

לקראת 2050 ב-ISO-NE חקרו את רשת ההולכה וההשנאה העתידית [9] והגיעו למסקנות הבאות –

1. **הפחתת שעות השיא של הביקוש** לקראת 2050 תפחית משמעותית את עלויות הולכת החשמל, מכיוון שכל עליה בהספק הנדרש בשעות-השיא תביא לעלייה משמעותית בעלויות שדרוג רשת-ההולכה. לכן, חשוב להסיט עומסים לשעות אחרות או להפחית ביקוש באמצעות התייעלות בציד ובתהליכים; על פי הממצאים שעות השיא בחורף הן הגורם העיקרי לצורך להגדלת הספקי יצור.
2. **תיעדוף יישום הפתרונות לאתגרים שברשת** הוא הכרחי וחשוב שייעשה במיקוד באתגרים בעלי סיכוי גבוה להשפעה על הזרימה, שמופיעים בכמה מהתרחישים השונים של הרשת ב-2050, ולטפל בהם בהתאם לסדר עדיפויות וקריטריון מוגדר מראש. כך לדוגמא, בעיות בקווי ההולכה ראשיים שמופיעות ביותר מתרחיש אחד הן בעלות התכנות גבוהה לנזק בהשוואה לסיכון בקווי ההולכה משניים; כמו כן, בעיות שנוגעות בעיקר לעליה-בעומס או להיקף ייצור באזור מסוים – הן לא בהכרח הכי דחופות, ויימצא להן פתרון בזמן הקרוב בתוכניות אחרות. בהשוואה לכך, בעיות בהעברת הספק ממקום למקום ברשת כן ייחשבו דחופות.

Generation Type	Nameplate Capacity (MW)			Availability		
	2035	2040	2050	Summer Daytime Peak	Summer Evening Peak	Winter Peak
Nuclear	3,526	3,526	3,526	100%	100%	100%
Biomass	772	772	772	100%	100%	100%
Natural Gas (CCGT & CT)	15,848	16,548	16,645	100%	100%	100%
Hydro (RoR and Pondage)	1,814	1,814	1,814	Historical	Historical	Historical
Hydro Pumped Storage	1,841	1,841	1,841	Offline	Discharging	Discharging
Battery Energy Storage Systems (BESS)	888	1,395	5,182	Offline	Discharging	Discharging
PV (Rooftop and Ground Mount)	23,714	31,475	56,665	40%	10%/0%*	0%
Onshore Wind	3,006	3,006	3,006	5%	5%	65%
Offshore Wind	9,449	16,633	31,954	5%	5%	40%
Totals	60,858	77,010	121,405			

איור 16: תמהיל הפקת החשמל הצפוי ואופן ההתמודדות עם שעות שיא ב-ISO-NE

מקור: [41]

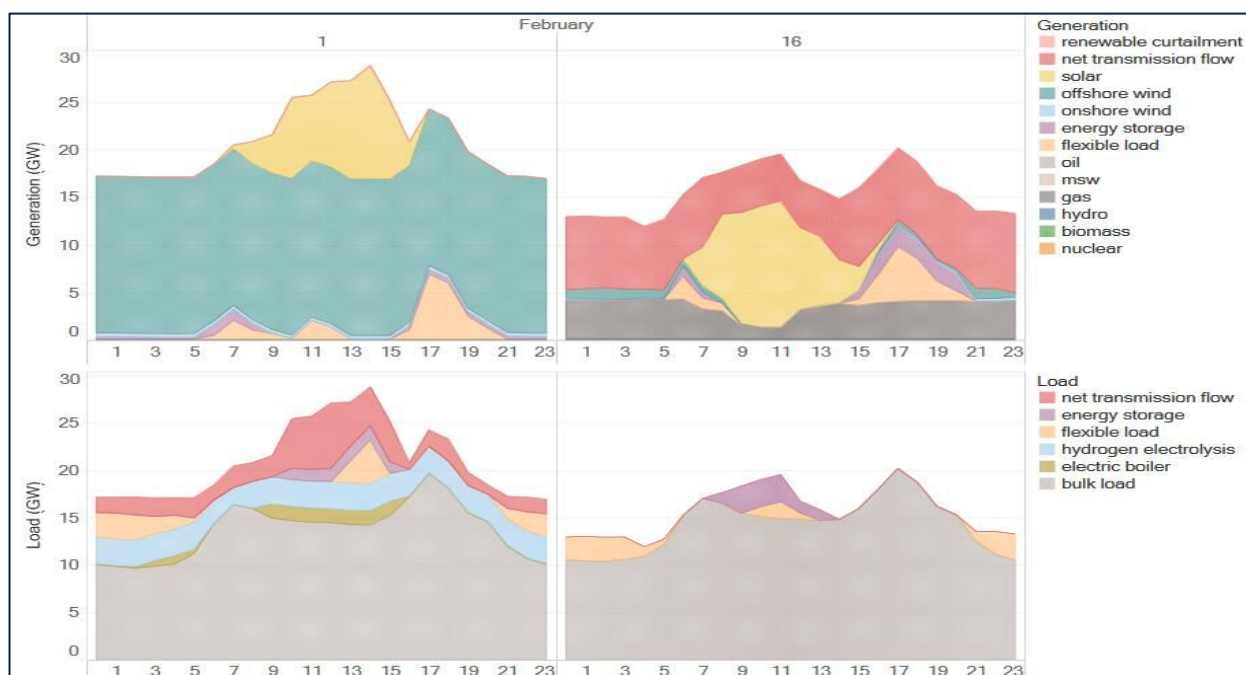
3. **שדרוג מתמשך ברשת ההולכה וההשנאה** לקראת 2050 ניתן לבצע שינויים כשעולה הזדמנות. כמו כן, שדרוג קווים ישנים ייעשה על-פי תוכנית הרשת העתידית ויחסוך טיפול ועלות כפולים.
4. **מיקום המתקנים לייצור חשמל הוא חשוב** ובעל השפעה גדולה על קווי ההולכה והעלות הנלוות, לכן חשובה הקמת מתקני חשמל לצד ערים גדולות להפקת חשמל.
5. **הספק השנאים הוא קריטי** ומשפיע על היכולת להעביר חשמל ברשת – חשוב להוסיף שנאים באופן משודרג ומתוכנן להבטחת אמינות האספקה וניהול העלויות (לא הכול בבת אחת, לוקח שנה-שנתיים לכל שנאי). כיום, מספר רב של שנאים (345/115 kV) נמצאו כעמוסים מדי, עוד לפני שדרוג המערכת (טבלה 3).

טבלה 3: מספר השנאים העמוסים בשעות השיא לפני ואחרי שדרוג רשת החשמל

Year Studied	Number of PTF transformers overloaded	
	Pre-Optimization Results	Post-Optimization Results
2035 (35 GW Winter Peak)	14	16
2040 (43 GW Winter Peak)	56	43
2050 (51 GW Winter Peak)	86	57
2050 (57 GW Winter Peak)	99	81

מקור: [41]

אופי השדרוג ברשת ההולכה וההשנאה יושפע ממיקום תשתית ייצור החשמל, הביזור הגיאוגרפי של העומסים ומיקום החלופות לטיפול בעומסים השונים. כמו כן, ייבחנו מצבי קיצון בתנודתיות של הפקת חשמל ממתחדשות, ובפרט ימים של ייצור שיא מול ימים של ייצור אפסי [42]. ייעשה שימוש בעודפי חשמל בשעות שיא הייצור להפקת מימן באלקטרוליזה ולאגירתו במתקני אגירה ייעודיים. כמו כן, הנחות הבסיס לא הספיקו בכדי לייצר תרחישי אמת, על סמך נתוני העבר, ולכן נוספו אמצעי ייצור כלליים כמשתנה נוסף בתחזיות לעתיד (איור 17).



איור 17: תחזית הייצור בשני ימים של שיא ושפל בייצור חשמל ממקור מתחדש בשנת 2050 ב-NE
מקור: [42]

התרחישים שנלקחו בחשבון היו (1) הוספת קוו-הולכה ראשי ביבשה לחבר בין צפון לדרום, (2) מזעור ההוספה של קווי הולכה, (3) חיבור צפון-דרום בים, נקודה-לנקודה, של ה-HVDC (high-voltage direct current), ו-(4) חיבור לאי בים שעליו יופק חשמל מרוח.

טבלה 4: עלויות בסיס של רכיבים שונים לשדרוג רשת החשמל

Component	Cost
69/115 kV OH line -rebuild	\$5M/mile
69/115 kV OH line -new build	\$7M/mile
230/345 kV OH line -rebuild	\$6M/mile
230/345 kV OH line -new build	\$8M/mile
Autotransformer	\$10M
New breaker -69/115 kV	\$2M
New breaker -230/345 kV	\$2M
115 or 345 kV XLPE	\$35M/mile
HVDC Breaker	\$37.5M
End Platform (wind farm connection to one offshore grid link)	\$112.5M
Middle Platform (wind farm connection to two offshore grid links)	\$142.5M
525 kV Cable	\$10.5M/mile
* המחירים כוללים מחירי חומרים, עבודה, הנדסה וריבית 10%, אך לא כוללים שינויים בעלות עקב השפעות שוק	

מקור: [41]

התוכנית כוללת מספר תתי-תוכניות שונות עם קריטריון לסדרי עדיפות, אחת לזרם קבוע (DC), אחת לזרם חילופין (AC) ואחת לקווי ההולכה בים, עם פירוט לכל אזורי המשנה במדינה. על בסיס תוכניות אלה ניתן יהיה לקבל החלטות ולהעריך את היכולת להתמודד עם אתגרי הרשת, את ההשפעה הסביבתית, את הסיכונים שחשוב לתת עליהם את הדעת ואת החדשנות הטכנולוגית הקיימת והנדרשת ליישום כדי להתמודד עם אתגרי העתיד. העלויות התבססו על מדדים בסיסיים שהוזנו למודל (טבלה 4).

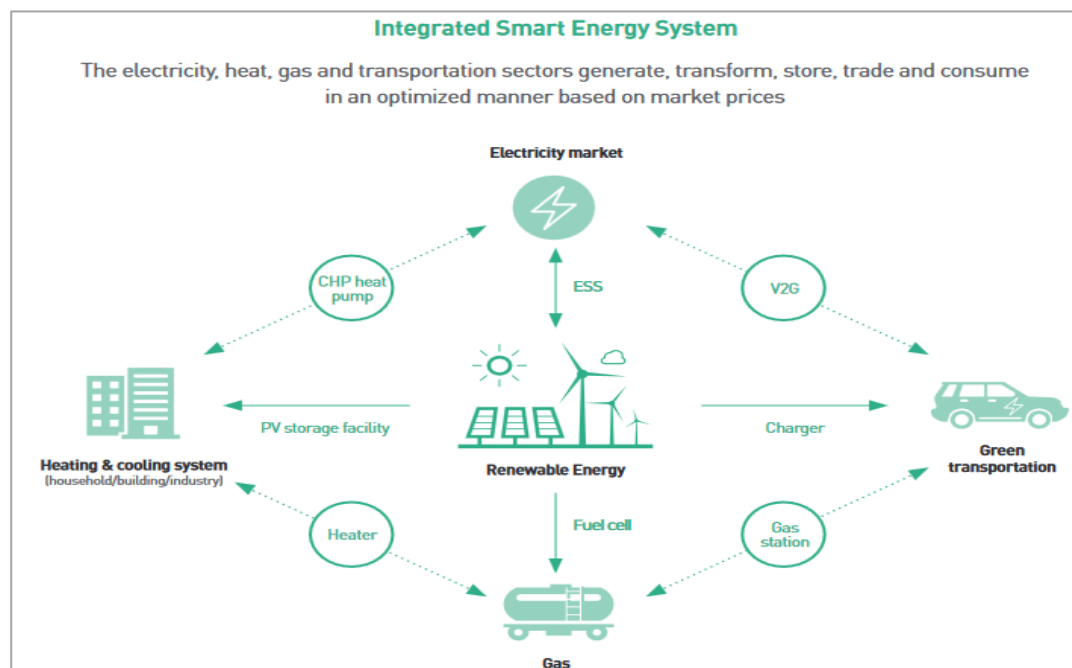
2.4 אסיה ואפריקה

2.4.1 דרום קוריאה

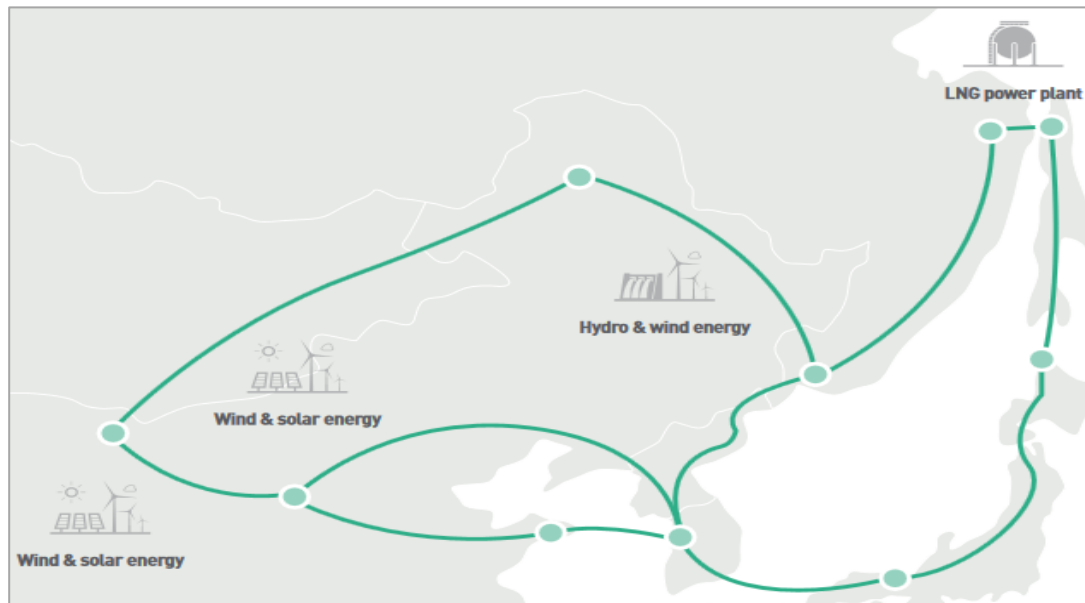
בדרום קוריאה מיקוד התוכנית לשנת 2040 הוא בחיבור בין המעבר למשק חשמל מבוסס מתחדשות למעבר מקורות האנרגיה לנזקקים ומיקוד בתעשיית מימן וכן פיתוח תעשייה וחדשנות בתחומים הנדרשים למימוש השינוי הנדרש במשק החשמל [43]. המטרה היא להפחית ב-40% את הפליטות ב-2040 יחסית לשנת 2018. תמהיל האנרגיה להפקת חשמל בשנת 2036 יכלול 34% גרעיני, 14.4% פחם, 9.3% גז נוזלי (LNG), 30.6% רוח ושמש, 7.1% מימן ואמוניה ו-4% ממקורות אחרים. זאת, בהשוואה ל-33% פחם, 28% גז מחצבי ו-29% גרעיני ב-2022 [44].

לצורך כך יינקטו הצעדים הבאים –

1. משק החשמל בשנת 2040 יכלול 30-35% חשמל ממקור מתחדש במשולב עם הפחתת הפליטות של מזהמים וגזי חממה – באמצעות הפחתת השימוש בנפט ופחם בתעשייה ומעבר לשימוש בגז, לצד צמצום מחצית ממתקני האנרגיה הגרעינית ושדרוג הנותרים.
2. יוקם משק אנרגיה שיכלול את החשמל, הגז והחימום וכן תוקם מערכת לסחר חופשי באנרגיה (איור 18)
3. מערכת החשמל תהפוך למבוצרת ויחברו אליה יצרנים-צרכנים. יוקמו רשתות אזוריות וימונו מנהלי-רשת אזוריים, כך שעד שנת 2030 יהיה 20 מערכות מיקרו-גריד, 40 קהילות אזוריות להתייעלות בשימוש בחשמל, ויוקמו לפחות שלושה מתחמי דירות ככפרי-אנרגיה שיתופיים. היחס לרשת VPP תהיה כמו מתקן חשמל גדול
4. ישודרג כוח העבודה ויותאם לצרכי העתיד, יושקעו כספים במחקר ופיתוח
5. בתעשיית המתחדשות – תוגבר היעילות, האיכות והחדשנות, תוקם תעשיית מימן על שרשרת האספקה שלה – ייצור, אגירה, הובלה ושימוש, וכן יימצאו פתרונות לשימוש באנרגיה נקיה (בעיקר מימן) בתעשייה.
6. סופר-גריד לחיבור עם מדינות שכנות – בדומה לנעשה באירופה תוקם רשת שתחבר את דרום קוריאה עם יפן, סין, מונגוליה ורוסיה (איור 19).



איור 18: המערכת המשולבת של חשמל ממתחדשות ואגירה, אנרגיה (גז/מימן) ותחבורה נקיה
מקור: [43]



איור 19: סופר גריד בצפון מזרח אסיה, לחבר את קוריאה לשכנותיה
מקור: [43]

2.4.2 סינגפור

סינגפור היא עיר-מדינה מדרום למלזיה שצפופה פי-15 מישראל, בנויה על אי מרכזי ואיים קטנים, ובעלת תוצר לאומי לנפש מהגבוהים בעולם. ייצור החשמל מבוסס על גז טבעי 95% ופחם ודיזל 5% [45]. המטרה היא לאפס פליטות ממשק החשמל ב-2050 ולעבור לאנרגיה ירוקה, ובפרט לשילוב של מימן וחשמל משמש, שזוהה כייצור הזול ביותר, ויותקן על גגות, מאגרים ובכל מקום פתוח. הכנת התוכנית לשנת 2050 כללה אי-וודאות לגבי טכנולוגיות בעתיד ולפיכך היא מבוססת על כמה הנחות יסוד [46] –

1. לבחון יבוא חשמל משכנות כגיבוי לאספקה מקומית ולהפחתת פליטות, בשיעור של 40-60% מהתמהיל
 2. לפתח את השימוש במימן ירוק בייצור חשמל להפחתת פליטות, בהיקף של 40-60% מהתמהיל
 3. למקסם את השימוש בחשמל משמש ולהוסיף אגירה לניהול השינוי באספקה
 4. להתחיל להתקין טכנולוגיות אחרות נקיות בהתאם לחדשנות בתחום אצירת פחמן, חשמל גיאותרמי, היתוך גרעיני, ביו-מתאן ואגירה. כך סינגפור תוכל לאמץ את הטכנולוגיות החדשות במהירה.
 5. לפתח ולהשתלב בשווקים בינלאומיים לסחר בפחמן
 6. לפתח רשת חשמל רב-שכבתית (multi-layer) לבקרה וניהול מתחדשות, הגברת אמינות האספקה והפחתת סיכונים, וכן לתקשורת נתונים במבנה מבוזר ולא ממורכז.
 7. להשתמש בטכנולוגיות דיגיטליות לשיפור התהליכים לתכנון הרשת ותפעולה
 8. ניהול אקטיבי של הגידול בביקוש כדי לנהל את השינוי במחיר ואת הכניסה של טכנולוגיות חדשות
 9. לשפר את רשת החשמל באמצעות טכנולוגיות חדשות לניהול הביקוש אצל הצרכנים
- התכנון יתבסס על –

1. בניית גמישות ברשת החשמל שתאפשר שימוש בטכנולוגיות שונות

2. לבנות את סינגפור כאתר ליישום ראשוני של טכנולוגיות חלון וכמעבדה-חיה ליישום עבור שאר המדינות

התרחישים כוללים בעיקר מימן ויבוא חשמל בשילוב עם שמש ואגירה, חשמל גרעיני וגיאותרמי, בשיעורים שונים.

2.4.3 מדינות נוספות

■ יפן

יפן מורכבת ממספר איים שמהווים אי-אנרגיה ומירב "תעשיית החשמל" שלה מרוכזת בכעשר חברות להפקת והולכת חשמל מבוסס כורים גרעיניים ודלק מחצבי [47]. מאז 2015 רשת החשמל נבנית מחדש כדי לחבר ולתאם בין כל גורמי הייצור והוקם ארגון ה-OCCTO (Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators). לקראת 2030 הממשלה צופה שתמהיל ייצור החשמל יתבסס על 36-38% חשמל ממקורות מתחדשים – סולארי-23%, אגירה שאובה-8%, הידרואלקטרי-6% וטורבינות רוח-4%, ושאר החשמל ייוצר מפחם-15%, גז נוזלי-24%, גרעין-10% ונפט-8%. יפן התחייבה לאפס פליטות עד שנת 2050 ומגדילה בשנים האחרונות את היקף ההשקעה בחשמל ממקורות מתחדשים במודל מבוזר שבו חברות פרטיות יהיו אחראיות על הפקת חשמל במסגרת חוזה התקשרות. בין היתר יופקו עד 2040 TW45 מרוח בים [48] ויוקמו מתקנים סולאריים, חשמל מביומסה והידרואלקטרי. במקביל מתקיים שדרוג מערכת ההולכה ומותקן ציוד מתקדם לניטור וויסות מתח כדוגמת STATCOM במטרה לשפר אמינות אספקה. השוק לסחר בהספק חשמל (JEPX-Japan Electric Power Exchange) מנהל סחר בהספק בכמה מסגרות – תחזית למחר בעדכונים כל 30 דקות, סחר לתקופות עתידיות ידועות מראש, וסחר יומי לשיפור ההתאמה בין ביקוש להיצע [49].

לא נמצאה תוכנית ISO לשנת 2040.

■ אינדונזיה

הרשת באינדונזיה מבוזרת מאוד בין עשרות איים שמהווים אי-אנרגיה ומירב החשמל נצרך בשלוש הערים הראשיות. הייצור מבוסס בעיקר על דלק מחצבי – פחם, גז ומעט דיזל והידרואלקטרי. אחת האפשרויות לשנת 2027 היא להגדיל הספק נדרש באמצעות חשמל משמש ורוח בלבד [50].

לא נמצאה תוכנית ISO לשנת 2040.

■ מצריים

במצריים, מדינה ים-תיכונית, 20% מהפקת החשמל היא ממקור מתחדש והיעד של הממשלה הוא להגדיל עד שנת 2030 את שיעור המתחדשות ל-42% ועד שנת 2040 ל-60% בהתבסס על חשמל משמש ורוח [51]. כיום יש במצריים בעיקר חשמל מגז מחצבי ומעט מאוד חשמל מרוח. במצריים קיים חיבור גז מחצבי לישראל.

לא נמצאה תוכנית ISO לשנת 2040.

■ מרוקו

במרוקו, מדינה ים-תיכונית, כ-40% מהחשמל מופק כיום ממקור מתחדש בתמהיל שכולל פחם-37%, גז מחצבי-18%, הידרואלקטרי-17%, רוח-13%, שמש-8% ונפט-7% [52]. המטרות לשנת 2030 כוללות

מעבר לחשמל ממקור מתחדש בהיקף של 50% מההספק המותקן - 22% משמש, 22% מרוח ו-16% הידרואלקטרי [53].

לא נמצאה תוכנית ISO לשנת 2040.

3. השלכות על התכנון בישראל

תוכניות ה-ISO בעולם לשנים 2040, 2045 או 2050 כוללות אתגרים דומים לאלה שיש לישראל בתהליך תכנון רשת החשמל לשנת 2040. כך לדוגמא, התוכניות האתגרים במדינות שבהן ייצור החשמל ממתחדשות מתבסס בעיקר על חשמל סולארי ולא רוח (אוסטרליה, הוואי, קליפורניה וניו-אינגלנד), מדינות שהן אי אנרגיה וכנראה יישארו כאלה גם בעתיד (ניו-זילנד, אוסטרליה, הוואי) או שיש בהן מחסור בקרקע שמשפיע על ביזור המתקנים (הוואי ודרום קוריאה), וכן מדינות שבהן נעשה תפעול מהיר של צרכנים ויצרנים לאיזון הספק ותדר ברשת החשמל (בעיקר אוסטרליה, קליפורניה וניו-אינגלנד, אנגליה ודנמרק).

בכל נושא לאורך הפרק מצוינות בסוגריים המדינות שנסקרו ובהן ניתן למצוא פירוט באותו נושא. בכל המדינות המטרות כוללות צורך לאזן הספק ותדר, לספק חשמל באמינות ובמחיר סביר ולהתמודד עם כשלים במהירות. בהתאם לאתגרים ולמאפיינים המיוחדים לכל מדינה, מתבהרים האמצעים המרכזיים ששולבו זה בזה כפתרונות והופיעו בדרך זו או אחרת בכל תוכנית – ביזור מקורות וגיוון, תמהיל גמיש, אגירה ממשית או וירטואלית (באמצעות רשת מימן או חיבור בין-אזורי) ומכשור חכם ומתקדם.

האתגרים והפתרונות (טבלה 5) מספקים מסגרת טכנולוגית להנעת תהליך התכנון. בפרק זה נסקור נקודות חשובות שעולות מהמדינות השונות ונתמקד בהמלצות לתהליך התכנון בישראל.

טבלה 5: אתגרים ושילוב פתרונות בתכנון לשנת 2040 – מידע מהעולם שרלוונטי לישראל

פתרון אתגר	ביזור מתקני החשמל	תמהיל מתקנים מגוון <u>גמיש וזמין</u>	אגירה	חיבור קווי חשמל ומימן בין אזורים	מכשור מתקדם ברשת
הספק לפי ביקוש, כולל בשעות שיא	הפחתת שיא ביקוש כללי בעזרת איזון בין- אזורי; טיפול מקומי בשיא ועודף	גמישות וגיוון בזמינות ובמקור האנרגיה שמושפע משוק עולמי	איזון זמין בשעת מחסור, חלק מהמתקנים של ISO וחלק של צרכנים	גיבוי הדדי בין- אזורי בחוסר או עודף הספק יותר קווים	ניטור, איסוף נתונים לאורך זמן וניתוחם, והבנת נקודות כשל
איזון תדר ומתח	מקורות מתחדשים מבוזרים יוצרים תדר משתנה, ניתן לאזן ברמה המקומית	תמהיל של מתקני חשמל זמינים לשימוש מידי באיזון פערי הספק ותדר, מתח ואינרציה	מספקת מקור חשמל יציב ומאזנת.	מסייע לאיזון התדר והמתח (דנמרק). פיתוח רשת מימן לשימוש מהיר בתעשייה	נדרש רכש ציוד, ללא תלות בשיעור המתחדשות
אמינות ורציפות אספקה	כשל מקומי ולא מערכתי, הפחתת סיכון	אפשרות לפתרון מהיר בעת כשל	פתרון בעיות זמניות בקווי	גיבוי הדדי בין אזורים	ניטור והתראה

		הולכה וגיבוי לעת כשל		בהשוואה למקור מרכזי אחד	
שימוש במונים חכמים ידייק את החיוב לפי שעה וצרכן	הפחתת העלות בשעות השיא, עלות קווים זניחה בהשוואה למתקנים	הפחתה של עלות שעות שיא ולכן את המחיר	הפחתה של עלויות הון ותשתיות חירום ולכן גם הפחתה של מחיר החשמל	יאפשר שוק חשמל פעיל, תחרות, שיא צריכה נמוך ומחיר נמוך	מצעור עלויות
מגדיל פגיעות וסיכון	מגדיל סיכון להשפעה נרחבת	מאפשרת התאוששות מהירה	ניתן לבדד תשתיות ולהפעיל חלופות	ניתן לבדד אזורים נפגעים בשימוש ב- microgrid	סיכון מתקפת סייבר או גל- אלקטרומגנטי
ניטור ואיתור כשל מיידי יקטין נזק	הטמנת קווים תקטין סיכון מאירועי קיצון	גיבוי למתקן שנפגע בעת כשל	פגיעה חלקית באזור הסיכון, לא בכל הרשת	ניתן לבדד אזורים בעת שרפה ולספק חשמל מאזור שכן	סיכון עקב אירועי אקלים

3.1 הכנות לגיבוש תוכנית

המטרה המרכזית בתוכניות שנסקרו לשנים 2040-2050 היא ייצור חשמל נקי מפליטות. לשם כך, נדרשה בכל מדינה הבנה והסכמה על תמונת המשק העתידי הרצוי – מה היא תכלול ואיך תתופעל.

על סמך התמונה העתידית גובשו תרחישים למשק החשמל לשנת 2040, שמשלבים פרטי תמהיל ופתרונות לאתגרים עיקריים בתהליך השינוי מהמצב הקיים ועד לשנת היעד. בהתאם לתוצאות המידול של התרחישים – נבנתה התוכנית ליישום השינוי (פירוט על תהליך המידול בסעיף הבא).

בניית התמונה העתידית מחייבת שלב מקדים של איסוף נתונים, שחשוב שיכלול את -

1. הביקוש להספק - על פי שינויים באוכלוסייה, בשימוש בחשמל בתעשייה ובתחבורה בעשורים הקרובים
2. מאפיינים גיאוגרפיים - עתודות הקרקע למתקנים ותכנון מרכזי הביקוש בעשורים הקרובים, מרכזים קריטיים לאספקת חשמל, זמינות משאבי טבע מתחדשים כדוגמת שמש ורוח
3. ייצור עתידי - טכנולוגיות נקיות ומתחדשות זמינות וכדאיות לשימוש בעשוריים הקרובים, מגוון אפשרי וכדאי לשילוב
4. ניהול הרשת - מתודולוגיות אפשריות לאיזון ביקוש-היצע ותדר, זיהוי הכשלים המרכזיים כיום ומה צפויים להיות הכשלים והחסמים בתפעול הרשת בעתיד, וכן טכנולוגיות לניטור וניתוח מידע באופן שוטף לתפעול הרשת וחיזוי מראש של כשלים.
5. ניהול עלות - מתודולוגיות לניהול מחיר ושוק החשמל, בפרט בהתחשב בהתקנת מונים חכמים, ניהול של יצרנים-צרכנים רבים ושימוש בחשמל "מאחורי-המונה".

הנתונים שנאספו בסקר זה מספקים דוגמאות לחלק מהמידע הנדרש, בתחום הטכנולוגי והמתודולוגי (בעיקר סעיפים 3-4-5 ברשימה הנ"ל). תחזיות לביקוש וייצור בישראל (סעיפים 1 ו-3) ניתן למצוא במודלים של משרד האנרגיה [54], באקדמיה [55] ובארגונים אחרים [56]. התייחסות למחסור בקרקע ולתכנון קווי ההולכה והאספקה (סעיפים 2 ו-4) ניתן למצוא בדו"חות של נגה וחח"י [57] [58].

פירוט נוסף לגבי המצב בישראל קיים בנספח המצורף לדו"ח זה ופורט בהתאם לסעיפים הבאים בפרק הנוכחי.

שקלול של כל המידע הקיים יאפשר זיהוי של האתגרים בישראל במעבר מהמצב הקיים למצב העתידי ועיבוד התרחישים שכדאי לבחון במודלים לחיזוי השינוי ואופן היישום שלו. הסעיפים הבאים מוסיפים מידע ומחדדים את המסר שעולה מהמידע הקיים, ובסיכומם יפורטו ההמלצות שנובעות מדו"ח זה.

3.2 תרחישים נפוצים בתכנון

הקריטריונים המרכזיים שנכללו בתרחישים לתכנון משק החשמל בשנת 2040 זהים ברוב התוכניות מאחר והתמונה העתידית של רוב המדינות היא שוק חשמל מבוסס חשמל ממקור מתחדש. בכל מדינה התרחישים עודכנו בהתאם לאופי ומידת השינוי הנדרש באותה מדינה.

הבסיס לתוכניות חשוב שיכלול את הנושאים הבאים:

1. תמהיל טכנולוגי –

- תרחיש גידול על פי מצב קיים (baseline)
- תרחיש על פי רמת הבשלות של טכנולוגיות עתידיות שמתאימות לכל אזור בישראל והאפשרות לשילובן ברשת
- תרחיש על פי רמת הביזור והאימוץ של טכנולוגיות ייצור אצל היצרן-צרכן (צרכן שיש לו גם מתקן ייצור כדוגמת PV או אגירה ברכב חשמלי). זהו תרחיש מרכזי בכל המדינות ובפרט בהוואי וקליפורניה.
- בכל אחד מהתרחישים שוקלל גם הצורך בשדרוג קווי החשמל ומתקני ההשנאה והניטור ברשת.

2. עלות-תועלת של כל תמהיל –

- העלות ליישום השינוי נעשה על פי חישוב LCOE צפוי לכל טכנולוגיה (איור 20). עלות הפקת החשמל משתנה בהתאם לטכנולוגיה, לזמינות הדלק או המשאב עליו הטכנולוגיה מתבססת וכן על פי מאפייני המדינה בה החשמל מופק. עם זאת, ניתן להעריך בכל מדינה את טווחי המחירים והיעילות להפקת חשמל בטכנולוגיות שונות ולהתחשב בזה בגיבוש התוכנית ובתרחישים. כך לדוגמה חשמל ורוח יהיו זולים בהרבה בהשוואה לאנרגיה גרעינית באירופה ובארה"ב [3]. כמו כן, מסתמן שהעלויות שיושקעו בטווח הקצר יפחיתו עלויות בטווח הארוך (ארה"ב), בעיקר הודות לעלות הפקת קוט"ש במתחדשות ולקיצוץ בעלויות דלק. רוב העלות צפויה להיות מושקעת בעשור הקרוב, ומטרתה לטפל בביקוש בשעות השיא – לכן, הפחתת הביקוש בשעות השיא פירושה הורדת עלות.
- התועלת של כל אפשרות ליישום על פי האופן בו כל תמהיל עונה על מטרות התוכנית – לדוגמה בהפחתת פליטות ובשיפור אמינות האספקה בטווח הקצר והארוך, ובפרט במזעור הפרשי ההספק בשעות השיא והשפל (ניו-זילנד, אוסטרליה, דנמרק ואנגליה, וכל מדינה בה מחיר החשמל הוא דינאמי ונקבע על פי תמהיל הייצור). כמו כן כחלק מהעלות נותח מספר קווי ההולכה שיש להוסיף או לשדרג והיו תרחישים שמדדו את ההשקעה הנדרשת בקווי ההולכה ושדרוגם (ניו-אינגלנד).

- בניו-אינגלנד, נבחנו תרחישים להפחתת הסיכון במערכת על ידי (1) הוספת קווי-הולכה ראשי ביבשה לחבר בין צפון לדרום, (2) מזעור ההוספה של קווי הולכה, (3) חיבור צפון-דרום בים, נקודה-לנקודה, של ה-HVDC, ו-(4) חיבור לאי בים שעליו יופק חשמל מרוח.

	Financing rate (%)	Capital costs (\$/kW)			Capacity factor (%)			Fuel, CO ₂ and O&M (\$/MWh)			LCOE (\$/MWh)		
	All	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
United States													
Nuclear	8.0	5 000	4 800	4 500	90	80	75	30	30	30	105	110	110
Coal	8.0	2 100	2 100	2 100	20	n.a.	n.a.	90	170	235	220	n.a.	n.a.
Gas CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	55	25	n.a.	50	80	105	70	125	n.a.
Solar PV	3.7	1 140	620	420	21	22	23	10	10	10	50	30	20
Wind onshore	3.7	1 540	1 420	1 320	42	43	44	10	10	10	35	35	30
Wind offshore	4.5	4 040	2 080	1 480	42	46	48	35	20	15	115	60	40
European Union													
Nuclear	8.0	6 600	5 100	4 500	75	75	70	35	35	35	150	120	115
Coal	8.0	2 000	2 000	2 000	20	n.a.	n.a.	120	205	275	250	n.a.	n.a.
Gas CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	40	20	n.a.	65	95	120	100	150	n.a.
Solar PV	3.2	790	460	340	13	14	14	10	10	10	55	35	25
Wind onshore	3.2	1 540	1 420	1 300	29	30	31	15	15	15	55	45	40
Wind offshore	4.0	3 600	2 020	1 420	51	56	59	15	10	5	75	40	25

איור 20: עלויות הפקת חשמל מטכנולוגיות מרכזיות בעשורים הקרובים (LCOE) מקור: [3]

3. תפעול גמיש ומגוון –

- ריבוי אפשרויות או חוסר מידע לגבי טכנולוגיות והיקף ביזור - כך לדוגמא הזמינות והכדאיות של חשמל גיאותרמי, או רמת הבשלות של היתוך גרעיני של מימן, או אופן הניהול של יצרנים-צרכנים רבים והצורך האפשרי במיקרו-גריד ובניהול אזורי. התרחישים ייתכן ויכללו שיעור משתנה של יצרנים-צרכנים ושיעור הטמעה שונה של מיקרו-גריד, לצד פיתוח קווי הולכה בהתאמה לנדרש (הוואי, דרום-קוריאה, ניו-יורק).
- אמצעים לייצוב תדר ואמצעים להתאוששות ממחסור ביצרנים ובהספק חשמל זמין. התרחישים כללו אפיון של מספר וסוג היצרנים-צרכנים שיש לנהל כדי לתפעלם ברשת הדינאמית (דנמרק, אנגליה), או תרחישים על פי אופי הניטור הנדרש לאיסוף תמידי של נתונים וניתוחם (אוסטרליה, דנמרק).
- אופן ההתאוששות המהיר והיעיל ביותר ממצבי כשל – התרחישים כוללים שימוש בניטור וחיזוי כשלים לצד חיזוק הדרגתי של רשת החשמל (אוסטרליה, הוואי). כך לדוגמא קיימים גם שילובים של פתרונות – בשילוב מיקרו-גריד וניהול אזורי של כשלים עם תמהיל טכנולוגי מגוון להפחתת הסיכון (ארה"ב), וכן שדרוג והטמנת קווי חשמל כהגנה מפני פגעי אקלים (הוואי).

רשת החשמל זוהתה כאחד התחומים שיפיקו תועלת משמעותית מתחום ניתוח-הנתונים והבינה המלאכותית, בפרט בתחום הניטור והאחזקה של רשתות מבזרות ומורכבות כדוגמת רשתות החשמל הדינאמיות [59].

3.3 תמהיל טכנולוגי גמיש

הדגש בכל התוכניות הוא על הפחתת פליטות ולכן תמהיל הטכנולוגיות מתמקד בטכנולוגיות "נקיות", שממטות בפליטת פחמן דו חמצני, כדוגמת חשמל הידרואלקטרי או גיאותרמי לצד טכנולוגיות מבוססות מקור מתחדש וללא פליטות כדוגמת רוח ושמשי. ההמלצה בכל התוכניות, בפרט עקב המעבר למקורות מתחדשים, הוא לגוון את מקורות החשמל בכל רשת ובכל אזור. הטכנולוגיות שצפויות להיות רלוונטיות בשנים 2040-2050 כוללות בין היתר מתקנים של סולארי (מתקן), PV-מבזר, אגירה-מרכזי, אגירה-מבזר, מתקן-אגירה, רוח-ים, רוח-יבשה, הידרו-אלקטרי, מימן, גיאו-תרמי, ביו-דלק, ביומסה ופסולת, גז מחצבי, פחם, נפט-דיזל, גרעין, ויבוא.

החלוקה בתמהיל בין סוגי המתקנים השונים תלויה בתוכנית ובמצב הרשת הקיים והעתידי בכל מדינה. כך לדוגמא,

- **גיוון במקורות החשמל** – בכל אזור ובכל המדינה היא האסטרטגיה המרכזית לשמירה על יציבות האספקה והפחתת הסיכון. כך לדוגמא בניו-יורק, היה חשוב בכל אזור למקם מתקנים מסוגים שונים ולא להתמקד בסוג אחד. לכן, גם במקרה שמשמש מקור מרכזי לחשמל – חשוב גיוון של מקורות שונים בכל חלק ואזור של הרשת. בדוגמא נוספת בניו-זילנד, רוב האספקה הייתה מחשמל הידרואלקטרי, אך השפעות שינוי האקלים על זמינות המים כמשאב בתהליך הפקת החשמל הגדילה את הסיכון שבשימוש בו ולכן נדרש גיוון עם הגדלת ההספק של חשמל גם מרוח ושמשי.
- **תמהיל גמיש** – יש תוכניות (כדוגמת דנמרק וניו-זילנד) שמנהלות מתקנים כדוגמת צי רכב חשמלי או מפעל שצורך חשמל לחימום מים (בוילר) בתעשייה, שמשמשים להוספת או גריעת הספק מהרשת על פי הצורך לאיזון הספק בין היצע לביקוש וכן לאיזון התדר. מתקן סולארי או מתקן אגירה ייתכן ויוגדר על פי רמת ההספק שלו או על פי הבעלות עליו – פרטית, בבעלות היצרן-צרכן, או מרכזית בבעלות הגוף המנהל את רשת החשמל (לדוגמא בהוואי ואוסטרליה).
- **גיבוי בין-אזורי בין רשתות מיקרו-גרید בניהול עצמאי** – מיושם כשניתן. לחילופין, ייצוב הרשת מתבסס על שיעור של כ-5% מהתמהיל העתידי שמבוסס על מתקנים יציבים כדוגמת גיאותרמי וגז (אוסטרליה וניו-זילנד).
- **מימן** הוא אפשרות נוספת לאיזון הספקים ותדר - ע"י חיבור של משק החשמל למשק האנרגיה באמצעות צנרת המימן (בדנמרק ואנגליה). הצנרת משמשת ככלי לתעבורת אנרגיה – בזמן שההיצע גבוה מהביקוש משתמשים בחשמל לייצור מימן ומעבירים אותו להפקת אנרגיה בתעשייה בצינורות הגז הקיימים וכתחליף לדלק מחצבי אחר. האגירה של המימן ליצור חוזר של גז היא אפשרות פחות יעילה, עקב המרות רבות של האנרגיה ואיבוד הערך.
- **הפקת חשמל מפסולת** – הפקת אנרגיה מפסולת היא מקור נוסף לייצור חשמל זמין כגיבוי בהפעלה בשעת הצורך במרכזי עומס. ניתן להשתמש בתהליכים פיזיקליים ולהפיק ישירות אנרגיה משריפת פסולת או להשתמש במתקני תסיסה אנאירובית בהם מייצרים מתאן. המתאן יכול להישרף בגנרטור במתקן הטיפול בפסולת או להוליכו בצנרת לתחנת כוח מונעת בגז. בדנמרק, לדוגמא, מתכננים כמה מתקני ביוגז באזורים בהם הרשת עמוסה. ככל שמתבססים על הולכת הגז,

פתרון כזה ידרוש שדרוג של רשת הגז. הפסולת שנשרפת בכל אירופה היא מקור לחשמל, עם אפשרות לאצירת הפד"ח הנפלט בתהליך בעתיד.

- בתוכניות בהן לא קיים מספיק ידע לגבי היישום בעתיד (כדוגמת הוואי), חשמל מרוח או אגירה משמשים בשם זמני כלשהו לייצוג טכנולוגיות עתידות שייכנסו לפעולה בעתיד. המטרה היא לתכנן לפי התמונה העתידית של הרשת, למרות המחסור בידע.

בישראל מתפתחים תנאים לשוק מגוון עם תמהיל גמיש. הודות לרפורמה במשק החשמל [60], מתחילים להתהוות תנאים מספקים לקיום שוק דינאמי ותחרותי. בתחום האספקה - חברות פרטיות כבר מתחרות בחברת החשמל על גיוס הלקוחות והאספקה. נכון לנובמבר 2023, 17 אלף משקי בית עברו לספקי החשמל הפרטיים. מדובר בשוק מתפתח שנמצא רק בראשית דרכו. כמו כן, בתחום איזון ההספק ברשת - הורחבו הסדרי ה"השלה מרצון" והוגדלו הסכומים המוצעים לצרכני החשמל המשתתפים בהם. ההסדרים מאפשרים לחברת ניהול המערכת לבקש בזמן חירום מצרכנים להפסיק את השימוש לשעות מסוימות על מנת "להקל" על רשת החשמל בשעת ביקוש חריגה. ההסדרים מתאימים גם לצרכנים המפעילים מתקני חשמל (גנרטורים) בתוך המפעל. השתלבות התעשייה, צרכני-חשמל גדולים בהסדרי ניהול ביקוש, במטרה לעזור למשק החשמל, מתוגמלת בתמורה כספית גבוהה [61].

3.4 אמינות אספקה וניהול סיכונים

אמינות האספקה תלויה בכל מרכיבי הרשת – החל בתכנון ויישום תמהיל המקורות ורמת הגיוון הטכנולוגי בכל אזור, המשך במידת הביזור והשימוש ברשתות-משנה (מיקרו-גריד), קווי ההולכה וטכנולוגיות האספקה, וכלה בניטור להפחתת הסיכון, תפעול אמין וחיזוי כשלים. בניתוח הסיכונים למערכת החשמל בישראל נמצא כי קיימים חסמים (כל מה שיכול להפריע או למנוע מהמערכת לתפקד ולעמוד ביעדים שנקבעו) ואיומים (כל דבר שיכול לפגוע, להזיק או להרוס חלק מהמערכת) שישפיעו על היציבות וההתאוששות של רשת החשמל עקב כשל בטווח הקצר, וכן על העמידות והחוסן האנרגטי בטווח הארוך (איור 21).



איור 21: איומים וחסמים מרכזיים לפיתוח רשת החשמל
מקור: [62]

החסמים המקומיים המרכזיים לפיתוח הרשת בטווח הארוך, שזוהו בהסתמך על חוות דעת מומחים, כללו (1) קונפליקטים בין גופים ציבוריים (לדוגמא – התיאום החסר בין רשות החשמל, חח"י ונגה [63]), (2) היקף השקעות נמוך לפיתוח תשתיות, (3) התנגדויות הציבור לפיתוח (לדוגמא – גרעין וטורבינות רוח [62]), (4) מחסור במנגנונים רגולטוריים (לדוגמא – מס פחמן ואצירת פחמן), (5) מגבלות סטטוטוריות (לדוגמא – מחסור בקרקע) וכן (6) תחרות על משאבי מתחדשות ואגירה (לדוגמא – קווי ההולכה החסומים). רוב החסמים הם רגולטיביים והם נבדקו בשלושה תרחישים של תמהיל ובהם – תרחיש עסקים כרגיל, תרחיש עתיר מתחדשות ותרחיש עם שילוב גרעין [62].

קיימים גם איומים על בטחון האנרגיה ובפרט על אספקת הדלק המחצבי עליו מתבסס שוק החשמל בישראל, והם כוללים – פעולות איבה (התקפת טילים/רקטות, חבלה), אסונות טבע, ותקיפות סייבר ודופק אלקטרומגנטי. איום הטרור גדול בישראל יותר מאשר בשאר מדינות המערב, איומי הטבע משמעותיים עקב היות מדינת HOT SPOT אקלימי והמוכנות הנמוכה לנושא בישראל, והסייבר הוא נושא חדש שבכל העולם עדיין לומדים כיצד להתמודד עמו [64] [65].

השילוב של ניהול-סיכונים בתהליך התכנון של רשת החשמל העתידית הוא אפשרי באמצעות יצירת מערך תכנוני מרובד, שמבוסס על כמה מודלים שמתכללים ביחד את ההשפעות החיצוניות לצד אמינות אספקה ועלויות ליישום בכל סיכון (איור 22). המודל המשולב מתבסס על נתונים מניטור מתמיד של הרשת והזנתם בשלושה מודלים מרכזיים של אופטימיזציה, שבכל אחד נמדדת ההשפעה על מדדים ברשת החשמל – גידול בביקוש, אמינות, עמידות, כדאיות-כלכלית וגמישות.

המודלים המשולבים כוללים את הפרמטרים הבאים [66] –

1. עלות משוקללת - עלויות הון ותפעול, תיעדוף ההשקעה בשדרוג הרשת ליישום מטרות בטווח הקצר והארוך ובדיקת החזר ההשקעה הודות להפחתת עלויות בעתיד.
2. צרכי המערכת - הספק, כשלים, אי-יציבות, סיכון והשפעתו על העלויות בסעיף 1.
3. נתוני הרשת - ייצור שעות, ביקוש שעות, השפעות אקלים על הביקוש והמתקנים, פתרונות ליעול אספקת החשמל והשפעת הפתרונות על העלויות בסעיף 1. נתוני הרשת משמשים כבסיס לחיזוי.

	צמיחה	אמינות	חוסן	כדאיות כלכלית	גמישות
Expected grid performance	Growth	Reliability	Resiliency	Affordability	Flexibility
Optimized investment portfolio	Integrated, optimized capital and O&M portfolio				
	Prioritization of investments to enable growth (eg, generation capacity, grid capacity, monitoring, and control)		Prioritization of investments to enable reliability (eg, vegetation management, asset maintenance, engineering solutions)		
Localized understanding of grid needs	Capacity shortfalls, grid congestion, and grid instability risk		Risk return on investment (RROI): cost-effectiveness of reliability and resiliency investments		
Model grid inputs, components, and solutions	Hourly available supply by generation asset	Hourly demand by circuit, including impacts from customer DER ¹	Impact of climate and weather on demand, asset health, and performance	Failure risk by asset (probability and consequence of failure)	Vegetation risk (probability and consequence of failure)
Integrated asset data model ("Digital Twin")	Enterprise data model (ie, single source of truth)				

איור 22: תכנון רשת משולב ניהול סיכונים

מקור: [66]

כהכנה לתכנון המשולב יש לנתח את ההשפעה של כל סיכון על הרשת, לזהות פתרונות ולשלב אותם בתרחישים.

כך לדוגמא, אחד מהסיכונים העולמיים לרשת החשמל הוא הסיכון עקב אירועי אקלים קיצוניים. הסיכון שהופיע במדינות שנסקרו – הוא ההפחתה במשקעים שהשפיעה על חשמל הידרואלקטרי בניו-זילנד, השפעת אקלים סוער על קווי החשמל בהוואי, שריפות בקליפורניה וקרח בניו-אינגלנד שמשביתות תשתיות לימים ושבעות, ועוד. בארה"ב הבינו שהשפעות האקלים על תשתיות החשמל יגדלו עד שנת 2030, עקב הצפי לגידול במספר אירועי הקיצון בשיעור של 19%-29%, בהשוואה למצב בשנים 1980-2014 [66]. קיימים גם סיכונים עקב מתקפת סייבר או גל (דופק) אלקטרומגנטי שייפגעו בתשתיות.

אחד הפתרונות האפשריים להשפעות האקלים הוא הטמנת קווי חשמל, נושא שנוכח בכל אחד מהתחומים במודל ניהול הסיכונים עתידי – צרכי המערכת, אופטימיזציה של העלויות ופתרון על סמך נתונים. ההטמנה נבחנה בישראל כפתרון לאירועי כשל במערכת בתוכנית הפיתוח לרשת החלוקה של חח"י ושל נגה, שבמסגרתן תבחן הטמנה של קווי-הולכה וקווי מתח בין תחנות משנה לאזורי מגורים [57] [58].

עלות ההטמנה של קווי מתח באדמה צפויה להיות גבוהה פי ארבעה בהשוואה להקמת קווים עיליים. עם זאת, להפסקות חשמל וכשלים במערכת קווי ההולכה והחלוקה ישנה עלות חלופית שחשוב לקחת בחשבון. **בעוד יש מקום להטמין קווי מתח היכן שיש או צפויות תקלות רבות שגורמות להפסקות חשמל, חשוב לוודא במחקר מעמיק את מיקום הקווים הבעייתיים ואת התועלת בהטמנתם בכל מקרה ומקום.** המימון של ההטמנה משולב במחיר החשמל שאותו משלם הציבור דרך חשבון החשמל. לכן, חשוב לבדוק מהם האזורים הבעייתיים בהם הטמנת קווי מתח ייתכן ותקטין בטווח הארוך את העלות של אחזקת הקווים, ועימה את חשבון החשמל [63].

דוגמא נוספת לניהול סיכונים היא **במעבר לרשת מבוזרת שמנוהלת בהתבסס על מספר אזורים בעלי מיקרו-גרید מקומי**, כפי שמפרט הסעיף הבא.

3.5 שיטות ניהול הרשת

ברוב התוכניות שנסקרו שיטת הניהול היא מבוזרת ודינאמית עם שוק חשמל פעיל בו מנהל הרשת קונה חשמל מיצרנים שונים בהתאם לזמינות ההספק, מהירות ההפעלה והמחיר הנמוך ביותר (

הביזור מתבסס בעיקר על מיקום מרכזי האוכלוסייה והתעשייה, וכן על חלוקה לאזורים עם מיקרו-גריד בכל אזור לצד חיבור בין-אזורי דו-כיווני לגיבוי. ניהול מקומי של המיקרוגריד (לדוגמה באוסטרליה, בטקסס ובדרום-קוראיה) מאפשר למנהל רשת החשמל להתייחס לכול המיקרוגריד כגוף אחד של יצרן-צרכן שיש לנהל כחלק מכלל הרשת. המטרה ביישום מבוזר של מיקרוגריד היא בעיקר יציבות הרשת הודות לניהול ופתרון בעיות היצע-ביקוש או תדר או כל סיכון אחר במסגרת המקומית בכל אזור. זאת, ללא השפעה על שאר האזורים, ובעזרת הגיבוי ההדדי גם להביא להתאוששות מהירה במקרה של כשל. יתרון נוסף הוא ההפחתה בעלויות החשמל הודות להפחתת הביקוש בשיא והטיפול המקומי בהפרשי היצע-ביקוש.

בתחילת פיתוחה של הרשת החכמה הושם הדגש על מנייה חכמה (smart metering). כיום קיים דגש נוסף ורב על ייצור חשמל מבוזר – שילוב ברשת של חשמל המיוצר ע"י יצרנים שונים ומגוונים (מעבר לחברת החשמל) ועל שילוב נכון ביניהם. מבנה הרשת החכמה יוכל להיות מבוסס על רשתות מקומיות קטנות (מיקרו-גרידים). מיקרוגריד הוא אוסף של אלמנטים שמייצרים חשמל, אלמנטים שצורכים חשמל וחלק שגם מייצרים וגם צורכים, המקושרים ביניהם במערכת ניהול, בד"כ במרחב גאוגרפי מוגדר. זהו אוסף של אלמנטים המייצרים אנרגיה (כגון גנרטור, מנוע גז או ביוגז, קוגנרציה, טריגנרציה, מתקנים סולאריים, טורבינות רוח, מיקרו-טורבינות), אלמנטים המאפשרים אחסון אנרגיה (כגון אנרגיה חשמלית, תרמית), וכן אלמנטים שונים שהם גם צרכן וגם יצרן ומנוהלים על ידי מונים חכמים. כל מיקרוגריד הוא אוטונומי במידה רבה, ויכול לפעול כ"א"י מבודד, אך בדרך כלל הוא מקושר ליצרני החשמל החיצוניים ובמידת הצורך – גם למיקרוגרידים אחרים.

התועלות הפוטנציאליות של המיקרוגריד הן ביכולתו להגדיל את אמינות האספקה לאלמנטים קריטיים, היכולת לנהל את המערך, כולל מתן תיעדוף בזמן תקלות, וחיסכון בעלויות, תוך אינטגרציה ואופטימיזציה של כל מערך הייצור. הוא מאפשר לנהל את הצריכה, תוך הסתכלות על הצרכן הבודד. ניתן לפעול במספר צורות: עלות מינימלית, מינימום פליטות, מקסימום זמינות ו-peak /load shaving. ניתן לבחור מידי יום את הצורה בה רוצים לעבוד [67].

מעבר לתועלות הפוטנציאליות למערכת החשמל עצמה מבחינת אמינות האספקה ושרידות המערכת, מיקרוגרידים יכולים לתרום בצורה משמעותית להשגת יעדי הפחתת פליטות פחמן דו-חמצני כחלק מההתמודדות עם שינוי אקלים. זאת בשל האפשרויות שהם פותחים לשילוב מיטבי של מקורות אנרגיה מבוזרים (DER) ומערכות ייצור קטנות ובינוניות שיכולות לספק בנוסף לחשמל גם שירותי חום/קור, ובכך גם משפרות את יעילות המרת האנרגיה לשירותי אנרגיה רצויים וגם מפחיתות את הביקושים לחשמל.

ההנחה הנפוצה לגבי שילוב מיקרוגריד היא שהוא יעיל בחלוקת אזור גדול לאזורי משנה רחוקים במדינות גדולות. עם זאת, בפועל הוא משמש למידור ושליטה טובה יותר במרכזי הביקוש ברשת, מבסס יעילות בהולכה ומפחית עלויות. התועלות העיקריות ביישום מערכות מיקרוגריד במשק החשמל בישראל כלולות – (1) ביזור אתרי ייצור החשמל ומתן מענה לחלק מאתגרי ביטחון האנרגיה בישראל; (2) אופטימיזציה של ייצור וצריכת חשמל באמצעות מערכת חכמה לניהול ביקושים; (3) שיפור שרידות ואמינות מערכת החשמל המקומית; (4) הולכה יעילה ומבוזרת הודות להפחתת איבוד האנרגיה ברשת

ההולכה; וכן (5) הפחתת עלויות הודות לחיסכון בהשקעה ברשת ההולכה והפחתת התלות בה, וכן מתן שירותי רשת לרשת ההולכה, כגון ייצוב תדר והספק וכדומה. קיימים גם אתגרים בשילוב מיקרו-גריד ברשת החשמל, בכמה היבטים (1) מבחינה טכנית קיים סיכון בסוגיות של אבטחת מידע וביצירת הממשק שיפעיל את המיקרוגריד לעיתים כרשת עצמאית ולעיתים כחלק מרשת-החשמל, שמספק וצורך חשמל; (2) מבחינה כלכלית קיימות עלויות של תכנון, התקנה וניהול ונדרשת יצירה של שוק-חשמל ומודלים עסקיים המתאימים לרשת מבוצרת מרובת שחקנים; וכן (3) מבחינת הרגולציה קיים אתגר באופן הפיקוח על סוג חדש של שחקנים ושירותים.

לפיכך, חשוב לקדם ביצוע פיילוט באזורים שונים בארץ על מנת לאפשר ניתוחי עלות-תועלת מעמיקים, התאמת הרגולציה הקיימת למיקרוגרידים, וכן עידוד ותמיכה בהקמתם [68, 69].

ההכרזה של משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד הפנים על הקמת תאגידי אנרגיה ברשויות המקומיות, וכן ההרשאה גם למי שאין לו מונה חכם לרכוש חשמל מגורם פרטי - מהווים מקפצה ליישום מיקרו-גריד בישראל ולהסרת חסמים מפיתוח רשת החשמל גם באזורים בהם הרשת עמוסה [71] [70]. חשוב לציין כי עדיין קיימים קשיים רגולטוריים בנושא זה.

כמו כן, **מס פחמן הינו כלי מדיניות שתכליתו להביא לצמצום השימוש בדלק מחצבי, לקידום חשמל ממקור נקי ולאצירת פחמן ממקורות שעדיין יפלטו אותו לאוויר**. הכסף שנצבר הודות למס ראוי כי ישמש להגברת ההתייעלות האנרגטית והשימוש באנרגיות מתחדשות באמצעות תמיכה בהקמתן, השקעות בפיתוח קווי ההולכה או בפיתוח מיקרוגרידים [72].

3.6 תיאום ופיקוח על יישום תוכניות בין ארגונים

אחד האתגרים של משק החשמל בישראל כיום הוא התיאום בין הגורמים העיקריים בשוק החשמל בעבודה המשותפת להגדלת הייצור מאנרגיות מתחדשות. אתגרים דומים עלו בכל התוכניות שנסקרו ובפרט בתוכניות של אוסטרליה ואנגליה.

יעדי הממשלה הם הטמעה מדורגת של אנרגיות מתחדשות במשק החשמל, בשיעור של 20% עד 2025 ו-30% עד 2030. עם זאת, דו"חות רשמיים של רשות החשמל צופים את השגת היעד של 2025 רק ב-2026 וייתכן עיכוב ביישום גם בשנת 2030. המדדים להצלחה של השינוי ברשת החשמל הם מידת התחרות בשוק - כמו מספר הלקוחות שקונים חשמל מספקים פרטיים; כמות האנרגיה המתחדשת; מספר ההשקעות במשק החשמל; דקות אי-אספקה של החשמל והמחיר. חשוב גם לקדם את עצמאות הצרכן, כך שכל צרכן יכול להחליט בעצמו אם הוא רוצה להיות עצמאי בצריכת וייצור חשמל ולא תלוי ברשת החשמל הכוללת; האתגר הוא איך להקטין את הסבסוד לאנרגיה מתחדשת כדי שהיא תהיה תחרותית. פריסת האנרגיות המתחדשות בארץ ממומנת כולה דרך סיבסודים שבאים לידי ביטוי בתעריף החשמל — ולא דרך תמריצים ממשלתיים [73].

אחד המהלכים המשמעותיים שקידמה רשות החשמל בשנה האחרונה הוא שחרור 2,500 מגה-ואט נוספים של אנרגיות מתחדשות לרשת החשמל [74]. המהלך נעשה אמנם בתיאום עם חברת נגה וחח"י, אך בחח"י קיים עיכוב ביישום וקווי ההולכה והחלוקה עמוסים. חח"י אמנם השלימה עיכובים שהיו בשנים הקודמות בנוסף לתוכנית עבודה קיימת בפיתוח הרשת, אך לטענתה במשך שנים רבות לא הוקצה לזה תקציב.

שינוי נוסף שמתעכב הוא הסבת תחנות הפחם לגז בחדרה ובאשקלון. העיכובים האלה פוגעים בבריאות הציבור (ייצור חשמל מפחם מזהם הרבה יותר מגז) ומעלים את תעריפי החשמל. משבר הפחם באוקראינה הוביל לעלייה בתעריף החשמל והיה ניתן לצמצם את העלייה בתעריף במידה והייתה עמידה בזמני היישום של תוכנית ההסבה. ביצוע ההסבה של יחידות הפחם לגז דורש מחח"י לקבל מחברת נגה זמנים קצובים מראש להפסקת פעולת היחידות הקיימות. כיום לא ניתן לקבל אישור כזה עד מאי 2024, עקב המלחמה ועונת שיא צריכת החשמל.

3.7 המלצות לתכנון משק החשמל העתידי בישראל

בהתאם למידע שנאסף, אלה ההמלצות לתכנון משק החשמל העתידי בישראל –

1. תכנון הרשת העתידית –

- החלטה על תמונת משק חשמל עתידית מבוססת מתחדשות ויישומה באמצעות תכנון שמשלב מטרות, עלויות וסיכונים (כפי שתואר בפרק 3), שמספקים פתרונות לחסמים מקומיים בתרחישי המידול.
- תמונת הרשת העתידית חשוב שתהיה מבוססת על תמהיל מגוון טכנולוגית, רשת דינאמית וגמישה עם מגוון מתקני יצרן-צרכן זמינים להפעלה לאיזון תדר והספק, גיבוי הדדי בין רשתות מיקרוגרید אזוריות, חיבור לרשתות ביוגז או מימן כגיבוי ולהשלמת חוסרים באנרגיה בתעשייה ובתחבורה, וניטור חכם בכל הרשת – מונים חכמים אצל הצרכן, ניטור וחיזוי כשלים חכם במתקני הרשת, ועוד

2. הפחתת עלויות –

- הפחתת הביקוש בשעות השיא הוא אמצעי עיקרי וניתן להשיגו בעזרת ביזור ותמהיל גמיש.
- שקלול עלויות חיצוניות במחיר החשמל וקבלת החלטות על תמהיל על פי יעילות הייצור ועלויות סביבתיות בכל תרחיש, בהתאם למתודולוגיה האחידה שפרסם משרד האנרגיה לכדאיות כלכלית של פרויקט [1], במטרה לצמצם את העלות הסביבתית-בריאותית שנכפית על הציבור.
- סיכונים וכשלים מייצרים עלויות בתפעול – ניתוח ההשפעה של כל סיכון על הרשת הוא הכרחי לזיהוי הפתרונות ולשילובם בתרחישים וביישום בשנת היעד

3. רגולציה ותמיכה –

- מיצוי ההזדמנויות ברפורמה בחשמל – עידוד התקנת מונה חכם בכל בית וניהול מבוזר של יצרנים-צרכנים, בשת"פ עם משרד התחבורה והמעבר לכרוב חשמלי וטעינה, משרד התעשייה וחישמול תהליכים וכן משרד להגנת הסביבה והפחתת הפליטות (הוואי, אירלנד).
- רגולציה לעידוד שילוב שימושי קרקע וחדשנות לפיתוח טכנולוגיות יעילות שמצמצמות את היקף הקרקע הנדרש להפקת קוט"ש חשמל ומגוונות את תמהיל הייצור בכל אזור (הוואי, דרום קוריאה)
- החלת חוק מס-פחמן ושימוש בכסף לשדרוג רשת החשמל וקידום רשת מבוססת מיקרוגרید - כמנוף להפחתת שיא הביקוש, מזעור כשלים במערכת וניהול ביקושים מבוזר (דנמרק ואנגליה בפרט)
- יישום הדרגתי של השיפורים ברשת החשמל והחלה הדרגתית של עלויות הרפורמה במחיר החשמל – תעדוף שלבי יישום ועלותם על פי רמת ההשפעה על כלל הצרכנים (ניו-זילנד), בהבנה שהעשור הקרוב משמעותי מבחינת עלויות ואחר כך תתכן ירידה (אנגליה, ארה"ב).

4. אמינות אספקה –

- הטמנת קווי חשמל שחשופים לפגיעה - יש לבצע מחקר כמותי להערכת פגיעות קווי ההולכה לשינויי אקלים (טמפרטורות, שריפות, הצפות וכד') ולהעריך את העלויות והתועלות הכוללות של הטמנת קווים (הוואי, קליפורניה).
- מינוי גוף שמפקח על שילוב תוכניות של גורמים שונים במשק החשמל ויישומן - שינויים בהחלטות ובזמני ביצוע של תוכניות מקבילות שיש להן השפעה על תוכנית משק החשמל - כדוגמת התקנת אמצעי ייצור מגוונים בכל אזור ויישום תוכניות רוחביות בקווי ההולכה והאספקה (אוסטרליה, קליפורניה)
- טיפול מקומי בביקוש ובכשלים וחיבור בין-אזורי לגיבוי - מיקום יצרנים וצרכנים מגוונים בכל אזור ושימוש במיקרו-גריד לניהול מקומי של כל אזור, להפחתת התעבורה בקווי ההולכה המרכזיים וחיבור בין אזורי בעיקר לצרכי גיבוי הדדי (אוסטרליה, ניו-אינגלנד, טקסס, דנמרק, אנגליה, ניו-יורק)
- איזון הספק ותדר באמצעים מגוונים מלבד אגירה - גיבוי ברשת מימן, ביוגז ופסולת וניהול דינאמי של חלופות זמינות (אנגליה, דנמרק)

איסוף הנתונים והיישום בהתחשב במטרות המשולבות הכרחי להצלחת השינוי.

* * *

מקורות

- [1] משרד האנרגיה, "מתודולוגיה אחידה לכדאיות כלכלית של פרויקט אנרגיה", משרד האנרגיה, 2020.
- [2] IRENA, "GLOBAL ENERGY TRANSFORMATION - A roadmap to 2050," IRENA, 2018.
- [3] IEA, "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector," 2021.
- [4] UN, "UN Sustainable Development Goals .[מקוון]" ,Available: <https://sdgs.un.org/goals>.
- [5] S. Muhanji, C. Barrows, J. Macknick I A. Farid, "An enterprise control assessment case study of the energy-water nexus for the ISO New England system ",Renewable and Sustainable Energy Reviews , p. 141: 110766, 2021 .
- [6] Practical Law, "Independent System Operator (ISO)," 2023 .[מקוון] .Available: [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/0-520-9886?transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/0-520-9886?transitionType=Default&contextData=(sc.Default)&firstPage=true).
- [7] ENTSO-E, "ENTSO-E Member Companies," 2023 .[מקוון] .Available: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/members/>
- [8] AEMO, "Australian Energy Market Operator," 2023 .[מקוון] .Available: <https://aemo.com.au/>
- [9] D. Schwartin, "2050 Transmission Study - Key Takeaways and Transmission Development," 2023 .[מקוון] .Available: https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2023/07/a10_2023_07_25_pac_2050_study.pdf.
- [10] ENSO-E, "Completing the map - Power system needs in 2030 and 2040," 2021.
- [11] California ISO, "CAISO 20-Year Transmission Outlook," 2022.
- [12] Transpower NZ, "Opportunities and challenges to the future security and resilience of the New Zealand power system," Transpower NZ Ltd, Waikoukou, 2021.
- [13] Electricity Authority, "Cost-benefit analysis of distributed energy resources in New Zealand," SAPERE, 2021.
- [14] AEMO, "2022 Integrated System Plan For the National Electricity Market," Australian Energy Market Operator, 2022.
- [15] AEMO, "Project Energy Demand and Generation Exchange (EDGE)," Australian Energy Market Operator - AEMO, Melbourne, 2023.
- [16] OFGEM, "Decision on future of local energy institutions and governance," OFGEM, 2023.
- [17] ESO - Electricity System Operator, "Becoming the Future System Operator (FSO)," OFGEM, 2023.
- [18] EDA, "How does EDA work?," 2023.

- [19] V. Petrove, "NSW tender awards nearly 1.3 GW of wind, solar and storage," Renewables Now. [מקוון] , Available: [https://renewablesnow.com/news/nsw-tender-awards-nearly-13-gw-of-wind-solar-and-storage-843571./](https://renewablesnow.com/news/nsw-tender-awards-nearly-13-gw-of-wind-solar-and-storage-843571/)
- [20] D. Carroll, "Australian grid operator turns to solar-powered microgrids," PV magazine, Queensland, 2024.
- [21] ENTSO-E, "The reference for the future European electricity system," ENTSOE, 2022.
- [22] EHB, "The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative," EHB, 2023. [מקוון]. Available: <https://ehb.eu/files/downloads/EHB-2023-20-Nov-FINAL-design.pdf>.
- [23] ENTSO-E, "European Resource Adequacy Assessment," ENTSOE, 2023.
- [24] ENERGINET, "OUTLOOK FOR ANCILLARY SERVICES 2023-2040," 2023.
- [25] ENERGINET, "Long-term development needs in the power grid - Energinet's long-term development plan 2022," 2022.
- [26] Energy Dashboard, "Energy Dashboard: Live," Energy Dashboard, 2024. [מקוון]. Available: <https://www.energydashboard.co.uk/live>.
- [27] UK Government, "MODELLING 2050: ELECTRICITY SYSTEM ANALYSIS," Crown copyrights - The National Archives, London, 2020.
- [28] Ireland Government, "National Energy & Climate Plan - NECP 2021-2030," Department of communication, climate action and environment, 2019.
- [29] TERNA, "2023 DEVELOPMENT PLAN," 2023. [מקוון]. Available: <https://www.terna.it/en/electric-system/grid/national-electricity-transmission-grid-development-plan>.
- [30] red electrica, "Network Development Plan," red electrica, 2023.
- [31] E. Larson, C. Greig, J. Jenkins, A. Mayfield I A. ...Swan, "Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure and Impacts," Princeton University, Princeton, NJ, 2021.
- [32] NERC, "EMP Task Force - strategic recommendation," NERC, Atlanta, 2019.
- [33] EIS council, "Hurricanes and Severe Weather Events," EIS Council - Electric Infrastructure Security Council, Washington DC, 2023.
- [34] Hawaiian Electric, "Hawaiian Electric's Customer Energy Resource Strategy 2045," Hawaiian Electric, 2021.
- [35] Hawaiian Electric, "Integrated Grid Plan - A pathway to a clean energy future," Hawai'i Powered, 2023.
- [36] California Governor, "Building the electricity grid of the future - California's clean energy transition plan," Governor Gavin Newsom, 2023.

- [37] L. Collis, "New report shows incredible success of grid in one state: [This] proved the only tool ready to ... avoid grid outages," TCD - the cool down, 18 Feb 2024. [מקוון]. Available: <https://www.thecooldown.com/green-business/california-solar-battery-capacity-increasing/>.
- [38] ERCOT - TEXAS ISO, "ERCOT 2040: A Roadmap for Modernizing Texas' Electricity Infrastructure," IdeaSmiths, 2023.
- [39] E. Douglas, "A year after the electric grid failed, Texas focuses on reliability, not climate change," The Texas Tribune, 2022.
- [40] NYISO, "2021-2040 system and resource outlook - A report from the NY ISO," NYISO, NY, 2022.
- [41] NEISO, "2050 Transmission Study - Final Results and Estimated Costs (DRAFT)," 2023.
- [42] R. Jones, B. Haley, J. Williams, J. Farbes, G. Kwok I J. Hargreaves, "Energy Pathways to Deep Decarbonization - A Technical Report of the Massachusetts 2050 Decarbonization Roadmap Study," Government of Massachusetts, Massachusetts, 2020.
- [43] ETRANS, "Third energy master plan - A new energy paradigm for the future," Ministry of Trade, Industry and Energy.
- [44] International Trade Administration, "South Korea - Country Commercial Guide," 2024. [מקוון]. Available: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/south-korea-energy-carbon-neutrality-initiatives>.
- [45] L. T. S. Allan, "SINGAPORE COUNTRY REPORT," eria.org, 2019. [מקוון]. Available: https://www.eria.org/uploads/media/24.Energy_Outlook_and_Energy_Saving_Potential_2019_Chapter_15_Singapore_Country_Report.pdf.
- [46] EMA, "Energy 2050 Committee Report," EMA-Energy MArket Authority, 2022.
- [47] Kiko Network Report, "Japan's Path to Net Zero by 2050," Kiko Network Report, 2021.
- [48] The Japan Times, "Japan aims to be world's No. 3 offshore wind power producer in 2040," 2020. [מקוון]. Available: <https://www.japantimes.co.jp/news/2020/12/16/business/japan-offshore-wind-power/>.
- [49] JEPIC, "The Electric Power Industry in Japan 2022," JEPIC - Japan Electric Power Information Center, 2022.
- [50] IESR, "A Roadmap for Indonesia's Power Sector - How Renewable Energy Can Power Java-Bali and Sumatra," Institute for Essential Services Reform (IESR), Jakarta, 2019.
- [51] Solar Quarter, "Egypt To Achieve 60% Renewable Energy Dependency By 2040," 2023. [מקוון]. Available: <https://solarquarter.com/2023/07/12/egypt-to-achieve-60-renewable-energy-dependency-by-2040/>.

- [52] Ministry of Energy, Mining, and Sustainable Development, "Electricity," Ministry of Energy, Mining, and Sustainable Development, 2018. [מקוון]. Available: <https://www.mem.gov.ma/en/Pages/secteur.aspx?e=1>. [התבצעה גישה ב- 2024].
- [53] TRADE, "Morocco - Country Commercial Guide," 2024. [מקוון]. Available: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/morocco-energy>.
- [54] משרד האנרגיה, "מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050", 2021.
- [55] ר. פלטינק, א. דוידוביץ' ו אחרים, "ניתוח כלכלי של חלופות מדיניות להפחתת פליטות גזי חממה במשק האנרגיה בישראל", אקולוגיה וסביבה, כרך 13, מס' 3, 2022, p. 50-56.
- [56] השל, "התייחסות צוות NZO למפת הדרכים של משרד האנרגיה לאנרגיות מתחדשות לשנת 2030 ותוכנית הפעולה של רשות החשמל לאנרגיות מתחדשות", 2022. [מקוון]. Available: <https://www.nzo.org.il/post/%D7%94%D7%AA%D7%99%D7%99%D7%97%D7%A1%D7%95%D7%AA-%D7%A6%D7%95%D7%95%D7%AA-nzo-%D7%9C%D7%9E%D7%A4%D7%AA-%D7%94%D7%93%D7%A8%D7%9B%D7%99%D7%9D-%D7%A9%D7%9C-%D7%9E%D7%A9%D7%A8%D7%93-%D7%94%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%95%D7%AA-%D7%9C%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%95%D7%AA-%D7%9E%D7%AA%D7%97%D7%93%D7%A9%D7%95%D7%AA-%D7%9C%D7%A9%D7%A0%D7%AA-2030>
- [57] נגה, "תוכנית פיתוח אינטגרטיבית למערכת הייצור והמסירה עד שנת 2030", נגה - ניהול מערכת החשמל, 2022.
- [58] ה. פרידמן, "תכנית פיתוח רשת החלוקה עד 2030 - רשתות מתח גבוה ונמוך", חברת החשמל, 2023.
- [59] McKenzey & Comepany, "Beyond the hype: New opportunities for gen AI in energy and materials," McKenzey & Comepany, 2024.
- [60] משרד האנרגיה, "רפורמה בחשמל", משרד האנרגיה, 2022.
- [61] משרד האנרגיה, "לקראת הביקושים הגבוהים הצפויים בקיץ: רשות החשמל מפרסמת החלטות לשימוע מהיר להגדלת אמינות רשת החשמל", משרד האנרגיה, 2023.
- [62] ד. ברנשטיין, י. פרג ו א. טל, "בטחון אנרגיה לישראל - חסמים ואיומים למערכת החשמל העתידית", אוניברסיטת תל אביב, תל אביב, 2023.
- [63] ע. בנימין, "אלה הצעדים הנדרשים כדי למנוע זינוק בתעריף החשמל בשנים הקרובות", 2024.
- [64] ג. גרוסמן ו י. עברון, "פורום אנרגיה 37: ביטחון באספקת אנרגיה בישראל", מוסד שמואל נאמן, חיפה, 2016.
- [65] ד. וינשטוק ו מ. אלרן, "ביטחון מערכת החשמל בישראל: הצעה לאסטרטגיה רבתי", INSS, 2016.
- [66] A. Fernandez, B. Houghton, A. Rubin ו A. Schifrin, "Grid planning under uncertainty: Investing for the energy transition," McKinsey & Company, 2023.
- [67] ש. גרוסמן, י. עברון ו נ. שפירא, "פורום אנרגיה 39: מיקורגיד ורשת חשמל חכמה בעידן של ייצור מבוזר ואנרגיות מתחדשות", מוסד נאמן, הטכניון, חיפה, 2017.

- פ. י. ל. נ, "מערכות מיקרוגרד בישראל: תועלות משקיות, סוגיות חברתיות ומתווה ליישום", המרכז הבינתחומי הרצליה עבור משרד האנרגיה, 2018.
- [68]
- הכנסת, "מיקרו גרד (רשת חשמל מקומית): רקע וסוגיות לדיון", 2023.
- [69]
- משרד האנרגיה והתשתיות, "לראשונה בישראל: משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד הפנים מכריזים על [70] הקמת תאגידי אנרגיה ברשויות המקומיות", 2024.
- משרד האנרגיה והתשתיות, "מהפכת החשמל – השימוע לפתיחת השוק לתחרות והסרת חסם של המונה [71] החכם התפרסם להערות הציבור", 2024a, gov.il, [מקוון]. Available: <https://www.gov.il/he/departments/news/news-220224>.
- [72] World Bank, "State and Trends of Carbon Pricing 2023," 2023. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/58f2a409-9bb7-4ee6-899d-be47835c838f>.
- ע. בנימין, "יו"ר רשות החשמל אמיר שביט: "כל הכסף שולם עוד לפני שהפרויקט הסתיים – 4 מיליארד שקל [73] באדמה בלי תוצאה", דה-מרקר, 2024.
- משרד האנרגיה והתשתיות, "מהפכת האנרגיה של שר האנרגיה והתשתיות: עד 2,500 מגה וואט מאנרגיה [74] מתחדשת יתווספו לרשת החשמל של ישראל, ויהפכו אותה למעצמה אנרגטית ויקפיצו את ישראל לעמידה ביעדים הלאומיים בתחום", 2023, 12, 13, gov.il, [מקוון]. Available: <https://www.gov.il/he/departments/news/re-131223>.
- מרכז המידע של הכנסת, "השפעת השימוש בפחם על משק החשמל ותעריף החשמל", 2023.
- [75]
- נגה, "מגבלות הולכה ל-PV", 2023.
- [76]
- י. בן נחום ו א. סגל, "מעבר מואץ למשק מבוסס אנרגיות ממקורות מתחדשים – אפשרי וכלכלי", אקולוגיה [77] וסביבה, כרך 13, מס' 3, 2022, p. 87-88.
- ג. גרוסמן ו א. רווה, "פורום אנרגיה 54: אגירת אנרגיה חשמלית", מוסד שמואל נאמן, הטכניון, חיפה, 2023.
- [78]
- Infospot, "סקר סביבתי לאנרגיה מתחדשת בים התיכון", 2022. [מקוון].
- [79]
- השל, "פרויקט NZO-בחניה כלכלית של האצת המעבר לאנרגיה סולארית", 2023.
- [80]

נספח 1 - מערכת החשמל בישראל

בשנת 2040 צפויה אוכלוסיית ישראל להגיע לכ-14 מיליון איש ולהכפיל את צריכת החשמל בהשוואה לשנת 2020. לקראת כינוס ועידת האקלים בגלזגו בשלהי 2021, הצהירה ישראל על יעד לאומי של איפוס פליטות גזי חממה עד שנת 2050. המשמעות היא שבעשורים הקרובים גז מחצבי יהיה אנרגיית מעבר עד לשימוש באנרגיות מתחדשות והוא ישמש תחלופה זולה ונקייה יחסית לשימוש בפחם בייצור חשמל [75].

באוקטובר 2020 החליטה ממשלת ישראל להגדיל את היעד לייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת בשנת 2030 ל-30%, עם יעד ביניים של 20% בשנת 2025 (טבלה 1) [54]. כיום אנרגיה מתחדשת מהווה 10% מייצור החשמל בישראל, כאשר 70% מופק מגז ו-20% מפחם. האנרגיה המתחדשת היא ברובה אנרגיה סולארית (מתקנים פוטו-וולטאיים קרקעיים ובדו-שימוש על גגות או חקלאות, ומתקנים תרמו סולאריים).

מבחינת ההספק המותקן⁵, אנרגיה מתחדשת מהווה 21% מההספק המותקן בישראל ובשנים האחרונות הואץ קצב ההתקנה. הצפי בשנת 2050 הוא שמתוך כ-190 גיגה-ואט (GW) של הספק מותקן (I) כ-16 GW (8%) יהיו מבוססים על דלק מחצבי (בעיקר גז מחצבי), 105 GW מבוססי חשמל סולארי (56%) ו-65 GW מבוססי אגירה (35%). חשמל מרוח יהווה חלק מזערי מההספק המותקן.

טבלה 6: יעדי משרד האנרגיה והתחבורה לשנת 2050 בתחום החשמל והתחבורה

יעדים ראשיים	מדד	2018	2030	2050
הפחתת פליטות גזי חממה במשק האנרגיה	% הפחתת פליטות יחסית ל-2015	0%	22%	80%
הפחתת פליטות גזי חממה במגזר החשמל	% הפחתת פליטות יחסית ל-2015	7.5%	30%	75-85%
יעילות באנרגיה בחשמל ותעשייה	% שיפור שנתי בעצומות אנרגיה (טרה-ואט/מלש"ח)	0.7%	1.3% לשנה	1.3% לשנה
שימוש בפחם	% פחם בתמהיל לייצור חשמל ואנרגיה	30%	0%	0%
חשמל ממקור מתחדש	% מתחדשות בתמהיל לייצור חשמל ואנרגיה	5%	30%	90%
כלי רכב מאופס פליטות	% כלי רכב מסך מצבת הרכב	0%	25% לקל 10% לכבד	100%
יעילות באנרגיה בתחבורה	צריכת אנרגיה בתחבורה לתושב לשנה (MWh/capita)	7.7%	6-7	2-3
הפחתת פליטות גזי חממה שמקורן בתחבורה	הפחתה ביחס ל-2015	0	11%	94%

מקור: [54]

⁵ הספק מותקן הוא ההספק המקסימלי שניתן לייצר ממערכת מותקנת. הספק הייצור הוא ההספק המופעל בפועל בכל שעה, בהתאם לתנאי השמש והרוח. הספק הייצור המקסימלי בכל מערכת הוא ההספק המותקן בהתאם ליעילות האנרגטית של המערכת.

מודלים בישראל מאתגרים את תחזיות משרד האנרגיה וטוענים שכבר בשנת 2030 אנרגיה ממקור מתחדש תוכל לתת מענה ל-50% מהביקוש הצפוי לחשמל, ולכ-95% מהביקוש ב-2050⁶. זאת, אם תשכיל ישראל להתקין מערכות פוטו-וולטאיות בהספק של כ-115 ג'יגה-וואט (GW), ולהקים מערכות לאגירת חשמל בקיבולת של כ-320 ג'יגה-וואט-שעה (GWh). המפתח הוא בייצור חשמל סולארי בעודף על הביקוש, בשעות בהן זה מתאפשר, ואגירת החשמל לשימוש בשעות בהן לא ניתן לייצר חשמל סולארי.

שתי שאלות מרכזיות עולות מול הצורך לעבור לאנרגיות מתחדשות: ההיתכנות הטכנית, בפרט מול מגבלות רשת ההולכה הקיימת בישראל, והסוגייה הכלכלית.

מבחינת קווי ההולכה, המעבר מהפקת אנרגיה ממקור מחצבי לייצור חשמל ממקור מתחדש מבזר את רשת החשמל ודורש הקמת קווי הולכה להעברת האנרגיה מאזורי הייצור, בעיקר בפריפריה, לאזורי הביקוש, בעיקר במרכז הארץ. רוב רובו של הייצור ממוקם בקצוות המדינה (דרום או צפון מדינת ישראל) ולכן נוצר חוסר איזון בין ייצור לצריכה, שמחייב העברת הספק גדול של חשמל בין קצוות המדינה למרכזי הצריכה. אמנם חיזוק ושדרוג קווי ההולכה מתוכנן לביצוע בעשור הקרוב, אך כבר כיום "נזרק" הספק חשמל עודף שמיוצר ממתחדשות בפריפריה עקב מחסור בקווי הולכה לאזור הביקוש במרכז.

כך לדוגמא, בשנת 2010 פרסם מרכז המחקר והמידע של הכנסת שאזור הערבה הדרומית הופך בהדרגה למקור חשוב לייצור חשמל סולארי, ולכן חשוב להקים בו מערכת הולכה אמינה. התכנון היה להקים שתי תחנות בתמנע ובקטורה בהספק מותקן כולל של 100 מגוואט, ועוד תחנות נוספות. לשם העברת ההספק למרכז הארץ החל פרויקט של שדרוג קו מתח עליון (161 קילו-וולט) מרמת חובב לאורך רמת הנגב ועד קטורה ואילת, באורך של כ-200 ק"מ. שדרוג הקו נעצר באזור מכתש רמון עקב מחלוקת בין חברת החשמל לרשות הטבע והגנים ולא ידוע מתי המחלוקת תיפתר. גם ב-2023 קיימות מגבלות בקווי ההולכה לחיבור PV וביישום שיעור הייצור הנדרש ממקור מתחדש [57, 76].

מבחינת ההיתכנות הטכנית, קיימת נוסחה אפשרית להפקת 195 טרה-וואט-שעה, 95% מהביקוש לחשמל בישראל בשנת 2050, באמצעות אנרגיה פוטו-וולטאית. זאת, עם התקנת פאנלים על מבנים למגורים ולתעסוקה (37%), במרחב העירוני (21%) והכפרי (36%), כולל שדות סולאריים באדמות שאין להן שימוש אחר (5%) [77].

לשם השוואה, בתוכנית לטווח הקצר של נגה לחשמל סולארי בשנת 2030, השטחים שאותרו כאפשריים להקמת מתקנים פוטו-וולטאיים (PV) כללו מתקן קרקעי בחיבור לקו מתח עליון (33%), מתקן קרקעי בחיבור לקו מתח גבוה (21%), PV על גגות (28%), מתקן על מאגרים (12%), PV בבריכות דגים (4%), PV-י במחלפים בכבישים (2%) [57]. המיקוד בשטח בנוי מאפשר להגדיל את הייצור באזור המרכז ולייתר, בטווח הקצר, את אתגר קווי ההולכה שדורש פתרון.

לשם היישום נדרשת גם אגירת חשמל. כיום רוב האגירה נעשית בסוללות ליתיום או במתקנים הידרו-אלקטריים. בעתיד, אחת הגישות המובילות לאגירת חשמל בת קיימא תהיה אגירה כימית של עודפי חשמל ממקור מתחדש באמצעות אלקטרוליזה (שימוש בחשמל) לייצור מימן. תהליך שריפת המימן בזמן שחרור האנרגיה לשימוש הינו תהליך נקי המפיק חום רב ומים בלבד כתוצר לוואי. אפשרות אחרת היא ניצול המימן בתאי דלק, הממירים אותו ישירות לחשמל בנצילות גבוהה, כך שהוא מוכן לשימוש.

⁶ חשוב לשים לב שמודלים של NZO עד שנת 2021 לא לקחו בחשבון את עלויות האגירה, טעות שתוקנה בדוחות משנת 2022 והלאה והראו שהתוצאות מהעבר נכונות גם עם הכללת עלויות האגירה.

לכן המימן נחשב לדלק נקי ולאופציה אפשרית לאגירה והפקת חשמל בעתיד מופחת פליטות. עם זאת, כיום, בישראל ובעולם, רובו המוחלט של המימן מופק מדלק מחצבי תוך פליטה משמעותית של פד"ח ("מימן אפור"), שלא יכול להוות בסיס לכלכלה זאת פליטות עתידית. את המימן ניתן לאגור ולהזין לטורבינות ייעודיות לייצור חשמל (טורבינות הדומות לטורבינות גז עם שינוי מסוים), לתנורים תעשייתיים כחלופה לדלק מזהם, או לתאי דלק, ההופכים מימן וחמצן למים תוך כדי ייצור חשמל [78].

במקביל לפעילות ולתוכניות ביבשה ובהתאם ליעדים להפחתת פליטות במשק האנרגיה עד 2050, משרד האנרגיה נערך לביצוע סקר אסטרטגי סביבתי במים הכלכליים של ישראל [79]. הסקר נועד לבחון את האפשרות לייצור ולאגירה של אנרגיה מתחדשת וקיבוע פחמן במרחב הימי של ישראל בים התיכון. זאת, במטרה לבחון היבטים טכנו-כלכליים של ייצור ואגירה של אנרגיה מתחדשת וקיבוע פחמן בים, וכן היבטים סביבתיים, ציבוריים ותכנוניים. הסקר האסטרטגי הסביבתי שיבוצע, יבחן את כלל השיקולים הרלבנטיים, תוך איסוף נתונים וניתוח מידע שעל בסיסו יתקבלו החלטות בנושא. עם הנושאים הללו ניתן למנות נתונים כמו מהירות הרוח, גובה הגלים, עוצמת הזרימה, מסלולי נדידה של עופות ויונקים ימיים, בתי גידול, ונראות של מתקנים בקו האופק. המשרד בוחן גם פיתוח רגולציה, שתאפשר הקצאת שטחים במים הכלכליים לפיתוח האנרגיה המתחדשת, האגירה וקיבוע הפחמן.

מבחינה כלכלית, על פי הערכות של ירום אריאב⁷, הפרויקט להאצת היישום והעמידה ביעד של 50% חשמל סולארי בשנת 2030, כמו ברבות מהמדינות המתקונות בעולם, הוא אכן יעד מאתגר, אך שכרו בצידו: זהו פרויקט כדאי כלכלית מנקודת הראות של המשק הלאומי. אריאב קובע כי האצת הפרויקט וקביעת יעד של 50% חשמל מאנרגיות מתחדשות, לעומת יעד של 30% בשנת 2030, כמעט ואינה כרוכה בהשקעות ממשלתיות, וניתן לאמץ יעד של 50% ייצור חשמל סולארי כמעט ללא עלות נוספת למשק [80].

עם זאת, האתגר המרכזי בהשוואת החלופות לאספקת אנרגיה הוא בהכלת העלות החיצונית במחיר האנרגיה והתחשבות בעלות החיצונית של סוגי הדלק וההפקה השונים בהחלטות לרכישת חשמל במודל השוק [56]. אחת האפשרויות להכלת העלות החיצונית היא שהגורם הרוכש חשמל במשק, חברת נגה, תוסיף את מלוא העלות החיצונית למחיר המוצע ע"י יצרני דלק מחצבי, בבואה לבחור ממי לרכוש חשמל. בשיטה זו תיכלל העלות החיצונית בנקודת ההחלטה לבחירת ספק החשמל, אך ההשפעה של העלות למשק החשמל תהיה שולית. זאת, בעיקר בהשוואה להחלת מס פחמן על כלל הייצור של דלק מחצבי, כפי שנעשה בעולם.

ואכן, תמריץ מרכזי ליעול השימוש באנרגיה בת-קיימא ולמעבר לאנרגיה ממקור מתחדש הוא השתת המחר היחסי של אנרגיה מזהמת. כך לדוגמה, מס הפחמן גורם להפנמת ההשפעות החיצוניות השליליות שנוצרות מפליטת גזי חממה, ולכן נמצא כפתרון היעיל ביותר כלכלית להנעת השינוי, בעולם ובישראל. לפיכך, מוצע ללוות את יעדי המדיניות באימוץ מס פחמן אפקטיבי, שאינו נותן הקלות לגז המחצבים, כפי שמתוכנן היום, בשילוב מתן סובסידיות לעידוד השימוש במקורות אנרגיה שאינם מזהמים. זאת ועוד, מס פחמן המוטל על בסיס תקציב ממשלה ניטרלי, אינו מגדיל את נטל המס ועשוי להוביל לשיפור בביצועים סביבתיים וכלכליים [55].

⁷ ירום אריאב – פרופיל במשרד האוצר [קישור]

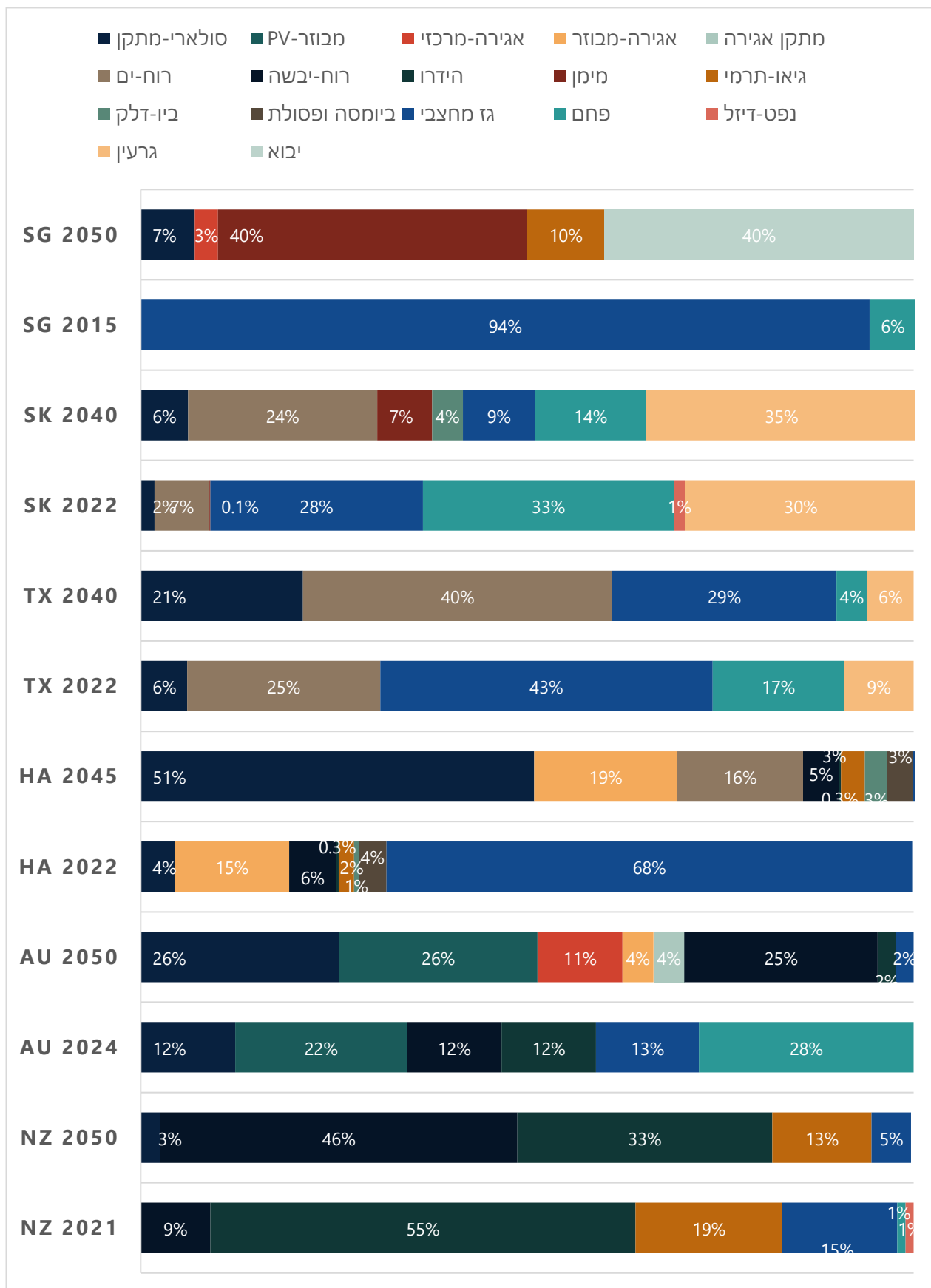
נספח 2 - תמהילים בעולם

פירוט התמהילים עבור מדינות שהן אי-האנרגיה כיום (טבלה 5, איור 23), בשנת הבסיס - ניו-זילנד (NZ), אוסטרליה (AU), הוואי (HA), טקסס (TX), דרום-קוריאה (SK) וסינגפור (SG), וכן המדינות שכיום מחוברות לאחרות כגיבוי (טבלה 6, איור 24) - דנמרק (DK), אנגליה (EN), קליפורניה (CA), ניו-אינגלנד (NE) וניו-יורק (NY).

טבלה 7: תמהיל ייצור החשמל במדינות שהן אי-אנרגיה בשנת הבסיס

מדינה ושנה		סינגפור		דרום-קוריאה		טקסס		הוואי		אוסטרליה		ניו-זילנד	
		SG 2015	SG 2050	SK 2022	SK 2040	TX 2022	TX 2040	HA 2022	HA 2045	AU 2024	AU 2050	NZ 2021	NZ 2050
סוג מתקן													
סולארי-מתקן			7%	2%	6%	6%	21%	4%	51%	12%	26%	3%	
PV-מבוצר										22%	26%		
אגירה-מרכזי		3%								11%			
אגירה-מבוצר								15%	19%	4%			
מתקן אגירה										4%			
רוח-ים				7%	24%	25%	40%	16%					
רוח-יבשה								6%	5%	12%	25%	9%	46%
הידרו								0.3%	0.3%	12%	2%	55%	33%
מימן		40%		0.1%	7%								
גיא-תרמי		10%						2%	3%			19%	13%
ביו-דלק				4%				1%	3%				
ביומסה ופסולת								4%	3%				
גז מחצבי		94%		28%	9%	43%	29%	68%	0.3%	13%	2%	15%	5%
פחם		6%		33%	14%	17%	4%			28%		1%	
נפט-דיזל				1%								1%	
גרעין				30%	35%	9%	6%						
יבוא		40%											
% נקי		0%	60%	9%	38%	31%	61%	28%	94%	59%	98%	83%	95%
% סולארי		0%	7%	2%	6%	6%	21%	4%	51%	34%	51%	0%	3%

איור 23: תמהיל ייצור החשמל במדינות שהן אי-אנרגיה בשנת הבסיס ובשנת היעד



טבלה 8: תמהיל ייצור החשמל במדינות שמחוברות לאחרות בשנת הבסיס ובשנת היעד

מדינה ושנה		ניו-יורק		ניו-אינגלנד		קליפורניה		אנגליה		דנמרק	
סוג מתקן		NY 2021	NY 2040	NE 2035	NE 2050	CA 2022	CA 2045	EN 2024	EN 2050	DK 2024	DK 2040
סולארי-מתקן			4%	19%	23%	17%	50%	4%		33%	
PV-מבוצר			4%	19%	23%						
אגירה-מרכזי				1%	4%				26%		
אגירה-מבוצר							30%	1%	23%		
מתקן אגירה		1%		3%	1%		4%		4%		
רוח-ים			8%	16%	2%		14%	27%	47%	70%	52%
רוח-יבשה		3%	6%	5%	26%	11%				15%	
הידרו		23%	18%	3%	1%	10%		2%			
מימן											
גיאותרמי						5%	1%				
ביו-דלק											
ביומסה ופסולת		2%		1%	1%	9%	1%	8%		15%	
גז מחצבי		46%	33%	26%	14%	36%		34%		15%	
פחם						2%		3%			
נפט-דיזל		1%				0%					
גרעין		24%	15%	6%	3%	9%		9%			
יבוא			11%					14%			
% נקי		27%	41%	67%	83%	43%	99%	33%	100%	70%	100%
% סולארי		0%	9%	39%	47%	17%	50%	4%	0%	0%	33%

איור 24: תמהיל ייצור החשמל במדינות שמחוברות לאחרות בשנת הבסיס ובשנת היעד

