

מפת דרכים למנהל-עצמאי של מערכת החשמל בשנת 2040

ד"ר אורנה רביב ופרופ' אופירה אילון

17-07-2024

תקציר מנהלים לדו"ח מחקר שנעשה עבור נגה ופורסם באתר [נגה](#)

מיקוד המחקר

1. מהם האתגרים ומהם הפתרונות בתוכניות לניהול

רשתות החשמל בעולם בשנת 2040?

2. מה המסקנות מהתוכניות לגבי התכנון בישראל?

- חידוד אתגרים עד 2040 שיש ללמוד ולהתכונן לפתרונם

- תרחישים במעבר מ-10% ל-30-40% מתחדשות ב-2040

- למידה מתהליך התכנון לגבי כתיבת התוכנית בישראל

צוות המחקר – מוסד נאמן, הטכניון

ד"ר אורנה רביב

- הנדסאית
- פיסיקה/אלקטרואופטיקה
- ניתוח מערכות וניהול שינוי בהייטק
- MA בכלכלת אנרגיה, ניתוח חלופות במשק החשמל
- PhD בכלכלה סביבתית
- מחקר סביבתי בתחום המתחדשות

פרופ' אופירה אילון

- MSc בהנדסה ו- PhD בטכניון
- ראש תחום אנרגיה וסביבה במוסד נאמן
- ראש חוג MA לניהול ומדיניות אנרגיה באונ' חיפה
- עשרות מחקרים בתחום המתחדשות, רשת החשמל והאנרגיה, תמ"א לתשתיות אנרגיה, פליטות משרשרת הגז, מוכנות לשינוי אקלים, ועוד

תהליך המחקר

מדינות OECD עם "מנהל
עצמאי" לרשת החשמל

1. איסוף נתונים

2. חידוד אתגרים

3. ניתוח המצב בישראל

4. התאמת פתרונות

5. המלצת תהליך לתכנון

מדינות שהן "אי-

אנרגיה"

בתחילת יישום

מתחדשות

שטח

מצומצם

בסיס

גז

איסוף נתונים ממוקד

אתגרים, פתרונות, התאמה
לישראל, המלצות

מתודולוגיה

1. סקר ספרות – אתגרים ופתרונות בתכנון משק חשמל 2040
 - מיקוד במדינות "אי-אנרגיה", משאב קרקע מצומצם, משק אנרגיה מבוסס גז
 - השוואת חלופות עם מדינות שאינן "אי"
2. ניתוח אתגרים, פתרונות, תרחישים וחלופות באופן היישום בישראל
 - בהתאם ליעדי 2050: הפחתת 80% מהפליטות עם 90% מתחדשות
 - על פי תוכנית קווי הרשת 2030 ואתגרים בישראל 2024
3. המלצות על אופן כתיבת התוכנית והתכנון בישראל
 - בהסתמך על ממצאי הסקר, מחקרים ומידע מארגונים עולמיים

ממצאים

אתגרים ראשוניים בניהול רשת חשמל ב-2040*

- הביזור בחשמל ממקור מתחדש משפיעים על איזון התדר, המתח והאינרציה
- אספקת חשמל יציבה ורציפה בהתאם לביקוש הכפול (!) מחייבת רשת גמישה
- תכנון השינוי מתבסס על תמהיל קיים, מאפיינים גיאוגרפיים ומצב רשת/קווי החשמל
- שדרוג רשת החשמל משפיע על מחיר החשמל וחשוב שייעשה בהדרגה וביעילות

* במדינות בהן קיימות מתחדשות בשיעור של מעל 30% - אלה לא אתגרים אלא קווים מנחים ליישום בפועל

אתגרים מרכזיים בניהול רשת חשמל ב-2040

- תכנון השינוי חשוב שיתבסס על התמונה העתידית והתצורה הרצויה של רשת החשמל, בהתחשב בתנאים המקומיים
- התמונה העתידית חשוב שתכלול תמהיל של מגוון טכנולוגיות עם יצרנים-צרכנים דינאמיים, גם אם קיימת אי וודאות לגבי הטכנולוגיות ושרשראות האספקה בעתיד
- ביקוש גבוה והיצע נמוך בערים מחייבים שינוי באופן תפעול הרשת
- תפעול רשת מבוצרת תלוי באופן קריטי באיכות תקשורת הנתונים לאיסוף ועיבוד מידע
- הפחתת הסיכונים וייעול התפעול מחייבים מעבר לניהול רשתות מיקרו (מיקרו-גריד)

הפתרונות – בהתאם למאפיינים מקומיים

1. תמהיל נוכחי להפקת חשמל

- שיעור מתחדשות בתמהיל קיים וניסיון שנצבר בניהול רשת גמישה

2. מאפיינים גיאוגרפיים

- המצאות משאב השמש/רוח, אופי וביזור אוכלוסייה באי, אפשרות לחיבור חיצוני

3. דרישות מקומיות בתכנון קווי ומתקני החשמל

- ייצור מבוזר וניהול מקומי של מיקרו-גריד, שימוש באגירה מרכזית או מבוזרת, וחיבור בין-אזורים לצרכי גיבוי הדדי

4. אופן חישוב מחיר החשמל

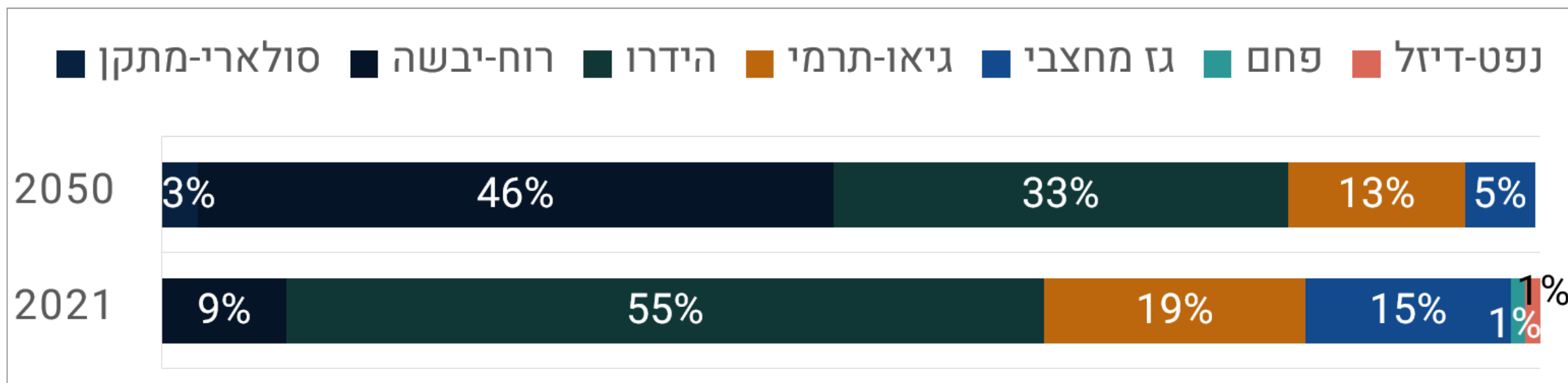
- שוק פעיל של היצע וביקוש או החלטה מרכזית

ולכן בכל מדינה זה מתבטא באופן שונה ביישום

דוגמא לתוכנית של אי-אנרגטי: ניו-זילנד

NZ: אתגרים – מצבי קיצון ותיאום

- מעבר ממצב של 80% חשמל נקי ל-95% חשמל נקי (כולל הידרו וגיאותרמי, ו-5% גז)
- איבוד שליטה עקב ארוע קיצון/סייבר על רשת הנתונים והמכשור החכם ברשת החשמל
- אופן ההחלה של שינויים עתידיים במסגרת הדרישות הטכניות של רשת החשמל
- תיאום בין מספר הולך וגדל של נקודות התחברות לרשת
- הרחבת הכישורים הנדרשים בצוותי העבודה



NZ: תיעדוף הפתרונות על פי סיכון

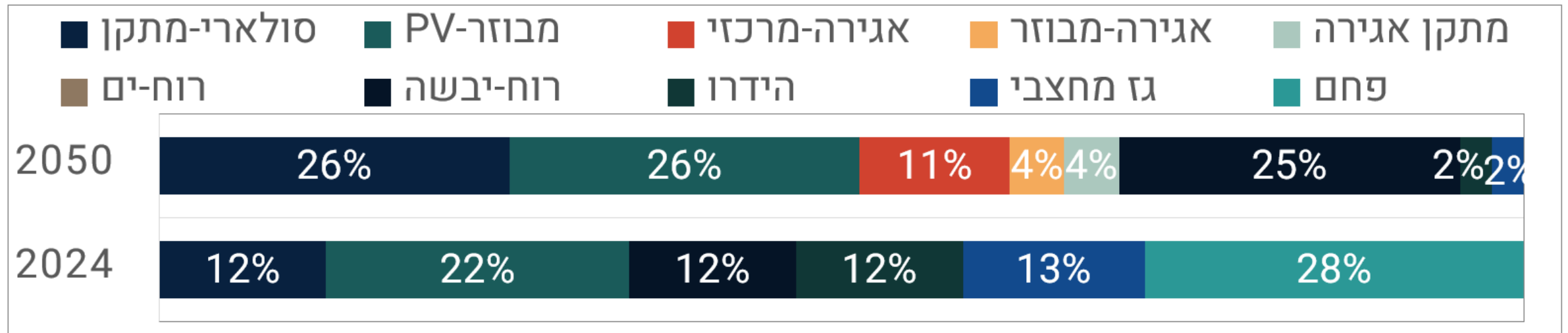
- מתן חשיבות גבוהה וזמן פתרון מהיר (עד 3 שנים) - אתגרי החלת השינויים בהתאם לדרישות המערכת, תיאום בין נקודות חיבור רבות והכשרת כוח עבודה
- חשיבות בינונית (טיפול עד 7 שנים) - מתקפות סייבר, הניטור של רשת מבוצרת, תפעול של רשת פחות יציבה והבניה של רשת-העתיד המבוצרת
- שאר האתגרים הוגדרו כסיכון נמוך וזמן פתרונם משתנה - חלקם כבר בתהליך יישום, כדוגמת המעבר לטכנולוגיות חדשות
- שיכתוב של הדרישות הטכניות, כך שלא יהיו מבוססות על טכנולוגיה מסוימת
- וידוא שטכנולוגיות חדשות מותאמות לדרישות המערכת
- וידוא שפיזור המתחדשות ברשת הוא בהתאם לקיבולת האפשרית
- וידוא שכוח האדם מוכשר בהיקף הנדרש לתמוך במערכת המשתנה

דוגמא לתוכנית של אי- אנרגטי: אוסטרליה

AU: אתגרים – הצורך באגירה ותקשורת

- מעבר מהספק מותקן (GW) של 60% חשמל נקי (מתחדשות והידרו) ל-90% (2% גז)
- בפועל הספק יצור (GWH) של 35% חשמל נקי ב-2023
- מיקוד בהגדלת האגירה ותקשורת בשוק החשמל

- פיתוח תוכנה לסחר יעיל ברשת – על פי מגבלות רשת ההולכה והעברת המידע באופן בטוח
- הגדרת התפקידים ותחומי האחריות של כל גורם ברשת-החשמל ותפעולה
- בחינת התועלת של כלים רגולטוריים לתפעול שוק חשמל שמבוסס על טכנולוגיות יצור שונות
- שילוב בעלי העניין, ספקים ולקוחות, בהגדרת הפתרונות לתפעול מערכת חשמל מבוזרת



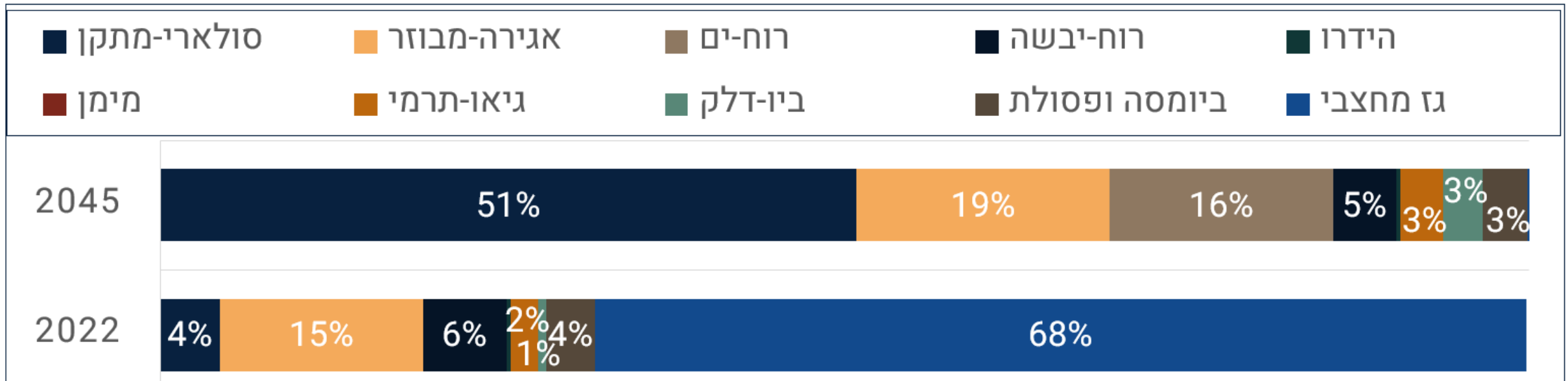
AU: פתרון – ניהול הביזור והגיוון ברשת-החשמל

- יוקמו אזורי-מתחדשות, רשתות VPP- Virtual Power Plant לאיגוד יצרני סולארי ואגירה, מיקרו-גריד
- ניהול מקומי-אזורי של פערי היצע וביקוש ופתרון בעיות מקומיות
- המנהל האזורי ישמש גם כנקודת תקשורת עם מנהלי הרשת הראשית
- איסוף מידע תמידי ועיבוד תחזיות – ע"י המנהל האזורי וגם המנהל הכללי
- תקשורת המידע תכלול תחזיות היצע וביקוש, ניטור משאבים וביצועים ברשת החשמל, מגבלות הספק וחסמים 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)
- מעבר לתקשורת-נתונים במבנה HUB, ולא חיבור של נקודה-לנקודה

דוגמא לתוכנית של אי- אנרגטי: הוואי

HA: מתמקדים בצורך, בהזדמנות ובצדק חלוקתי

- מעבר מ-30% חשמל נקי ל-100% נקי: 90% מתחדשות ו-10% גיאותרמי, ביודלק וביומאסה
- שילוב סולארי עם רוח עדיף לאורך זמן, גם מבחינת מחיר – ולכן בזה יתמקדו
- התרחישים כללו שיקולי מחסור בקרקע ועמידה ביעדי יישום מתחדשות
- הסיכונים כללו השפעה של סגירת מתקנים קיימים על התאמת ההיצע לביקוש ושמירה על הרזרבות הנדרשות בכל מצב חדש, כולל השפעות סייבר ושינויי אקלים



HA: פתרונות – גיוון וגמישות

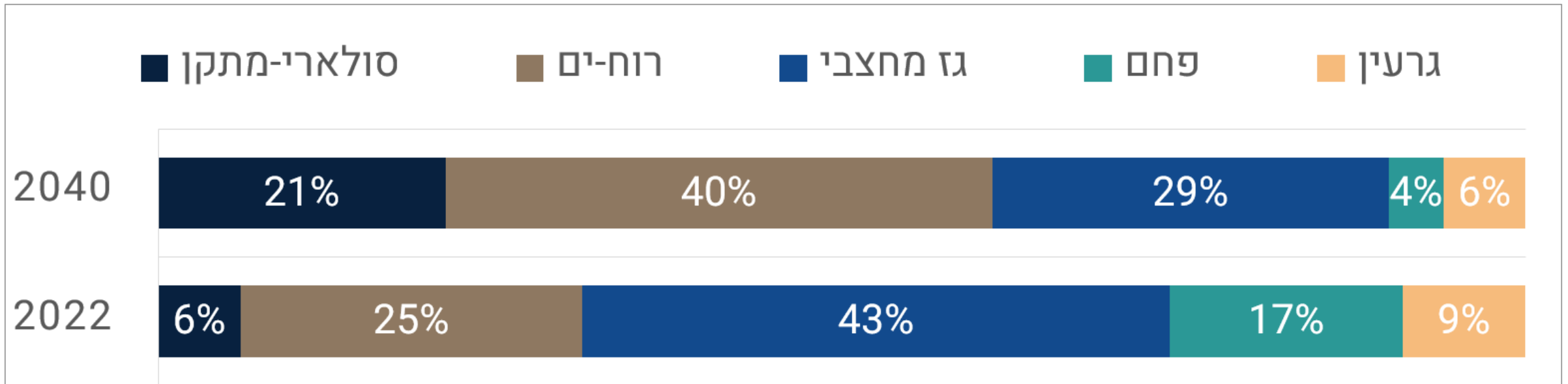
- ניתוח של ערך ההספק הנוסף משמש, רוח ואגירה בהשוואה לחישובי ההיצע-ביקוש יהוו גורם חשוב בהחלטה על אמינות הרשת לאספקת-החשמל
- גמישות בניהול ההיצע והביקוש - באמצעות ייצור חשמל ע"י יצרנים-צרכנים בכל שעה ובכל טכנולוגיה באופן מבוזר, ניתוב עודפים בין אזורים שונים ואגירת חשמל
- יפותחו אמצעים להתמודדות עם השפעת אירועי קיצון אקלימיים על אספקת החשמל, כדוגמת הרס של מתקנים סולאריים עקב סערות או מלחמה
- הפתרונות צפויים להגיע בחדשנות עתידית
- שדרוג של קווי ההולכה והאספקה יתבסס על חיזוק קווים קריטיים, כולל הטמנתם
- חיבור קווי חשמל בין תתי-אזורים ברשת ישמש כגיבוי לאספקת חשמל בעת תקלה
- פיתוח מודלים וסימולציה לתקלות ברשת לשם מציאת נקודות התורפה וטיפול בהן

דוגמא לתוכנית של אי- אנרגטי*: טקסס

* 90% מהמדינה מנוהלת באופן מנותק ממדינות שכנות ע"י חברה אחת

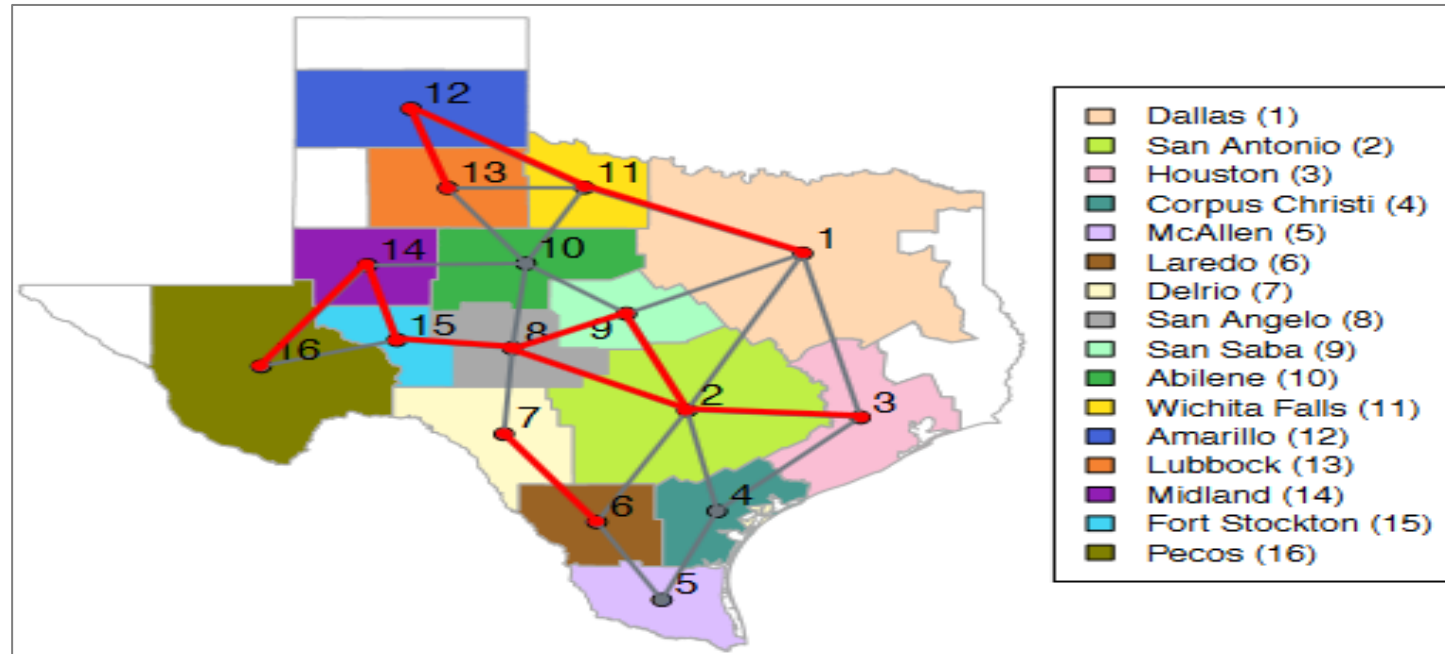
TX: אתגרים – יש דלק מחצבי ויש סיכון

- מעבר ממצב של 30% מתחדשות ל- 60% סולארי ורוח-בים (ו- 40% גז, פחם וגרעין)
- שמירה על מחיר נמוך והפחתת פליטות למרות שיעור גבוה של חשמל ממקור מחצבי
- השפעות שינוי אקלים: קפאון בתשתיות גז מחצבי הפילו את רשתות החשמל והמים, הוריקן הפיל את רשת החשמל- אנשים נספו, לא היה מידע בסיסי והמחירים השתוללו
- מתקפות סייבר ופעימה אלקטרומגנטית על ציוד חשמל חכם



TX: פתרונות – גיוון וגיבוי הדדי בין מחוזות

- גיבוי הדדי בין מחוזי באמצעות קווים משודרגים ותמהיל טכנולוגי מגוון בכל מחוז
- עלות השדרוג צפויה בעיקר בעשור הקרוב ואז תהיה ירידה במחיר
- הפחתת סיכון מהשפעות אקלים ומתקפות רשת באמצעות ניהול מקומי בכל מחוז

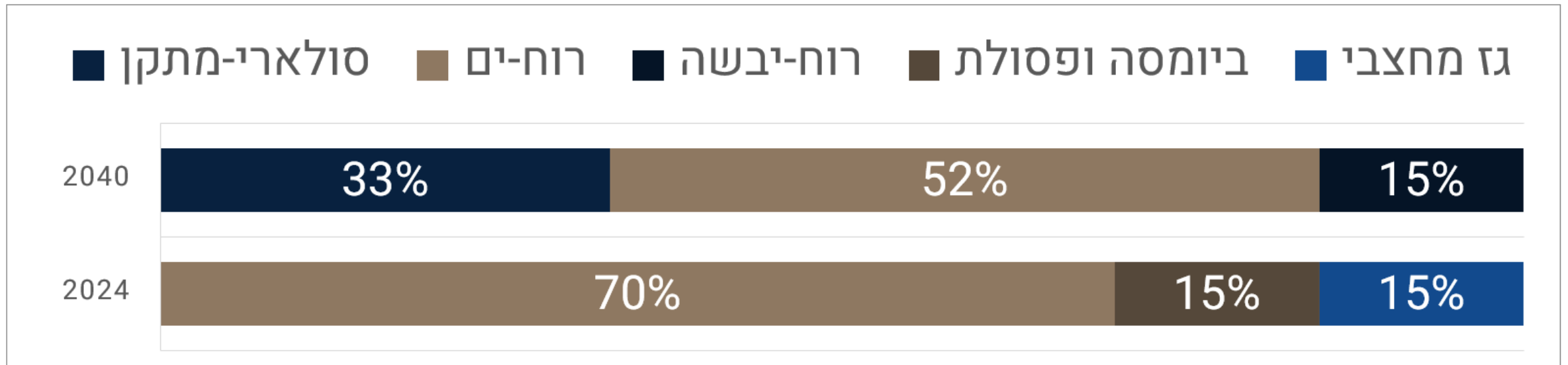


דוגמא לתוכנית של מדינה "מקושרת" *: דנמרק

* דנמרק מהווה דוגמא ליישום החזון האירופאי לאפס פליטות

DK: אתגרים – גמישות ושילוב רשתות חשמל ומימן

- מעבר ממצב של 70% מתחדשות ל-100% סולארי ורוח-בים וביבשה, עם אפס פליטות
- תמהיל מתחדשות ולא רק תמהיל נקי – סגירת מתקני גז וביומסה
- ייצוב הרשת בתמהיל מגוון ובשיפוי של יצרן-צרכן גמיש שמסייע בזמן תנודות בתדר ובמתח
- גיבוי הדדי עם מדינות שכנות ושותפות בתפעול אי-אנרגיה מלאכותי מבוסס טורבינות רוח בים
- ייצור מימן וביו-גז לחימום ודלק בזמנים של "עודף" ייצור ביחס לביקוש



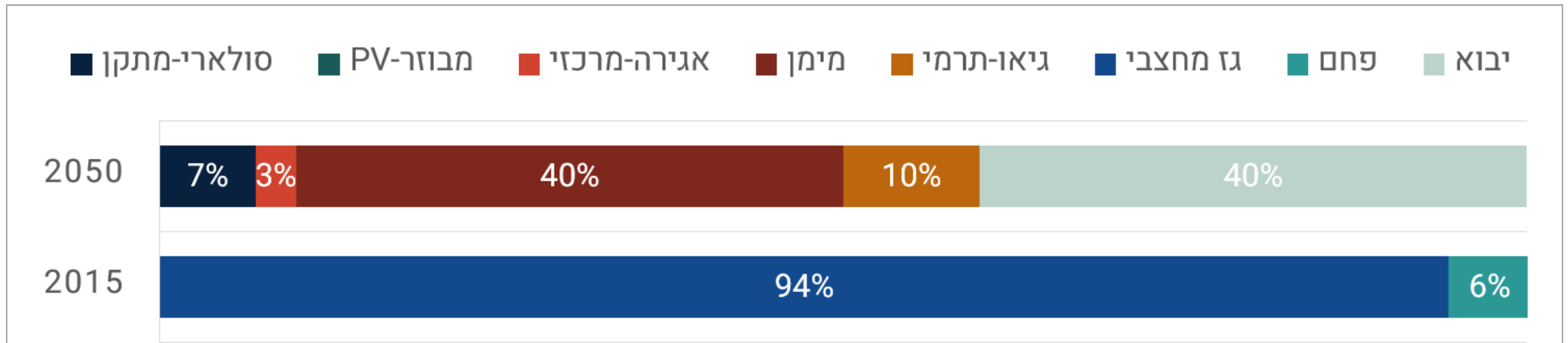
DK: פתרונות – גיבוי הדדי בין מדינות ואי-אנרגיה

- גיבוי הדדי בין מדינות באמצעות קווים משודרגים ושותפות באי אנרגיה בים
- הוקם שוק להספק חשמל שעל פי הספק חשמל מיוצר מנהל את שירותי-הרשת-הגמישה ע"י בחירת התשתיות והאמצעים לאיזון התדר, אספקת גיבוי לכשל אפשרי, התאמת היצע-לביקוש והשלת עודפים (Ancillary services)
- השוק מנהל כל רשת מחוזית ומדינתית ויורחב לשוק בין-מדינתי
- איזון התדר ברשת נעשה באופן יזום ופרואקטיבי בהתאם לנתוני ניטור שנאספים תדיר בשילוב תחזיות לביקוש והיצע, כפי שמדווח על ידי המשתתפים במשק
- ציוד בעל זמן תגובה איטי יוחלף בציוד חדיש ומהיר יותר
- צנרת בין מדינתית של חשמל ומימן יהוו גב שדרה מרכזי באירופה

דוגמא למדינת-עיר: סינגפור

SG: אתגרים – אי וודאות טכנולוגית

- מעבר ממצב של 0 מתחדשות ל- 60% ייצור נקי ב-2050
- למקסם את השימוש בחשמל משמש ולהוסיף אגירה לניהול השינוי באספקה
- לשלב טכנולוגיות נקיות בהתאם לחדשנות בתחום אצירת פחמן, חשמל גיאותרמי, היתוך גרעיני, ביו-מתאן ואגירה
- לפתח רשת חשמל רב-שכבתית (multi-layer) לבקרה וניהול מתחדשות
 - הגברת אמינות האספקה והפחתת סיכונים, וכן לתקשורת נתונים במבנה מבוזר ולא ממורכז.



SG: פתרונות – חדשנות לגיוון וגמישות התמהיל

- בניית גמישות ברשת החשמל שתאפשר שימוש בטכנולוגיות שונות
- לבחון יבוא חשמל משכנות כגיבוי לאספקה מקומית ולהפחתת פליטות (40-60% מהתמהיל)

- לפתח את השימוש במימן ירוק בייצור חשמל להפחתת פליטות (40-60% מהתמהיל)

- לבנות את סינגפור כאתר ליישום ראשוני של טכנולוגיות חלוץ וכמעבדה-חיה ליישום עבור שאר המדינות

- להשתמש בטכנולוגיות דיגיטאליות לשיפור תהליכים לתכנון הרשת ותפעולה

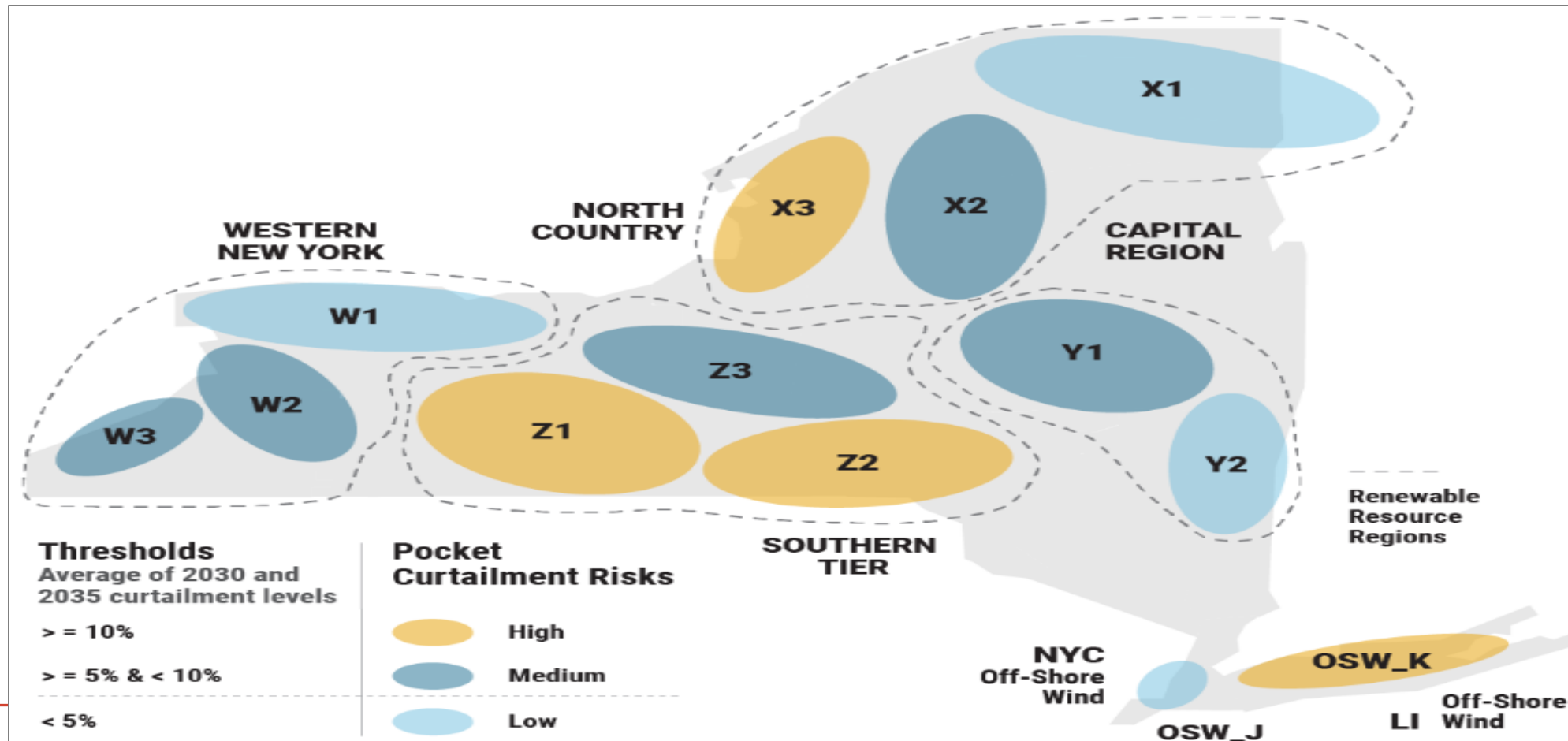
- ניהול אקטיבי של הגידול בביקוש - בהתאם לשינוי במחיר ולכניסה של טכנולוגיות חדשות

- התייעלות - טכנולוגיות חדשות לניהול הביקוש אצל הצרכנים

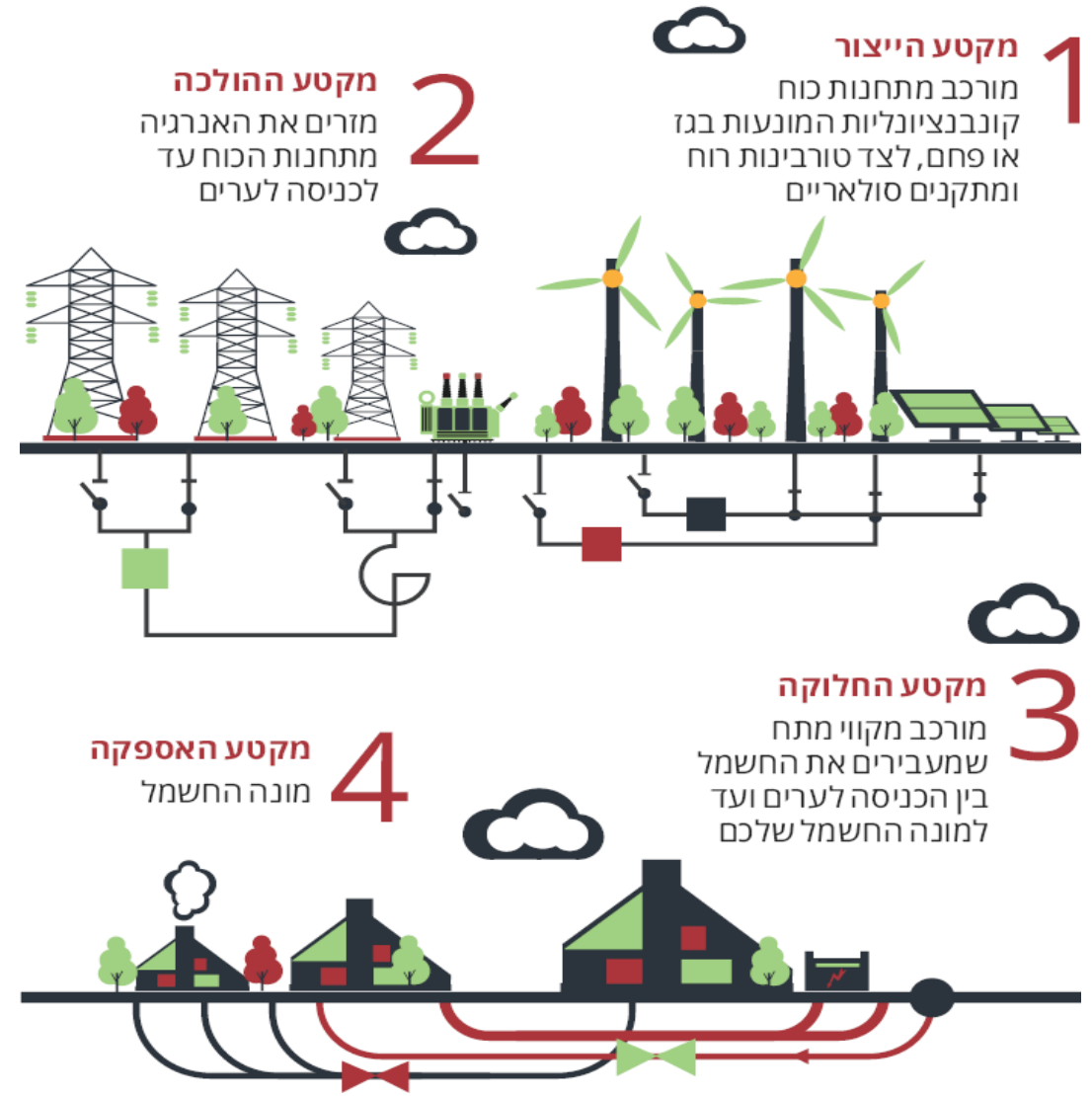
- לפתח ולהשתלב בשווקים בינלאומיים לסחר בפחמן

דוגמא נוספת: מדינת ניו יורק – ביזור וגיוון בכל אזור

- האתגר - כל המתחדשות במקום אחד, ניהול הסיכון בתמהיל
- הפתרון – תמהיל מגוון ורמת סיכון מגוונת בכל אזור כחלק מתהליך התכנון



מסקנות בהתאמה לישראל



מקור: דה מרקר

סיכונים לרשת החשמל - מהסקר ובישראל

- ביקוש גבוה מהספק היצור - הפסקות חשמל יזומות
- יציאה מאיזון תדר ומתח - נפילת הרשת
- שינוי אקלים – סופות והצפות, גלי חום והגדלת אובדן בייצור ובהולכה, שריפות וכן קפיאת תשתיות
- מתקפת סייבר - פגיעה בניטור ובנתונים ברשת, קריסת מערכות
- גל אלקטרומגנטי - שיבוש זרימת החשמל ותרחישי עלטה
- מלחמות ופגיעה פיזית בתשתיות – ניתוק אזורים מהרשת
- סיכון טכנולוגי – אי וודאות בשילוב חדשנות וסגירת מתקן קיים

ניתוח חלופות שניתן ליישם בישראל

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 ההספק 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, חיזוי אופן האספקה 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 מערכתית, פחות סיכון בהשוואה למקור אחד מרכזי	אפשרות לפתרון מהיר בעת כשל	פתרון בעיות זמניות בקווי הולכה וגיבוי בעת 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 קווים זניחה למתקנים	שימוש במונים חכמים ידייק את החיוב לפי שעה וצרכן
סיכון מתקפת סייבר או גל-אלקטרומגנטי	ניתן לבודד אזורים נפגעים בשימוש ב-microgrid	ניתן לבודד תשתיות ולהפעיל חלופות	מאפשרת התאוששות מהירה	חיבור מגדיל סיכון להשפעה נרחבת, אך מיקרו-גריד מסייע בבידוד	מגדיל פגיעות וסיכון
סיכון עקב אירועי אקלים	ניתן לבודד אזורים בעת שרפה או הצפה ולספק חשמל מאזור שכן	פגיעה חלקית באזור הסיכון, לא בכל הרשת	גיבוי למתקן שנפגע בעת כשל	הטמנת קווים תקטין סיכון מאירועי קיצון	ניטור ואיתור כשל מידי יקטין נזק

מסקנות מרכזיות – רשת החשמל

- תמונה עתידית של רשת החשמל תהיה מבוססת מקורות מתחדשים, אגירה וניהול מידע
- אספקת חשמל יציבה ורציפה מחייבת ניהול יצרנים-צרכנים שזמינים ברשת גמישה ומגוונת
- שדרוג רשת החשמל תלוי ברכש ציוד חכם וחיזוק השידור של הקווים בין איים של מיקרו-גריד
- שיפור תקשורת הנתונים תאפשר חיזוי כשלים – עם הגדלה של תדירות איסוף ועיבוד המידע המבוזר (כל חצי דקה!)
- מיקרו- וננו-גריד מחייבים הגדרת תחומי אחריות לניהול מקומי בתיאום עם ניהול מרכזי

מסקנות מרכזיות – תכנון התמונה העתידית

- שיפור התיאום בין הגורמים העיקריים בשוק החשמל הוא קריטי בעבודה המשותפת להגדלת הייצור מאנרגיות מתחדשות
- השפעת שדרוג רשת החשמל על מחיר החשמל היא בטווח הקצר ומבטיחה ירידה בטווח הארוך
- תכנון משולב חשוב שינתח את ההשפעה של כל סיכון על הרשת, לזהות פתרונות ולשלב אותם בתרחישים, למשל – הטמנת קווים
- לביסוס התכנון חשוב לקדם פיילוט באזורים שונים ולאפשר
- ניתוחי עלות-תועלת מעמיקים ועידוד דו-שימוש בקרקע מוגבלת
- התאמת הרגולציה הקיימת לאחת שמבוססת שילוב מיקרו-גריד
- עידוד ותמיכה בהקמה, למשל - פיילוט של מיקרו-גריד והטמנת קווים

המלצות רגולציה

- מיצוי ההזדמנויות ברפורמה בחשמל
 - עידוד התקנת מונה חכם בכל בית וניהול מבוזר של יצרנים-צרכנים
 - שת"פ עם משרד התחבורה במעבר לרכב חשמלי וטעינה, עם משרד התעשייה בחישמול תהליכים וכן עם המשרד להגנת הסביבה להפחתת הפליטות
 - לדוגמה - בהוואי ואירלנד.
- עידוד השילוב של שימושי קרקע וחדשנות לצמצום היקף הקרקע הנדרש להפקת קוט"ש חשמל וגיוון תמהיל הייצור בכל אזור
 - לדוגמה - בהוואי ודרום קוריאה
- יישום הדרגתי של שיפורים ברשת החשמל והחלת עלות הרפורמה במחיר החשמל
 - תיעדוף שלבי יישום ועלותם על פי רמת ההשפעה על כלל הצרכנים, כמו לדוגמה בניו-זילנד
 - יישום בהבנה שהעשור הקרוב משמעותי מבחינת עלויות ואחר כך תתכן ירידה, כמו לדוגמה באנגליה וארה"ב
- החלת חוק מס-פחמן ושימוש בכסף לשדרוג רשת החשמל וקידום רשת מבוססת מיקרוגריד
 - כמנוף להפחתת שיא הביקוש, מזעור כשלים במערכת וניהול ביקושים מבוזר
 - לדוגמה - בדנמרק ואנגליה בפרט, ובמקומות נוספים
- שימוש בכספי קרן אזרחי ישראל לקידום מו"פ, פיילוטים ויישום של מיקרו גריד

"חשמל זורם בכפות ידייך..."

מעקב אחר פרסומים חדשים ומידע נוסף

www.neaman.org.il