

חוסן אנרגטי בישראל- רשת חשמל ריכוזית אל מול רשת חשמל

מבזרת

סקירת סיכונים

ד"ר דניאל מדר



מאי 2023

הכותב:

ד"ר דניאל מדר- שותף מייסד של SP Interface. חוקר ויועץ בתחומים מדע וסביבה, עם דגש על תחום האנרגיה. עוסק משנת 2003 בתחום האנרגיה; עובד עם ממשלות, חברות, אקדמיה ו-NGOs- בארץ ובעולם.

העבודה מומנה ע"י גרינפיס ים תיכון בע"מ (חל"צ).

עבודה זו אינה כוללת מידע חסוי אלא מידע גלוי בלבד. הכתוב משקף את דעת הכותב בלבד, ואינו מהווה ייעוץ. הכותב או גרינפיס לא יישאו בכל אחריות לשימוש בכתוב במסמך זה. לשם ייעוץ ספציפי, ניתן לפנות לכותבים. בכל שימוש בתוכן זה יש לציין כי מקורו במסמך זה.

תוכן עניינים

5	..... תקציר	1
9	..... רקע	2
10	..... הרכב רשתות חשמל	3
11	..... סקטור חשמל ריכוזי מבוסס דלקי מאובנים	3.1
11	..... דלקים לייצור חשמל ריכוזי	3.1.1
15	..... מבנה רשת חשמל ריכוזית	3.1.2
17	..... סקטור חשמל מבוזר מבוסס אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה	3.2
18	..... דלקים לייצור חשמל מבוזר מבוסס אנרגיה פוטו-וולטאית	3.2.1
18	..... מרכיבי רשת חשמל מבוזרת מבוססת אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה	3.2.2
24	..... גורמים העשויים להשפיע או לפגוע בסקטור החשמל	4
24	..... גורמים טבעיים	4.1
24	..... אקלים, מזג אוויר, מחזורי יום ועונות	4.1.1
25	..... רעידת אדמה	4.1.2
25	..... צונאמי	4.1.3
26	..... מזג-אוויר קיצוני	4.1.4
28	..... התפרצות סולארית חריפה	4.1.5
28	..... חורף געשי	4.1.6
29	..... גורמים אנושיים	4.2
29	..... תקיפה פיזית	4.2.1
34	..... תקיפת סייבר/ תקיפה וירטואלית	4.2.2
35	..... מניפולציות גיאופוליטיות	4.2.3
35	..... רשלנות, חוסר מוכנות או אילוצים	4.2.4
36	..... השוואת סיכונים לשתי החלופות	5
36	..... סיכון הנובע מהיות ישראל אי אנרגטי	5.1
37	..... סיכון הנובע מהמרחק וממספר השלבים בין מקור האנרגיה וצרכן החשמל	5.2
39	..... סיכון הנובע מפגיעה באספקת האנרגיה המשמשת לייצור חשמל	5.3
39	..... דלקי מאובנים	5.3.1
41	..... אנרגיות מתחדשות מודרניות	5.3.2
43	..... סיכון הנובע ממספר קטן של חלקים קריטיים במערכת	5.4
47	..... פוקוס: השבתת נמל הפחם בתחנת הכוח רוטנברג במרץ 2023	5.4.1
47	..... פוקוס: תלות 70-80% משוק האנרגיה הישראלי בגז טבעי	5.4.2
50	..... סיכון הנובע מגודל תשתית חשמל אחת	5.5
51	..... סיכון כלכלי	5.6
55	..... סיכון משני הנובע מפגיעה בחומרים מסוכנים בסקטור החשמל	5.7
58	..... מחקרים בנושא חוסן אנרגטי ברשתות חשמל	5.8

58.....	מדוע רשת ריכוזית אינה חסינה?	5.8.1
58.....	מדוע רשת מבוזרת חסינה יותר?	5.8.2
63.....	מה ממליצים המחקרים לעשות?	5.8.3
65.....	מקרי בוחן	6
66.....	ביזור תשתיות מיגון מפני איומים אוויריים בישראל	6.1
66.....	תקיפות תשתיות אנרגיה במדינות המפרץ הפרסי	6.2
67.....	מלחמת רוסיה אוקראינה 2022-2023	6.3
67.....	אוקראינה	6.3.1
70.....	רוסיה	6.3.2
71.....	שאר העולם	6.3.3
73.....	מזג אוויר קיצוני בארה"ב 2020-2022	6.4
74.....	חוסן אנרגטי והעדרו בהוריקן איאן	6.4.1
	עליה תלולה באגירת אנרגיה מבוזרת כתוצאה מהעדר חוסן אנרגטי ברשת החשמל האמריקאית	6.4.2
	74	
78.....	רצועת עזה	6.5
83.....	אוסטרליה	6.6
84.....	דרום אוסטרליה	6.6.1
88.....	מערב אוסטרליה	6.6.2
90.....	חוסן אנרגטי ויציאה למרכז רביעי של חיפוש גז טבעי בים התיכון	7
92.....	מסקנות	8
94.....	המלצות	

1. תקציר

רשתות חשמל קובננציונליות הן ריכוזיות, הדלקים שלהן משונעים, מולכים או אגורים במספר אתרים מצומצם (בישראל, פחות מעשרה), החשמל בהן מיוצר במספר מתקנים מצומצם (בישראל, עשרות אתרים), מהם החשמל מועבר באמצעות מערכת הולכה מצומצמת בהיקפה לאזורים השונים (בישראל, עשרות קווים), ורק לאחר מכן החשמל מחולק באמצעות מערכת חלוקה מסועפת יותר (בישראל, עשרות אלפי שנאים/קווים) אל הצרכנים (בישראל, מספר מיליונים).

חוסן אנרגטי הוא היכולת של מערכת שמספקת אנרגיה להתמודד עם איומים, לסבול ממינימום פגיעה באספקת האנרגיה לצרכנים בעת פגיעה במערכת, ולהתאושש במהירות מאירוע שכזה. בעוד מערכת חשמל ריכוזיות הן יחסית קלות לתכנון ולשליטה, ואפשרו צמיחה כלכלית מהירה, רווחה ואיכות חיים במאה השנים האחרונות; הן מתוכננות עם יתירות מוגבלת שמאפשרת להן חוסן מסוים בפני פגיעות מוגבלות בזמן ו/או במקום, אך הן אינן חסונות אנרגטית בפני פגיעות נרחבות במערכת.

ישנן מספר נקודות תורפה מובנות ברשתות חשמל ריכוזיות: הן פגיעות לנזקים משמעותיים בחלקיה הקריטיים שמספרם נמוך (מאגרי או מערך ההולכה של הדלקים, תחנות הכוח, תחנות מיתוג, רשת ההולכה ותחנות המשנה), מבנה קווי (לינארי) המורכב ממספר חלקים קריטיים לא מאפשר את הולכת החשמל לצרכנים כאשר חלק אחד במבנה הקווי לא מתפקד, פגיעה ביצרנים או צרכנים גדולים של חשמל שמחוברים לרשת יכולה להפיל את הרשת עקב היווצרות חוסר איזון קיצוני בה.

הגורמים העשויים להשפיע או לפגוע ברשתות חשמל מתחלקים לגורמים טבעיים ולגורמים אנושיים. דוגמאות לגורמים טבעיים הם אקלים, רעידות אדמה, צונאמי, ומזג-אוויר קיצוני. דוגמאות לגורמים אנושיים הם רשלנות, חוסר מוכנות, אילוצים, תקיפה פיזית ותקיפת סייבר. פגיעה משמעותית אחת בחלק קריטי ברשת חשמל ריכוזית עשויה לפגוע באספקת החשמל לאזור שלם בארץ בו מתגוררים ועובדים מאות אלפי אנשים, ומספר פגיעות בו זמנית במספר אתרים קריטיים עשויות לפגוע באספקת החשמל לרוב המדינה, למשך זמן רב.

פגיעות זאת של רשתות חשמל ותשתיות אנרגיה ריכוזיות הודגמו פעמים רבות: מהוריקן מריה ב-2017 שהשבית את כל רשת החשמל בפורטו-ריקו; דרך תקלה בארגנטינה שהשביתה את כל רשת החשמל במדינה וחלקים מרשתות החשמל במדינות השכנות; שריפות באוסטרליה שפגעו בקווי הולכה וחלוקה ארוכים וניתקו צרכנים רבים מחשמל לתקופות ארוכות; תקיפות מאות אתרי תשתית חשמל ואנרגיה באוקראינה ע"י הרוסים שהביאו להשבתת 50% מרשת החשמל ב-2022-2023; השבתת אספקת הגז הרוסי לאירופה ממניעים גיאופוליטיים הכרוכה בפיצוץ שני אתרים בכל אחד מצינורות הגז התת-ימיים נורדסטרים 1 ו-2 מרוסיה לגרמניה; ועד קריסת עגורן בנמל הפחם של תחנת הכוח

רוטנברג באשקלון לה אשר פוגעת קשות בתפקוד תחנת כוח שמספקת עד 20% מצריכת החשמל במדינה. ההתאוששות מפגיעות שכאלו, עשויות לקחת שבועות, חודשים ואפילו שנים.

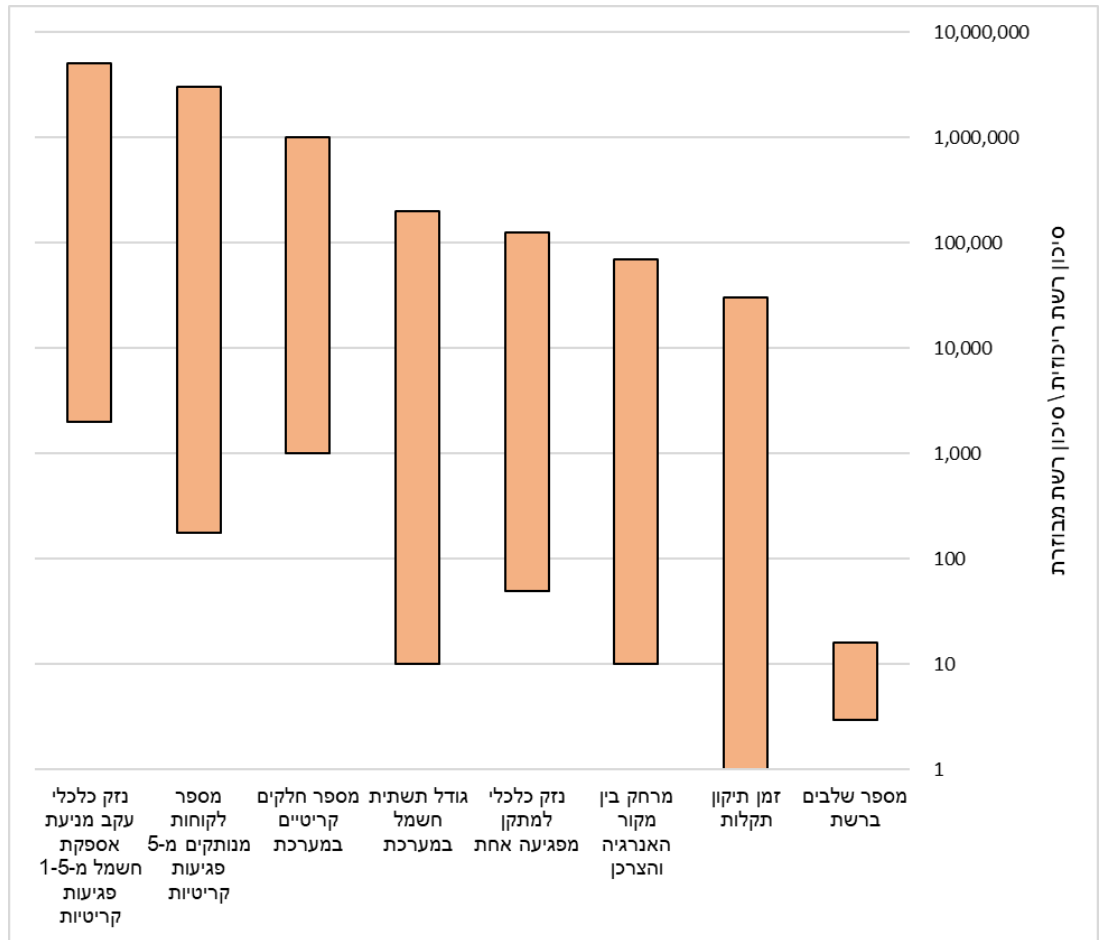
אם בעבר, טכנולוגיות של אנרגיות מתחדשות מודרניות כמו תאים פוטו-וולטאיים (PV) וטורבינות רוח לא יכלו לספק חשמל באופן רציף או לפי דרישה ונעדרו חוסן אנרגטי, כיום בשילוב הטכנולוגיות המשלימות אגירת אנרגיה, מיקרוגרید ורשת חכמה – הן מסוגלות ליצור רשתות חשמל מבוזרות בעלות חסינות אנרגטית גבוהה מאוד, ברמה שהינה בלתי אפשרית ברשת ריכוזית. ברשת חשמל מבוזרת, אספקת האנרגיה, יצור החשמל ואספקתו אינם מתרחשים בכמה עשרות אתרים בלבד (בישראל), אלא מתבצע במאות אלפי ואף במיליוני אתרים. בשטחים פתוחים, על מבנים, על תשתיות (גשרים, מחלפים, רכבות, מאגרים...), על שטחים חקלאיים ביחד עם גידולים חקלאיים (אגרי-וולטאי).

לעומת דלקי מאובנים, טכנולוגיות אלו פוגעות בסביבה בסדרי גודל פחות בכל פרמטר סביבתי, זולות יותר כבר היום, בעלות צפי וודאי להוזלת מחירים משמעותית בעתיד, מצמצמות אבדן חשמל, מצמצמות צורך בהקמת תשתיות יקרות, מספקות פי 8 יותר מקומות תעסוקה לכל קילו-וואט מיוצר, מאפשרות יצור ואגירת אנרגיה כמעט בכל מקום וע"י כמעט כל אחד, מאפשרות דמוקרטיזציה של יצור אנרגיה, והן בשלות כיום.

רשתות חשמל מבוזרות חסינות אנרגטית מכיוון שאין להן מספר מצומצם של חלקים קריטיים שפגיעה בהם משביתה את רשת החשמל למאות אלפי ואף למיליוני אנשים; אלא הן מורכבות ממספר גדול של רכיבים עמידים עם הספק קטן, שאינם דורשים תחזוקה משמעותית, שגם אם רבים מהם לא יעבדו- לא תהיה לכך כמעט השפעה על הרשת. המרחק בין יצור החשמל וצריכתו קטן מאוד (אפילו מטרים ספורים) ולכן ההסתברות לתקלות נמוכה יותר. המבנה שלהן הוא יותר כמו רשת דיג שיכולה להעביר חשמל לרוב חלקיה גם אם כמה קווים או צמתים נפגעים, ופחות כמו עץ שפגיעה משמעותית בגזעו מביאה לנפילתו (רשת ריכוזית).

רשתות חשמל ריכוזיות הן בעלות סיכון גבוה יותר לפגיעה בכל הפרמטרים שנבדקו, ובעלות יכולת התאוששות איטית ויקרה הרבה יותר לעומת רשתות מבוזרות. הסיכון לרשת ריכוזית עקב מספר השלבים בה, גבוה פי 3-13 לפחות לעומת רשת מבוזרת (ראו תרשים א'). הסיכון לרשת ריכוזית עקב הזמן שלוקח לתקן תקלות ברשת, גדול פי 1-30,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית עקב המרחק בין מקור האנרגיה והצרכן, גדול פי 10-70,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית הנובע מגודל תשתית חשמל במערכת, גדול פי 10-200,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית הנובע ממספר חלקים קריטיים במערכת, גדול פי 1,000-1,000,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון הכלכלי ממניעת אספקת חשמל ללקוחות ברשת ריכוזית גדול פי 2,000-5,100,000 מאשר ברשת מבוזרת.

תרשים א: השוואת סיכונים בין רשת חשמל ריכוזית ומבוזרת. ציר Y- יחס הסיכון בין שני התרחישים בסקאלה לוגריתמית (סיכון ברשת ריכוזית\ סיכון ברשת מבוזרת). הפרמטרים: מספר שלבים עיקריים ברשת (ראו 4.2), זמן לתיקון תקלות (ראו 4.5), מרחק בין מקור האנרגיה והצרכן (ראו 4.2), נזק כלכלי למתקן מפגיעה אחת (ראו 4.6.1), גודל תשתית חשמל קריטית במערכת (ראו 4.5), מספר חלקים קריטיים במערכת (ראו 4.4), מספר לקוחות מנותקים מ-5 פגיעות קריטיות ברשת, נזק כלכלי עקב מניעת אספקת חשמל מ-1-5 פגיעות קריטיות ברשת (ראו 4.6.2).



ישנן דוגמאות רבות לחוסן של רשתות חשמל מבוזרות: הצבא האמריקאי הופך יותר ויותר מבסיסיו למיקרוגרידים מבוססי PV ואגירה כחלק מקידום חוסן אנרגטי ביטחוני. העיירה בבקוק ראנץ' שבפלורידה תוכננה ובנתה כעיירה חסינה בפני הוריקנים; היא שרדה את הוריקן איאן שעבר בדיוק דרכה ב-2022 ללא פגע הודות בין היתר לרשת חשמל מבוזר; בעוד 4 מיליון בתי אב ועסקים באזור איבדו את אספקת החשמל שלהם ומאות אלפים היו מנותקים מהחשמל אפילו 5 ימים מאוחר יותר. רצועת עזה, שחוותה חוסר ביטחון אנרגטי במשך זמן רב בעקבות סבבי הלחימה עם ישראל, הצמיחה באופן אורגני מערך מבוזר של ייצור ואגירת אנרגיה חסין בפני הפצצות, סגרים, עליות מחירים ושרשרת אספקה לא מתפקדת; שכבר ב-2019 סיפק 25% החשמל ברצועה (לעומת 5.8% בישראל באותה תקופה).

האיחוד האירופי סוף סוף מפנים גם הוא, כי הסתמכות על יבוא דלקי מאובנים אינה מקנה חוסן אנרגטי. אמנם, לאור מלחמת רוסיה ואוקראינה ומשבר האנרגיה שיצרו הרוסים, בטווח הקצר האיחוד עושה כל שביכולתו בכדי להשיג דלקי מאובנים עבור סקטור האנרגיה שלו, ובהתאם הוא גם פנה לישראל לבחון קידום יצוא גז טבעי מישראל לאירופה. אולם, בטווח הבינוני והארוך האיחוד מצמצם את ההסתמכות על דלקי מאובנים, מתכנן סיום שימוש בהם, ומגביר הקמת מתקני אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה.

בשנת 2022 הספק מתקני האנרגיות המתחדשות אשר הוקמו באירופה היה גבוה ב-34% מהתכנון, ולראשונה הופק באירופה יותר חשמל מאנרגיות מתחדשות לעומת גז טבעי (ב-2019 המתחדשות כבר עקפו את הפחם), ב-2023 צפויה צניחה של 20% בשימוש בדלקי מאובנים באירופה, ואחרי 2025 צפויה להתחיל צניחה בהיקף השימוש בגז טבעי ביבשת. במרץ 2023 נציבות האיחוד האירופי פרסמה הצעה חדשה לסיום השימוש בדלקי מאובנים **עקב חוסר יכולתם לספק חוסן אנרגטי**, ולהגברת השימוש באנרגיות מתחדשות ובאגירה **בשל החוסן האנרגטי המובנה שלהם**.

הגדלת מספר האסדות המספקות גז טבעי לישראל מ-3 ל-4, ל-5 או אפילו ל-6; תשפר את יתירות המערכת ותוכל לספק חוסן אנרגטי בזמן שגרה, אל מול תקלות שגרתיות ותקיפות מוגבלות של החמאס. אולם, הממצאים המובאים בעבודה זו מראים, כי יציאה למכרז רביעי לשיווק שטחים במים הכלכליים לחיפושי גז טבעי חדשים לא רק שלא ישפרו את החוסן האנרגטי הישראלי באופן **משמעותי**, אלא היא אף תפגע בחוסן האנרגטי **האסטרטגי הישראלי**. **בסביבות שנת 2035, כאשר כ-70% מסקטור האנרגיה כולו (חשמל, תחבורה, תעשייה) יהיה תלוי בגז טבעי ישראלי, 5 פגיעות מדויקות בתשתית האנרגיה הישראלית עלולות להשבית את משק האנרגיה כולו**.

זאת, עקב העמקת ההסתמכות כמעט בלעדית על מספר מצומצם מאוד של מאגרי גז טבעי, מספר מצומצם של תשתיות חשמל קריטיות ופגיעות, וחוסר השקעה מספק בחלופות עדיפות בסדרי גודל מבחינת חוסן אנרגטי (ושלל פרמטרים אחרים). כגון: PV, אגירת אנרגיה. מיקרוגריד ורשתות חכמות.

בעיות שורשיות של העדר חוסן אסטרטגי קיימות במספר מערכות ותשתיות חיוניות בישראל, כמו במערכת המים לשתייה, סקטור האנרגיה באופן כללי, נמלי האוויר והיבשה, ואספקת דגנים. בחלק ממערכות אלו אין כיום חלופות בעלות התכנות טכנולוגית ו/או כלכלית. אולם, כיום יש לרשת החשמל הריכוזית חלופה בעלת חוסן אסטרטגי, עם התכנות טכנולוגית וכלכלית.

לכן, מומלץ בראש ובראשונה לקדם עבודות או מחקרים שיכמתו את ההבדלים בחוסן האנרגטי האסטרטגי בין רשת חשמל ריכוזית לבין שת חשמל מבוזרת, שיכמתו את המשמעויות הכלכליות עבור ישראל ושיתוו דרך אופטימלית לשילוב רשתות חשמל מבוזרות ברשת החשמל הישראלית. מומלץ לקדם רשתות חשמל מבוזרות מבוססות PV, אגירה, מיקרוגריד ורשתות חכמות- בכל התחומים: מחקר ופיתוח, פיילוטים, חקיקה, רגולציה, הסרת חסמים, תקציבים; וכן בכל הרמות- הדירה, הבניין, השכונה והיישוב.

במקביל לפיתוח רשתות חשמל מבוזרות, מומלץ לשמור על יכולת גיבוי של רשת החשמל בגז טבעי לטווח הזמן הבינוני. ע"מ להתמודד עם מקרים נדירים של חורף געשי או גרעיני, מומלץ לבחון ולפתח חלופות בנות קיימא וחסיונות, לגיוון מקור האנרגיה המתחדש העיקרי בישראל (שמש); כגון אנרגיה גיאותרמית, רוח בגובה רב או בים ואנרגיית גלים. מומלץ לפתח אמצעים להגן על רשת החשמל מפני התפרצות סולארית חריפה ומתקפת פולס אלקטרו-מגנטי.

חוסן (resilience) הוא היכולת של מערכת להתמודד בהצלחה עם פגיעה נרחבת, להכיל את הפגיעה בהתאם לממדיה, לאפשר נסיגה תפקודית גמישה (bend rather than break), לאפשר התאוששות מהירה וחזרה לתפקוד תקין, ברמה המאפשרת שימור זהותה ותפקודה של המערכת^{1 2}. או במילים אחרות, מערכת היא חסונה, כאשר תפקודה לא נפגע בצורה מהותית כאשר המערכת סופגת פגיעה, כאשר המערכת יכולה לצמצם את פעילותה כתגובה לפגיעה ולא לצאת מכלל שימוש עקב הפגיעה, ומאוחר יותר לחזור לתפקוד סביר במהירות.

בעבר, מדינת ישראל זיהתה שאין לה **חוסן ביטחוני** מפני מתקפות טילים ורקטות במהלך מלחמת המפרץ הראשונה, ולכן מאז שנות ה-1990 היא פועלת לביזור מיגון פיזי מפני מתקפות אלו לרמת המוסד, הבניין והדירה. ביזור מיגון בטחוני זה הביא לחוסן ביטחוני שאין שני לו בעולם מפני מתקפות טילים ורקטות, ומאפשר לישראל להתמודד עם מתקפות טילים ורקטות תדירות במהלך העשורים האחרונים, עם פגיעות מינימליות בשגרת החיים, באיכות החיים ובצמיחה הכלכלית.

חוסן אנרגטי אם כך, הוא היכולת של מערכת, ארגון או מדינה, להתמודד עם פגיעה באספקת האנרגיה שלה וכן להחזיר את אספקת האנרגיה לרמה מספקת זמן קצר לאחר פגיעה בה. מכיוון שכל מדינה מודרנית נשענת על אספקת אנרגיה סדירה לקיום רוב פעולותיה, חוסן אנרגטי הינו קריטי לשגשוגה של מדינה מודרנית.

ניתן להבחין בין חוסן אנרגטי **בסיסי**, לבין חוסן אנרגטי **מתקדם**. לרשת חשמל יש חוסן אנרגטי בסיסי כאשר היא מסוגלת להתמודד עם תקלות או סבבי תחזוקה נפוצים בשגרה, ובישראל ניתן להוסיף לזה התמודדות עם מטחי רקטות לא מדויקות פעם בכ-3 שנים. חוסן אנרגטי מתקדם הוא היכולת להתמודד עם איומים נרחבים ו/או גדולים על הרשת, כמו הוריקן, רעידת אדמה חזקה, צונאמי או מתקפה נרחבת ומדויקת.

המשמעויות של קיומו או העדרו של חוסן אנרגטי באו לידי ביטוי בשנים האחרונות בשלל אירועים, כגון הוריקן מריה בפוארטו-ריקו ב-2017 אשר שיתק כ-90% מרשת החשמל של האי לאורך חודשים רבים, ותקיפות של תשתיות נפט בערב הסעודית ע"י המורדים הח'ותים מתימן שהביאו לפגיעה משמעותית בהפקת הנפט העולמית. במסגרת מלחמת רוסיה-אוקראינה, התקפות רוסיות במהלך 2022 הביאו להרס 50% מרשת החשמל האוקראינית. רוסיה אף יצרה משבר אנרגיה מלאכותי באירופה (ובעולם) עוד לפני המלחמה באמצעות הגבלת אספקת הגז הטבעי ליבשת, וכן 4

¹https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

²[https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/systemfiles/memo152%20\(4\).pdf](https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/systemfiles/memo152%20(4).pdf)

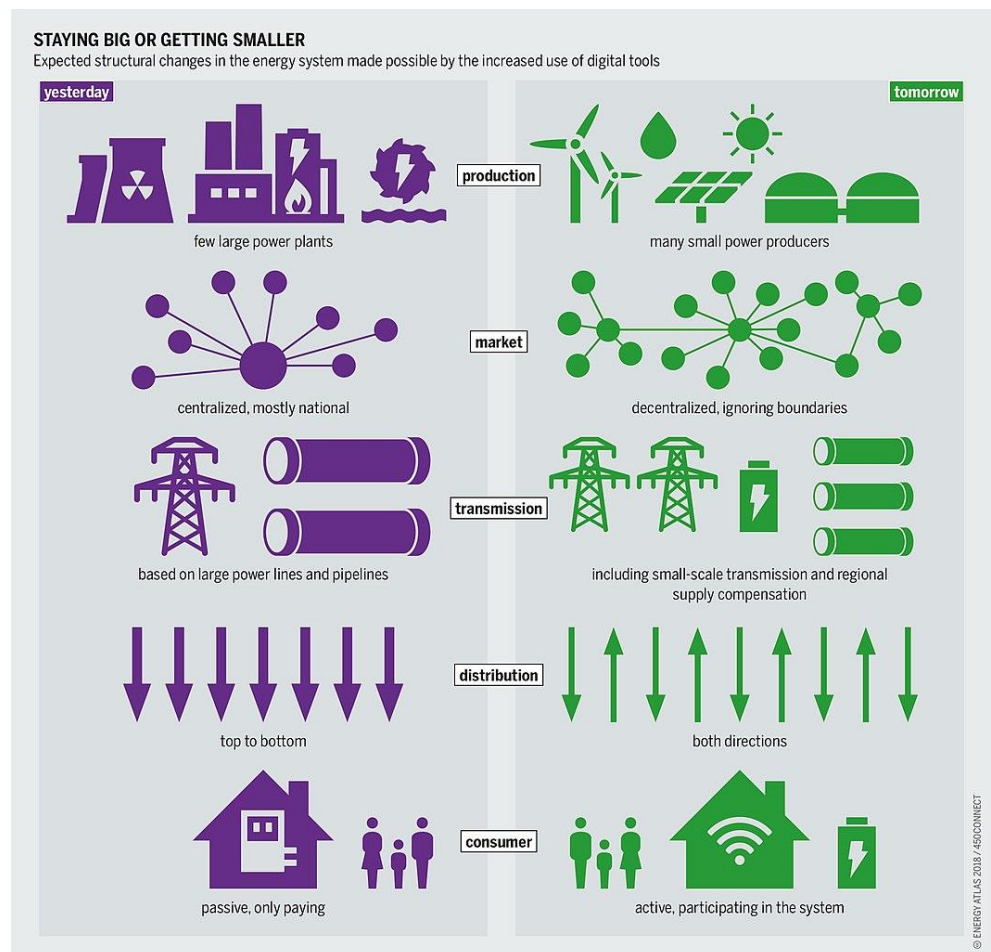
פיצוצים (שסביר שהרוסים ביצעו) הביאו להשבתה מלאה של 2 צינורות הגז הטבעי התת-ימיים מרוסיה לגרמניה (ולאירופה).

במסמך זה, נסקר ההרכב של רשת חשמל ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים אל מול זה של רשת חשמל מבוזרת, הגורמים אשר עשויים להשפיע או לפגוע ברשת החשמל, התבצעה השוואה בסיכונים לשתי תצורות הרשת, ונתחו יכולותיהן לספק חוסן אנרגטי בסיסי ומתקדם. כמו כן, נבחנו משמעויות הנושא בהקשר היציאה למרכז רביעי של המדינה לחיפושי מאגרי גז טבעי בים התיכון.

2 הרכב רשתות חשמל

בעבודה זו תתבצע השוואה בין 2 חלופות עיקריות לרשת החשמל: סקטור חשמל ריכוזי אל מול סקטור חשמל מבוזר (ראו איור 1), ומידת החוסן האנרגטי שלהן. בישראל, סקטור החשמל הריכוזי הינו מבוסס דלקי מאובנים, וסקטור החשמל המבוזר בעל הפוטנציאל הכי גדול הינו כזה המבוסס על אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירת אנרגיה. בין שתי נקודות הקיצון הללו קיים ספקטרום של רשתות חשמל עם אחוז משתנה של ריכוזיות אל מול ביזור.

איור 1: רשת חשמל ריכוזית אל מול רשת חשמל מבוזרת.
שמאל: בסגול מבנה סכמתי של רשת חשמל ריכוזית, עם ייצור חשמל במספר מצומצם של תחנות כוח גדולות, שוק חשמל ריכוזי שבד"כ הוא לאומי, עם הולכה מרכזית במתח על מתחנות הכוח אל כל הצרכנים, חלוקה חד כיוונית מרשת ההולכה את הצרכנים, וצרכנים פסיביים שרק צורכים ומשלמים על השירות. ימין: בירוק מבנה סכמתי של רשת חשמל מבוזרת, עם ייצור ואגירה במספר רב של מתקנים קטנים ובינוניים, שוק חשמל מבוזר שעשוי להתעלם מגבולות, מערכת הולכה הכוללת הולכה בקנה מידה קטן ואזורי, מערכת חלוקה דו-כיוונית, יצרנים (prosumers: producers-consumers) שמייצרים ומספקים חשמל, שמתקשרים עם הרשת ויכולים להגדיל או לצמצם צריכה לפי צרכי הרשת.³



³ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Staying_big_or_getting_smaller.jpg

2.1 סקטור חשמל ריכוזי מבוסס דלקי מאובנים

זהו בעיקרו משק האנרגיה הקובנציונאלי, הנוכחי בישראל והנפוץ ביותר בעולם. רשתות חשמל גדולות התפתחו בעולם במשך למעלה מ-100 השנים האחרונות. הן מכסות שטחים הולכים וגדלים, והופכות אמינות יותר ויותר. הן בד"כ מבוססות על שימוש בדלקי מאובנים (נפט, פחם, גז טבעי), אך ישנם אזורים עם שימוש נרחב גם באנרגיה גרעינית. רשתות חשמל ריכוזי הן המכשיר האנושי שסייעו באופן אולי הכי גדול באנושות לקדם אנשים מעוני וממצוקה לקדמה ולפריחה.

סקטור החשמל הריכוזי בישראל מורכב משני חלקים עיקריים- דלקים לייצור חשמל ורשת החשמל. בישראל יש 3 סוגי דלקי מאובנים לייצור חשמל אשר מקנים לסקטור גמישות מסוימת וגיבוי במקרים מסוימים. 3 סוגי דלקי המאובנים ניתנים לצבירה וכך מאפשרים לאגור אנרגיה ולהשתמש בה לפי הצורך, אולם צבירת גז טבעי מסובכת ויקרה יותר לעומת פחם ונפט. להלן חלקי סקטור חשמל ריכוזי מבוסס דלקי מאובנים.

2.1.1 דלקים לייצור חשמל ריכוזי

2.1.1.1 נפט ותזקיין

עד שנות ה-1990, תוצר הנפט מזוט היה מקור הדלק העיקרי לייצור חשמל בישראל. כיום סולר משמש לגיבוי תחנות הכוח הגזיות.

2.1.1.1.1 יצואניות נפט

יש עשרות מדינות שמייצאות נפט ותזקיין נפט⁴.

2.1.1.1.2 מיכליות (ספינות) נפט

מיכליות נפט מובילות לישראל נפט גולמי בעיקר ממדינות ברית המועצות (ברה"מ) לשעבר, מקסיקו ומצרים. ב-2020 התחיל יבוא גם ממדינות המפרץ הפרסי איתן כוננה ישראל יחסית דיפלומטיים. בשנת 2019 יבוא לישראל 5,513,000 טון נפט ומוצריו⁵.

2.1.1.1.3 טרמינלי נפט ומוצריו

לחברה הממשלתית תש"ן (תשתיות אנרגיה) 2 טרמינלים לקליטת נפט ומוצריו, בחיפה ובאשקלון⁶, ולחברת קצא"א (קו צינור נפט אילת-אשקלון) טרמינל באילת וטרמינל באשקלון.

⁴<https://www.worldstopexports.com/worlds-top-oil-exports-country/>

⁵ <https://www.gov.il/BlobFolder/reports/statisticalyear19/he/StatisticalYearBook19.pdf>

⁶ http://www.pei.co.il/map.php?title=%D7%9E%D7%A4%D7%AA_%D7%9E%D7%AA%D7%A7%D7%A0%D7%99%D7%9D&langid=1

2.1.1.1.4 צינורות

ישנם מספר צינורות נפט ותזקי נפט תת-קרקעיים ארוכים אשר משמשים להובלת ולאחסון נפט ותזקי נפט. לחברת קצא"א קיימים צינורות באורך ~750 ק"מ: צינור נפט של בין טרמינלי הנפט של אילת ואשקלון, צינור תזקי נפט (להובלת דלק סילונו, בניזין, סולר) בין אילת ואשקלון, צינור נפט בין טרמינל הנפט באשקלון לבית הזיקוק באשדוד, וצינור נפט בין טרמינל הנפט באשקלון לבית זיקוק בחיפה.⁷ לחברת תש"ן 800 ק"מ של צינורות להובלת נפט ומוצריו.⁸ חלקם מובילים סולר לתחנות כוח אשר משמש לייצור חשמל בתחנות הכוח בשעת חירום וכאשר מתבצעת תחזוקה של מערך ייצור החשמל הראשי המונע בגז טבעי. הצינורות עצמם, בשל אורכם הרב המאפשר אגירת נפח גדול של נפט ומוצריו, משמשים גם הם כמאגרים לשעת חירום.

2.1.1.1.5 מיכלי אגירה

מכילים נפט גולמי ותזקי נפט שיובאו מחו"ל, וכן תזקי נפט שהופקו בבתי הזיקוק בישראל. לחברה הממשלתית תש"ן (תשתיות אנרגיה) 6 מתקנים גדולים של מיכלים.⁹ לקצא"א חוות מיכלים באילת ובאשקלון.

2.1.1.1.6 בתי זיקוק

בתי זיקוק מזקקים נפט גולמי לתזקי נפט כגון מזוט, סולר, דלק סילונו, בניזין, גז בישול וגריז. בישראל יש שני בתי זיקוק, אחד במפרץ חיפה ואחד באשדוד. הם מספקים את רוב הדלקים למנועי בעירה פנימית בישראל: תחבורה יבשתית, ימית, אווירית; וכן עבור ייצור חשמל, חום ותהליכים תעשייתיים.

2.1.1.1.7 מיכליות (משאיות) דלק

משאיות מובילות דלקים מבתי הזיקוק ומחוות המיכלים לצרכנים שלרוב הם תחנות דלק וארגונים גדולים. לרוב לא מובילות סולר לתחנות כוח אשר מקבלות את הסולר שלהן (לשימוש בחירום או בעת תחזוקה) בצינורות יעודיים, אולם יכולות לשמש להובלת דלקים בחירום.

2.1.1.2 גז טבעי

גז טבעי הוא כיום הדלק העיקרי לייצור חשמל בישראל, וכמעט כולו מופק בישראל. רק גז שכיום מסופק בחירום מהאונייה המגזת מקורו בחו"ל. במקרה ולא יהיה ניתן לספק גז טבעי ישראלי, יהיה ניתן לספק רק כמה עשרות אחוזים מצריכת הגז הנוכחית באמצעות גז מיובא דרך אוניה מגזת והמצוף הימי וכן דרך צינור ההולכה למצרים. האוניה המגזת הייתה צפויה לסיים את תפקידה בישראל, עם התחלת ההפקה המסחרית מאסדת כריש באוקטובר 2022, אשר מאפשרת אספקת גז לישראל מ-3 אסדות שונות.^{10 11}

⁷ <https://www.eapc.co.il/the-crude-oil-system-2/pipelines/>

⁸ <http://www.pei.co.il/activity.php?id=100393&title=%D7%94%D7%95%D7%9C%D7%9B%D7%94&langid=1>

⁹ http://www.pei.co.il/map.php?title=%D7%9E%D7%A4%D7%AA_%D7%9E%D7%AA%D7%A7%D7%A0%D7%99%D7%9D&langid=1

¹⁰ https://www.gov.il/he/departments/news/press_291220

¹¹ <https://www.energean.com/media/5313/first-gas-from-karish.pdf>

2.1.1.2.1 בארות גז בים

בארות הגז הטבעי הישראליות שוכנות על קרקעית הים התיכון בעומק של מעל 1,000 מ' מתחת לפני הים, כאשר עומק הבארות הוא כ-3,000 מתחת לקרקעית הים. במאגר לווייתן יש כיום 4 בארות¹², במאגר תמר יש 6 בארות הפקה¹³, ובמאגר כריש 3 בארות¹⁴.

2.1.1.2.2 צנרת הולכה ימית

צנרת הולכה מובילה את הגז הטבעי הגולמי בלחץ גבוהה מהבארות על קרקעית הים אל אסדות הטיפול בגז הגולמי. בלווייתן מדובר על 2 צינורות באורך של כ-120 ק"מ. בתמר מדובר על אורך צנרת דומה. שתי האסדות ממוקמות במרחק של 10-25 ק"מ מהחוף, ומהן מובילה את הגז הטבעי המטופל צנרת נוספת אל טרמינלי הקליטה של הגז בחופים. ישנו צינור ימי שמקשר בין טרמינלי דור, אורות רבין, רידינג ואשקלון ויכול לספק מעקף להובלת הגז מהאסדות לחוף למקרה ואחד מהטרמינלים לא פעיל, או כגיבוי לצינורות הגז היבשתיים בין דור ואשקלון¹⁵. סה"כ יש בים מספר מאות ק"מ של צינורות.

2.1.1.2.3 אסדות גז טבעי ימיות

כיום פעילות 3 אסדות טיפול בגז טבעי- כריש, לווייתן ותמר. הגז הטבעי הגולמי מובל בצנרת מהבארות אל האסדות, שם הוא עובר טיפול, ומהאסדות מובל בצנרת נוספת אל טרמינלי הקליטה של הגז בחופים.

2.1.1.2.4 אוניית LNG מגזת

לצורך גיבוי, עוגנת מול תחנת הכוח בחדרה, אוניית LNG (Liquefied Natural Gas) מגזת לגיבוי סקטור הגז הטבעי הישראלי. בעת צורך, האונייה ממירה את ה-LNG לגז טבעי ומזרימה אותו אל צנרת הגז בישראל. התכנון הוא לסיים את השימוש בספינה כאשר אסדת כריש תתחיל לספק גז (2022-2023)¹⁶.

2.1.1.2.5 טרמינלי גז טבעי בחוף

בחופי ישראל 5 טרמינלים לקליטת גז טבעי מאסדות הטיפול שבים: חוף דור, מצוף ימי לקליטת גז טבעי מהאוניה המגזת (LNG) מול אורון רבין (חדרה), רידינג (ת"א), אשדוד ואשקלון. הם מחברים את מערכת ההולכה הימית אל זו היבשתית. מטרמינל אשקלון מיוצא גז למצרים¹⁷, ובחירום הוא יכול גם לשמש לקליטת גז ממצרים.

2.1.1.2.6 צנרת הולכה יבשתית

צנרת ההולכה היבשתית מוליכה את הגז הטבעי בצינורות תת-קרקעיים בלחץ גבוה מהטרמינלים החופיים לכל אזורי הצריכה בארץ. אורכה הוא כ-700 ק"מ (בשנת 2019). כיום ניתן לספק גז לרוב המערכת רק עם צינור הולכה אחד,

¹²<https://leviathanproject.co.il/about/>

¹³<https://www.tamarpetroleum.co.il/tamar/>

¹⁴<https://www.energean.com/media/5332/trading-statement-operational-update-november-2022.pdf>

¹⁵https://www.ingl.co.il/wp-content/uploads/2020/06/Natgaz_GeneralMap_Feb2020_FINAL.pdf

¹⁶https://www.gov.il/BlobFolder/guide/natural_gas_basics/he/ng_2020.pdf

¹⁷https://www.ingl.co.il/wp-content/uploads/2020/06/Natgaz_GeneralMap_Feb2020_FINAL.pdf

אולם למישור החוף בין חוף דור לאשדוד ניתן לספק גז בשני צינורות נפרדים הודות לצינור הימי המקביל לחוף. כמו כן, בחלק מהאזורים עובר צינור כפול (שני צינורות מקבילים) ובאזורים אחרים עם צינור אחד מתוכנת הכפלה¹⁸. ישנם צרכני גז גדולים כמו תחנות כוח אשר מחוברות ישירות למערכת ההולכה.

PRMSs 2.1.1.2.7

Gas Pressure Regulating and Metering Stations - מתקנים מעל הקרקע המשמשים להפחתת לחץ מהלחץ הגבוה במערכת ההולכה אל הלחץ הנמוך שבמערכת החלוקה. הם משמשים גם לויסות ולמידת זרימת הגז.

צנתת חלוקה 2.1.1.2.8

צנתת תת-קרקעית אשר מחלקת את הגז בלחץ נמוך מה-PRMSs אל צרכני הגז הקטנים והבינוניים.

מגופים 2.1.1.2.9

מתקנים מעל הקרקע המשמשים לפתיחה ולסגירה של זרימת גז טבעי אל צרכנים או אל אזור של צרכנים.

פחם 2.1.1.3

עד לפני מספר שנים, פחם היה מקור הדלק העיקרי לייצור חשמל בישראל. ב-2012 יבוא הפחם הגיע לכמעט 14 מיליון טון בשנה (61% מייצור החשמל), אולם עד השנים 2017-2020 הממוצע השנתי ירד ל-8 מיליון טון, המהווים כ-30% מייצור החשמל בישראל. ב-2025-2026 צפויה הפסקת שימוש בפחם לייצור חשמל בישראל¹⁹. ההחלטה להפסיק שימוש בפחם לייצור חשמל התקבלה בישראל לאור היכולת לעבור לייצור חשמל מגז טבעי ישראלי שהינו זול ונקי יותר לעומת ייצור חשמל מפחם מיובא. יחד עם זאת, הפסקת השימוש בפחם מקטינה את החוסן האנרגטי של ישראל, שתעבור להסתמך על גז טבעי מקומי לייצור חשמל כמעט באופן בלעדי (כל עוד היקף ייצור האנרגיות המתחדשות לא יגדל באופן ניכר). לכן יש תוכניות להשאיר מספר יחידות ייצור פחמיות בכוננות לשעת חירום²⁰.

יצואניות פחם 2.1.1.3.1

בעולם יש 15 מדינות שמייצאות מעל 98% מהפחם בעולם²¹. ישראל מייבאת פחם בעיקר מרוסיה, קולומביה ודרום אפריקה²². המלחמה בין רוסיה לאוקראינה והעלייה במחירי הפחם הביאו לכך שישראל מייבאת בתקופה האחרונה יותר פחם מקולומביה²³.

¹⁸<https://www.ingl.co.il/%d7%a0%d7%aa%d7%95%d7%a0%d7%99-%d7%94%d7%9e%d7%a2%d7%a8%d7%9b%d7%aa/>

¹⁹https://fs.knesset.gov.il/globaldocs/MMM/c06946d2-f784-ec11-8147-00155d0401c3/2_c06946d2-f784-ec11-8147-00155d0401c3_11_19424.pdf

²⁰https://fs.knesset.gov.il/globaldocs/MMM/c06946d2-f784-ec11-8147-00155d0401c3/2_c06946d2-f784-ec11-8147-00155d0401c3_11_19424.pdf

²¹<https://www.worldstopexports.com/coal-exports-country/>

²²<https://ncsc.co.il/?content=%d7%93%d7%a8%d7%9a-%d7%94%d7%a4%d7%97%d7%9d>

²³<https://www.davar1.co.il/408672/>

2.1.1.3.2 ספינות פחם

ספינות פחם מייבאות פחם מחו"ל לישראל. ספינות פחם יכולות לשאת 80,000-200,000 טון.

2.1.1.3.3 נמלי פריקת פחם

בישראל ישנם שניים שנמצאים באורות רבין בחדרה וברוטנברג באשקלון. נמל מורכב ממזח באורך של למעלה מ-2 ק"מ, שבנוי מהיבשה לים עד לעומק בו ספינות פחם יכולות לעגון. בסוף המזח עומדים עגורני פחם אשר פורקים את הפחם מספינות הפחם למסוע שמסיע את הפחם מהמזח אל תחנת הכוח²⁴.

2.1.1.3.4 מסועי פחם

מסועי פחם מסיעים את הפחם מנמלי הפריקה אל אחסון בערימות פחם בשטח תחנות הכוח, וכן ממצבורי הפחם אל תחנות הכוח עצמן.

2.1.1.3.5 מצבורי פחם ביבשה

מצבורי פחם יבשתיים אוגרים פחם לשימוש בשתי תחנות הכוח הפחמיות בישראל.

2.1.2 מבנה רשת חשמל ריכוזית

ברשת חשמל ריכוזית חשמל מיוצר בתחנות כוח, וזורם דרך חלקי הרשת הנזכרים בהמשך באופן חד כיווני אל הצרכנים. בישראל הייצור הוא בעיקר מתחנות כוח גדולות מבוססות דלקי מאובנים, אך בעולם הייצור הוא גם מתחנות כוח גדולות מבוססות גרעין ואנרגיה הידרואלקטרית. להלן החלקים העיקריים ברשת החשמל הריכוזית.

2.1.2.1 תחנות כוח

בישראל קיימים 14 אתרים של תחנות כוח בינוניות וגדולות בהספק של 400 MW (~2% מההספק המותקן בישראל) ומעלה, מתוכן 8 של חברת החשמל ו-6 של חברות פרטיות, הכוללות 64 יחידות ייצור משמעותיות (מתוכן 33 של חברת החשמל ו-31 של חברות פרטיות)^{25 26}. 6 אתרים של תחנות כוח הם בהספק של לפחות 1,100 MW (~5% מההספק המותקן בישראל), ו-2 אתרים של תחנות כוח הם בהספק של לפחות 2,200 MW (~10% מההספק המותקן בישראל). תחנות הכוח הגדולות בארץ מחוברות לקווי מתח על-עליון (400 קילו-וולט), והבינוניות מחוברות לקווי מתח עליון (161 או 115 קילו-וולט)²⁷.

2.1.2.2 רשת ההולכה (מתח עליון ועל-עליון)

רשת קווי חשמל המוליכה את החשמל מתחנות הכוח הגדולות אל אזורי הצריכה. מורכבת מקווי מתח על-עליון במתח 400 קילו-וולט (באורך כולל של כ-800 ק"מ בסוף 2021), ומקווי מתח עליון במתח 161 או 115 קילו-וולט (באורך כולל

²⁴<https://ncsc.co.il/?content=%d7%aa%d7%94%d7%9c%d7%99%d7%9a-%d7%94%d7%a4%d7%a8%d7%99%d7%a7%d7%94-%d7%9b%d7%9a-%d7%94%d7%95%d7%9c%d7%9b%d7%99%d7%9d-%d7%94%d7%a4%d7%95%d7%a8%d7%a7%d7%99%d7%9d>

²⁵ <https://www.iec.co.il/content/investors/lobbypages/investors>

²⁶ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/statusrsh/he/Files_Rishyonot_rish_kavuah_mako_reshet_04_2021.pdf

²⁷ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

של כ-5,000 ק"מ בסוף 2021)²⁸. הולכת חשמל לחלקי הארץ השונים אפשרית רק באמצעות 1-2 קווי מתח על-עליון ועד 5 קווי מתח עליון בלבד²⁹.

2.1.2.3 תחנות מיתוג (תחמ"ג)

תפקידן להוריד את המתח ממתח על-עליון של 400 קילו-וולט למתח על של 161 או 115 קילו-וולט. בסוף 2021 היו בישראל 11 תחנות מיתוג³⁰.

2.1.2.4 תחנות משנה (תחמ"ש)

תפקיד תחנות המשנה להוריד את המתח ממתח עליון של 161 או 115 קילו-וולט של רשת ההולכה למתח של 13, 22 או 33 קילו-וולט של רשת החלוקה לצרכנים. בסוף 2021 היו בישראל 209 תחנות משנה³¹.

2.1.2.5 רשת חלוקה (מתח גבוה)

רשת קווי חשמל המחלקת את החשמל מתחנות המשנה אל הצרכנים. מורכבת מקווי מתח גבוה במתח 13, 22 ו-33 קילו-וולט, באורך של כ-30,000 ק"מ בסוף 2021³².

2.1.2.6 שנאים ברשת החלוקה

תפקיד שנאים ברשת החלוקה להוריד את המתח ממתח גבוה (13, 22 ו-33 קילו-וולט) למתח נמוך עבור שימוש של צרכני חשמל רגילים (230/400 וולט). בסוף 2021 היו בישראל כ-53,000 שנאים ברשת החלוקה³³.

2.1.2.7 צרכנים

גופים אשר צורכים חשמל, כמו עסקים, מבני ציבור, מבני מגורים. בישראל היו ב-2021 כ-3.1 מיליון צרכני חשמל פרטיים ועסקיים³⁴.

²⁸ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

²⁹ <https://yzrmd.iec.co.il/docs/planning-electric-system.pdf>

³⁰ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

³¹ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

³² https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

³³ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

³⁴ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

2.2 סקטור חשמל מבוזר מבוסס אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה

למעשה, כל רשתות החשמל הראשונות היו מבוזרות. הן קמו במספר ערים ברחבי העולם וסיפקו בתחילה חשמל רק למבנה בודד, מספר מבנים או שכונה. מאוחר יותר רשתות קטנות ומבוזרות התחברו, ומהן צמחו רשתות חשמל ארציות ריכוזיות.

מכיוון שרשתות החשמל בכל העולם התפתחו מאב הטיפוס שהוא סקטור חשמל ריכוזי מבוסס דלקי מאובנים לפני למעלה ממאה שנה, ומכיוון והטכנולוגיות המאפשרות סקטור חשמל מבוזר מבוסס אנרגיות מתחדשות ואגירה פותחו רק בעשורים האחרונים, כיום אין מדינה בה קיים סקטור חשמל מבוזר בלבד. יחד עם זאת, קיימות כבר מדינות בהן על הבסיס שהוא סקטור חשמל ריכוזי, פותחו עשרות אחוזים מרשת החשמל שהם כבר מבוזרים במידה זו או אחרת.

ניתן להקים רשת חשמל מבוזרת באמצעות שימוש בתחנות כוח תרמויות קטנות (kW-MW) מבוססות דלקי מאובנים (ואולי בעתיד באמצעות תחנות כוח גרעיניות מודולריות קטנות). רשת שכזו תהנה מהיתרונות של דלקי מאובנים: כאשר קיימת אספקה רציפה של דלקים המערכת אמינה וצפויה, וכן היא תהנה מחלק מיתרונות רשת מבוזרת. אבל היא תסבול מאותם חסרונות של רשת ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים כמו פגיעות של שרשרת האספקה של הדלקים, תחזוקה יקרה, רגישות לשינויים במחיר דלקי מאובנים, ויצירת זיהום.

למרות שרשת מבוזרת מבוססת דלקי מאובנים היא אפשרית, מידת הביזור שלה עדיין מוגבל. אם ברשת מבוזרת מבוססת אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה ניתן לבזר את הרשת עד לרמת הבית או הדירה (או אפילו מנורת רחוב), ביזור ברמת הבית היא פרקטית רק באמצעות גנרטורים מונעים בדלק נזולי (סולר, בנזין...). גנרטורים או תחנות תרמויות קטנות מונעות בגז טבעי רלוונטיים רק בהיקפים גדולים יותר (בניינים, מפעלים ומעלה).

רשת מבוזרת מבוססת דלקי מאובנים צורכת השקעת זמן וכוח אדם, בעוד אלו המבוססות אנרגיה מתחדשת ואגירה יכולות להתנהל באופן אוטומטי כמעט כל הזמן. כמו כן, רשת מבוזרת מבוססת דלקי מאובנים לא תהנה מיתרון הגודל אשר מאפשר מחיר יחסית זול לרשת חשמל ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים, ולכן תהיה יקרה באופן משמעותי מרשת מבוזרת מבוססת אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה או מרשת ריכוזית. **לכן, רשת מבוזרת מבוססת דלקי מאובנים נחותה באופן מהותי לעומת רשת מבוזרת מבוססת אנרגיות מתחדשות ואגירה.**

בישראל אין זרימת מים עיליים נרחבת המאפשרת שימוש במתקנים הידרו-אלקטריים, אין רוח במהירויות ובהיקפים המאפשרים שימוש נרחב בטורבינות רוח, כיום קשה ויקר לנצל אנרגיה גיאותרמית, כיום קשה ויקר לנצל אנרגיית גלים, אין מספיק מים להשקיה ושטחים בשביל לגדל ביומסה לאנרגיה (וכן מקור מתחדש זה מזיק מאוד לסביבה). לעומת זאת, שמש יש בשפע. **לכן, בישראל, ניתן לבזר את רשת החשמל באמצעות אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה.**

כאשר רשת מבוזרת מבוססת אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה מוקמת במקביל או על בסיס רשת ריכוזית, היא תחלוק איתה חלקים ניכרים מהרשת עם סקטור חשמל ריכוזי (ראו 2.1.2). להלן חלקי הרשת המבוזרת הייחודיים לה.

2.2.1 דלקים לייצור חשמל מבוזר מבוסס אנרגיה פוטו-וולטאית

2.2.1.1 שמש

השמש היא מקור האנרגיה היחידי במערכת שכזו. כאמור, עקב העובדה שהשמש אינה זורחת כל הזמן, או בעוצמה קבועה, מחייבת שילוב פתרונות אגירת אנרגיה במערכת. אולם, במערכת זאת, אין צורך בהחזקת כל מערך הדלקים הנרחב אשר הכרחי בסקטור חשמל ריכוזי, והשמש מפעילה את תחנות הכוח הפוטו-וולטאיות ישירות, בכל מקום. ניתן לחזות את היקף יצור החשמל משמש בדיוק חודשי גבוה ובדיוק שנתי גבוה מאוד.

2.2.2 מרכיבי רשת חשמל מבוזרת מבוססת אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה

2.2.2.1 תחנת כוח פוטו-וולטאית

תחנות כוח פוטו-וולטאיות (PV- photovoltaic) ממירות את אנרגיית השמש ישירות לחשמל. החסרונות העיקריים של תחנות כוח אלו הן ייצור חשמל לא קבוע ולא לפי דרישה, וכן יש יחס ישר בין הספק המתקן לגודלו בשטח (מתקן גדול יתפרש על פני שטח גדול). אולם, ניתן להקים תחנות כוח אלו כמעט בכל מקום ובכל גודל הספק מותקן כתלות בשטח הזמין, ניתן להקים אותם בדו-שימוש על קרקע שכבר משמשת לשימושים אחרים וניתן לחברם לכל חלק ברשת החשמל (רשת הולכה, רשת חלוקה, צרכנים).

ניתן להקים על הקרקע (MW עד GW); מעל שטחים בהם מגדלים גידולים חקלאיים (kW עד MW); צפים על מים (kW עד MW); מעל כבישים, מסילות רכבת וגשרים (kW עד MW); על חומות וגדרות (kW); בשולי תשתיות כמו סוללות מאגרים, בתוך מחלפים, סוללות מסילות רכבת (kW עד MW); על מבנים מסחריים, בתי דירות, בתים (kW עד MW); על צרכני חשמל נייחים כמו עמודי תאורה, אנטנות, משאבות (וואטים עד kW); על כלי תחבורה נייחים כמו רכבים, משאיות, רכבות, מטוסים, ספינות (kW עד MW); ניתן להקים גם תחנות כוח ניידות (וואטים עד kW). בשל אפקט טכנולוגיות משבשות, מחירי מתקנים פוטו-וולטאיים וחשמל פוטו-וולטאי ירדו בכ-90% בעשור הקודם לרמה בה זהו כיום מקור החשמל הזול ביותר בעולם. בנוסף, צפוי כי מחירים אלו ימשיכו לרדת באופן דומה בעשור הקרוב^{35 36}.

2.2.2.2 מתקני אגירת אנרגיה

מתקנים לאגירת אנרגיה אוגרים אנרגיה עודפת אשר מיוצרת בשעות השיא, אשר מונעים את איבוד האנרגיה הזו ומאפשרים שימוש בה כאשר היקף ייצור האנרגיה נמוך יותר מהיקף הצריכה. גם פה, ניתן להקים מתקני אגירה כמעט

³⁵ <https://www.sp-interface.com/2021-ng-economy>

³⁶ <https://www.rethinkx.com/energy-reports>

בכל מקום ובכל גודל ולחברם לכל חלק ברשת החשמל (רשת הולכה, רשת חלוקה, צרכנים). ניתן להקים מתקני אגירה בתחנות כוח, בשטחים פתוחים, בבניינים, בבתים, ברכבים³⁷, בצרכני חשמל נייחים.

אין ספק כי הטכנולוגיה המובילה בעולם לאגירת אנרגיה היא אגירה שאובה, עם ותק של 130 שנים, ו-95% מכל הספק האגירה המותקן בעולם, והיא מהווה גורם חשוב באגירת אנרגיה מתחדשת מודרנית. אולם, טכנולוגיה זו הינה ריכוזית בדיוק כמו כל רשת החשמל הקונבנציונלית, עם מתקנים גדולים בהספק של מאות MW בממוצע ומתקנים רבים עם הספק של אלפי MW, שניתן להקים רק במקומות ספציפיים וללא כל יכולת ביזור^{38 39}.

סוללות אלקטרו-כימיות מהוות את אמצעי האגירה הצומח ביותר בעולם והן מובילות את הדרך בביזור אגירת אנרגיה (ליתיום-יון על נגזרותיה, נתרן-יון^{40 41}, אבץ-ברום⁴², ברזל-אוויר^{43 44}). ההספק המותקן של סוללות ליתיום-יון לאגירת אנרגיה צמח באופן אקספוננציאלי (מעריכי) בין 2000-2020, במקביל לירידת מחיר אקספוננציאלית: ב-97% בין 1991-2018⁴⁵, ובכמעט 90% בין 2010-2020. למעט עליית מחירים זמנית ב-2022 עקב בעיות בשרשראות האספקה, האינפלציה העולמית והעלאות הריבית, מומחים צופים שהמחירים ימשיכו לרדת בהתאם למגמת הירידה של העשורים האחרונים הודות לאפקט הטכנולוגיות המשבשות, מדיניות תומכת, צמיחה בתחום הרכבים החשמליים, שיפור שרשראות האספקה, ביזור מרחבי, גיוון מקורות חומרי הגלם (נתרן, ברום, אבץ, גופרית), התקדמות טכנולוגית ועוד^{46 47}.

המשותף למדינות בהן יש צמיחה מהירה של שוק האגירה בסוללות, כמו ארה"ב, יפן, גרמניה (שהובילה את השוק עד סוף 2020) ואוסטרליה, הוא מדיניות שמעודדת התקנת אגירה בסוללות⁴⁸. נקודה אירופית היא שאחד הסקטורים התעשייתיים אשר מוביל בהתקנת סוללות לגיבוי מתקניו הוא סקטור הגז והנפט...⁴⁹ תחזיות עולמיות צופות גידול בהיקף ההתקנות השנתי של סוללות לאגירת אנרגיה מ-5,000 MW ב-2020, ל-27,000 MW ב-2030⁵⁰.

השוק העולמי של אגירת חשמל **ביתית** בסוללות ליתיום-יון ועופרת-חומצה שהיה שווה ב-2021 9-11 מיליארד USD, צפוי לגדול ל-30-47 מיליארד USD ב-2030, גדילה של פי 3-4.3 בעשור, עם (Compound Annual Growth) CAGR

³⁷https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/06/f53/EAC_Enhancing%20Grid%20Resilience%20with%20Integrated%20Storage%20from%20EVs%20%28June%202018%29.pdf

³⁸<https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>

³⁹https://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization/

⁴⁰<https://www.zavit.org.il/%d7%a1%d7%95%d7%9c%d7%9c%d7%aa-%d7%a0%d7%aa%d7%a8%d7%9f-%d7%99%d7%95%d7%9f/>

⁴¹<https://www.nextbigfuture.com/2022/10/catl-will-mass-produce-sodium-ion-batteries-in-2023.html>

⁴²<https://redflow.com/>

⁴³<https://www.canarymedia.com/articles/long-duration-energy-storage/form-energy-to-build-novel-iron-batteries-in-west-virginia-steel-town>

⁴⁴<https://techcrunch.com/2022/10/06/form-energys-iron-air-battery-on-pace-for-2024-launch-with-450m-series-e/>

⁴⁵<https://ourworldindata.org/battery-price-decline>

⁴⁶<https://www.rethinkx.com/energy-reports>

⁴⁷<https://www.rethinkx.com/climate-implications>

⁴⁸<https://www.pv-magazine.com/2021/04/13/strong-growth-ahead-for-battery-storage/>

⁴⁹<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/battery-market>

⁵⁰<https://www.pv-magazine.com/2021/04/13/strong-growth-ahead-for-battery-storage/>

(Rate) של מעל 17%^{51 52 53}. אולם יתכן מאוד שזאת הערכת חסר של שוק האגירה הביתית כולו, מכיוון שהיא לא לוקחת בחשבון טכנולוגיות שנמצאות על סף פריצה כמו סוללות אבץ-ברום, סוללות נתרן, סוללות ברזל-אוויר ואגירת חום- שחלקן כבר משווקות כמה שנים וחלקן יכנסו לשיווק בשנה הקרובה, להן הרבה פחות מגבלות של שרשראות אספקה, העדר חומרי גלם זמינים ובעיות של שריפה.

בנוסף, בשל ההכרה בחשיבות של אגירת אנרגיה, ביזור וגיוון אנרגטי, בעשרים השנה האחרונות מפותחות משפחות חדשות של טכנולוגיות לאגירת אנרגיה כגון סוללות זרימה, אגירת מסה מוצקה, אוויר נוזלי⁵⁴, אוויר דחוס⁵⁵, CO₂ נוזלי⁵⁶, אגירת חום^{57 58 59}, אגירת קור, גלגלי תנופה^{60 61 62} ועוד. כל כחודש מבשילה טכנולוגיית אגירה חדשה ומתחילה יישום מסחרי או שמוכרז על שיפור משמעותי בטכנולוגיה קיימת. מבחינת כלל אגירת האנרגיה בעולם, התחזיות צופות עליה אקספוננציאלית בהספק המותקן כך שב-2030 היקף האגירה בכל הטכנולוגיות יהיה פי 26 מאשר ב-2020⁶³.

2.2.2.3 יצרנים (prosumers)

הלחם של המילים יצרן וצרכן (producer and consumer). אלו צרכני חשמל שגם מייצרים חשמל. ברשת חשמל ריכוזית, כל יצור החשמל מבוצע בתחנות כוח ריכוזיות והצרכנים צורכים חשמל ולא מייצרים חשמל. ברשת חשמל מבוצעת מבוססת אנרגיות מתחדשות, יש צרכנים שגם מייצרים חשמל, עבור עצמם ואף עבור צרכנים אחרים⁶⁴. ברשת חשמל מבוצעת מבוססת תחנות כוח קטנות מבוססות דלקי מאובנים (ראו 2.2) אין יצרנים.

יצרנים לא חייבים אפילו לייצר חשמל בעצמם- הם יכולים לאגור חשמל (בסוללות נטענות) או אנרגיה (למשל ע"י חימום מים בדוד מים) כאשר חשמל נמצא בעודף ומחירו נמוך, למשל בלילה כאשר הצריכה נמוכה או בצהריים כאשר ייצור החשמל הפוטו-וולטאי בשיאו. מאוחר יותר הם יכולים להשתמש בחשמל הזול הזה בזמן אחר במקום למשוך חשמל יקר אשר נמצא במחסור או לשחרר אותו חזרה לרשת, וכך לחסוך או אף להרוויח כסף.

2.2.2.4 מיקרוגרید (microgrid)

מיקרוגרید היא רשת חשמל קטנה יחסית אשר יכולה לייצר, לאגור ולצרוך את כל החשמל שלה. היא יכולה להתקיים במנותק מרשת החשמל הריכוזית (islanding), יכולה להקל על הרשת הריכוזית, יכולה להתקיים במקביל אליה ואף

⁵¹ <https://straitresearch.com/report/residential-battery-market>

⁵² <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/residential-battery-market>

⁵³ <https://finance.yahoo.com/news/global-residential-battery-market-size-111500717.html>

⁵⁴ <https://highviewpower.com/plants/>

⁵⁵ <https://www.aug-wind.com/>

⁵⁶ <https://electrek.co/2022/11/14/the-worlds-first-co2-battery-for-long-duration-energy-storage-is-headed-to-the-us/>

⁵⁷ <https://bren-energy.com/projects/>

⁵⁸ <https://www.zavit.org.il/%D7%AA%D7%A8%D7%9E%D7%95%D7%A1-%D7%91%D7%A8%D7%9C%D7%99%D7%9F/>

⁵⁹ <https://polarnightenergy.fi/news/2022/7/5/the-first-commercial-sand-based-thermal-energy-storage-in-the-world-is-in-operation-bbc-news-visited-polar-night-energy>

⁶⁰ <https://www.eesi.org/articles/view/a-look-at-the-status-of-five-energy-storage-technologies>

⁶¹ <https://www.activepower.com/en-US/2812/products>

⁶² <https://www.timesofisrael.com/zooz-power-deploys-first-ultra-fast-power-booster-for-electric-vehicles-in-israel/>

⁶³ <https://www.statista.com/statistics/728652/projected-energy-storage-market-capacity-deployment-globally/>

⁶⁴ <https://www.energy.gov/eere/articles/consumer-vs-prosumer-whats-difference>

לתמוך בה באמצעות אספקת או צריכת אנרגיה לפי הצורך. יצור וצריכה מקומיים של חשמל במיקרוגרید מצמצמים אבדן חשמל בהולכה וחוסכים הקמת ותחזוקת תשתיות הולכה וחלוקה יקרות^{65 66}.

קיימים מושגים נוספים כמו ננוגרید (nanogrid) ומיניגרید (minigrid), אבל לא בכל מקום ההגדרות שלהם זהים. בחלק מהמקומות משתמשים בננוגרید לתאר את הרשתות הכי קטנות (למשל, מקור כוח אחד קטן ומכשיר אחד שצורך את הכוח), מיקרוגרید כרשת גדולה יותר (למשל בניין), ומיניגרید כרשת גדולה עוד יותר (למשל עיר או אי) אך עדיין לא מקרוגרید (macrogrid) שהיא רשת רגילה אזורית או מדינתית^{67 68}. במקומות אחרים מיניגרید היא רשת קטנה שלא מחוברת לרשת מרכזית גדולה, ומיקרוגרید היא רשת קטנה שקיימת במקביל לרשת הרגילה⁶⁹.

ניתן להקים מספר רב של מיקרוגרידים במקביל לרשת ריכוזית או במקומה. במקרה של פגיעה ברשת הריכוזית, המיקרוגריד יכול להמשיך ולתפקד כרגיל, ובמקרה של פגיעה במיקרוגריד, ניתן לבודד אותו מהרשת השלמה תוך מניעת זליגת הנזק לשאר הרשת, תוך שמירת הנזק בהיקף קטן מאוד.

כיום יש בתים עם פאנלים סולאריים וסוללות לאגירת חשמל (או בתים עם טכנולוגיית רכב לבית vehicle to home) שיכולים לתפקד כמיקרוגריד בפני עצמם, וגם יש מיקרוגרידים של יישובים כפריים, חברות, בסיסי צבא ואף עיירות. מחקרים ומקרי שטח אמיתיים מראים את יתרונות החוסן האנרגטי של מיקרוגרידים לעומת רשת ריכוזית^{70 71 72 73}.

ב-2022, ההספק המצטבר של מיקרוגרידים בארה"ב הגיע ל-10GW, כחצי מהספק רשת החשמל הישראלית כולה, כאשר עד 2027 צפויה צמיחה שנתית של כ-20%^{74 75}. במערב אוסטרליה, חברת החשמל המקומית החליטה **ממניעים כלכליים** לממן הקמת מיקרוגרידים לאלפי חוות ואף לעיירות שלמות במקום להוליך אליהן חשמל דרך הרשת הריכוזית, אשר פגיעה שם מאוד לשריפות ויקרה לתחזוקה⁷⁶.

בין 2014-2019 הוקמו לפחות 5,500 מיניגרידים/ מיקרוגרידים מבוססי PV במדינות מתפתחות בהספק של 2.4 GW. אם בעבר רובם היו מבוססים על גנרטורים מונעים בדלקי מאובנים, כיום הרוב כבר מונעים באנרגיות מתחדשות (חלקם עם גיבוי של גנרטור סולר), וכמעט כל החדשים שמותקנים בשנים האחרונות מותקנים עם פאנלים סולאריים וסוללות לאגירת אנרגיה, הודות לירידות התלולות במחיריהם. אם ב-2009 רק 10% מהמיניגרידים היו מבוססי PV, ב-2019

⁶⁵ <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid/role-microgrids-helping>

⁶⁶ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02574-8_18

⁶⁷ <https://iec.ch/energies/minigrids-microgrids>

⁶⁸ <https://www.researchgate.net/post/How-can-the-nano-micro-and-mini-grid-be-classified>

⁶⁹ <https://www.microgridknowledge.com/resources/microgrid-perspectives/article/11429787/micro-or-mini-theres-a-grid-type-for-every-energy-need>

⁷⁰ <https://www.sandia.gov/labnews/2021/11/05/providing-resilient-power/>

⁷¹ <https://www.zavit.org.il/%d7%9c%d7%94%d7%a7%d7%93%d7%99%d7%9d-%d7%aa%d7%a8%d7%95%d7%a4%d7%94-%d7%9c%d7%a1%d7%95%d7%a4%d7%94/>

⁷² https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02574-8_18

⁷³ <https://iec.ch/basecamp/microgrids-disaster-preparedness-and-recovery-electricity-continuity-plans-and-systems>

⁷⁴ <https://www.tdworld.com/microgrids/article/21259806/us-microgrid-market-capacity-reaches-10-gw-in-2022>

⁷⁵ <https://www.utilitydive.com/news/us-microgrid-market-wood-mackenzie/642341/>

⁷⁶ <https://www.abc.net.au/news/2022-10-02/thousands-of-renewable-standalone-power-systems-to-be-rolled-out/101479136>

הם כבר היוו 55% מהם ⁷⁷. מחקר של הבנק העולמי מצא כי ניתן להקים מיניגרידים מבוססי PV באופן משתלם כלכלית לכחצי מיליארד איש ללא גישה לחשמל במדינות מתפתחות ⁷⁸.

2.2.2.5 רשת חכמה- אמצעי בקרה ושליטה חכמים

רשת חשמל חכמה היא רשת חשמל שיוזעת "לדבר" עם כל/רוב חלקיה. ז"א, היא יודעת לקבל מידע בזמן אמת מיחידות הייצור, ההולכה והצריכה ברשת; היא יודעת לתת הנחיות ליחידותיה השונות; היא יכולה לקבל בקשות מיחידותיה השונות. למשל, אם יש עומס ברשת היא יכולה לבקש מצרכנים לא קריטיים לצמצם צריכת חשמל, מיצרנים לייצר יותר חשמל, או לבקש ממתקני אגירה לשחרר יותר חשמל לרשת.

רשת חכמה יכולה לחזות דפוסי ייצור ושימוש בחשמל על סמך תחזית מזג האוויר, התנהגות בעבר, לפי כל שעה בשנה (השפעת יום ולילה, עונות, שעות אור, חגים ומועדים...); והיא אף יכולה לבקש מצרכנים לצמצם צריכה במועדים מסוימים או להסיט צריכה. רשת חכמה יכולה להביא להתייעלות אנרגטית, צמצום צריכה, תגמול כלכלי על צמצום צריכה וגמישות בשימוש בחשמל, צמצום בהקמת מתקני ייצור אנרגיה ותשתיות נלוות ^{79 80 81}.

בעבר, בהעדר אמצעי שליטה ובקרה ממוחשבים מתוחכמים שיכולים לתקשר אחד עם השני, לא ניתן היה להקים רשתות חשמל המורכבות מרכיבים רבים. אולם, כיום, אמצעי שליטה ובקרה ממוחשבים ומתקשרים מאפשרים להקים רשתות מבוזרות המכילות מספר עצום של רכיבים.

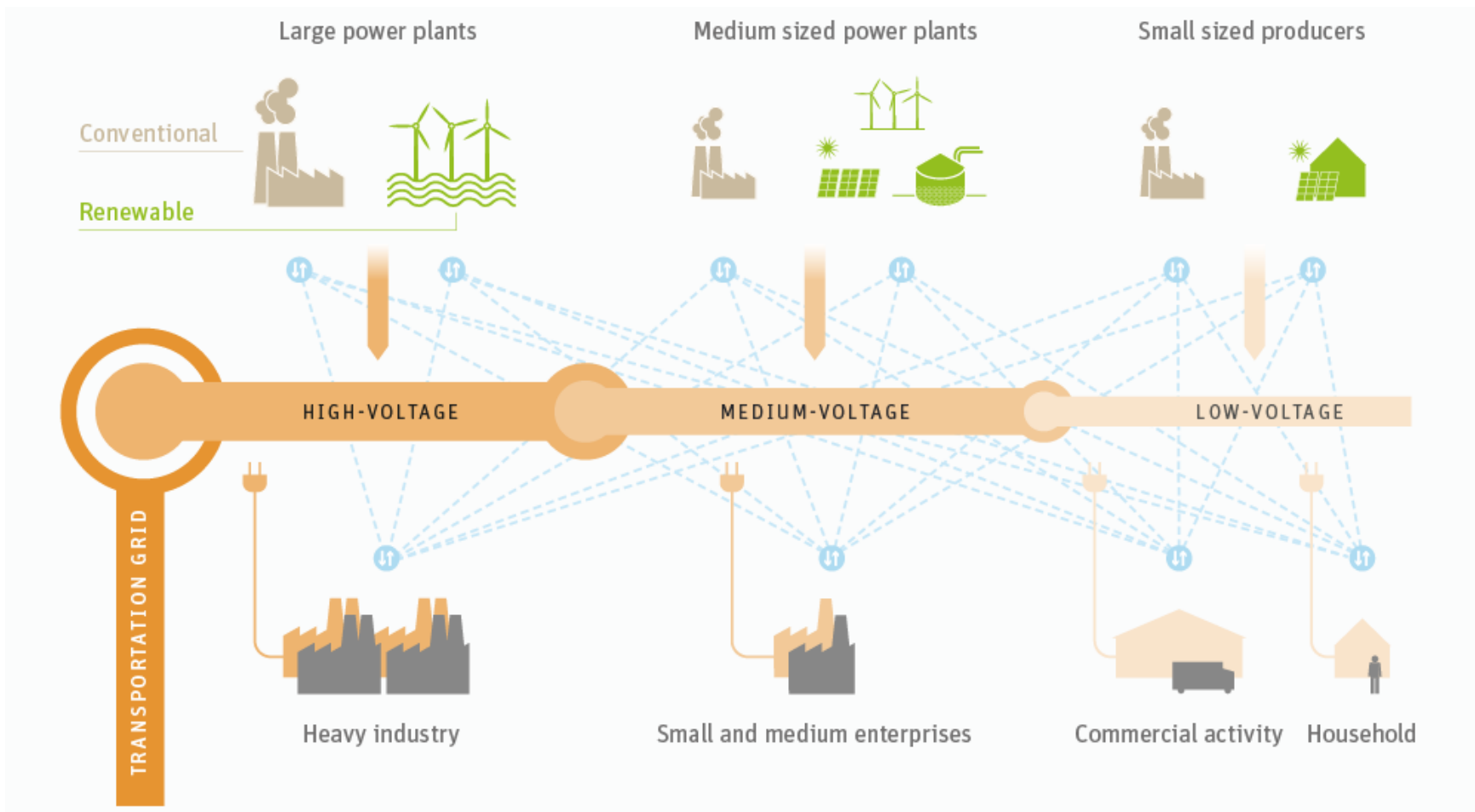
⁷⁷ <https://www.seforall.org/publications/state-of-the-global-mini-grids-market-report-2020>

⁷⁸ <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/31926>

⁷⁹ <https://www.neaman.org.il/Files/Energy%20Forum%2039.pdf>

⁸⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/document/6477421>

⁸¹ <https://iec.ch/basecamp/bringing-intelligence-grid>



איור 2: רשת החשמל העתידית תהיה דו-כיוונית וחכמה. מקור: אוניברסיטת סטנפורד⁸².

⁸² <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/arshavsky2/images/f2big.png>

3 גורמים העשויים להשפיע או לפגוע בסקטור החשמל

בפרק 3 נסקרו המבנים של רשתות חשמל ריכוזיות מבוססות דלקי מאובנים, ורשתות מבזרות מבוססות אנרגיה פוטו-וולטאית ואגירה. ישנם גורמים טבעיים וגורמים אנושיים שמשפיעים על רשות החשמל בהיקף משמעותי או שעלולים לפגוע בה. בפרק זה נסקור את הגורמים העיקריים הללו.

3.1 גורמים טבעיים

בפרקי זמן אנושיים (עשרות ואף מאות שנים), אסונות טבע מסוגים שונים מתרחשים בד"כ בתדירות קבועה באזורים קבועים. למשל, רעידות אדמה מתרחשות בתדירות קבועה ובעוצמות קבועות באזורים מועדים לרעידות אדמה (סמוך להרי געש, באזורים של שברים טקטוניים, בין לוחות טקטוניים). סופות ציקלון (הוריקן, ציקלון, טייפון) מתרחשות באזורים מקבילים לקו המשווה הקרובים לאוקיינוסים הגדולים.

יחד עם זאת, ניתן לציין שתי מגמות הקשורות בחלק מאסונות הטבע שהתפתחו ב-200-100 השנים האחרונות בשל הגידול האקספוננציאלי באוכלוסייה האנושית ובפיתוח האנושי בכדור הארץ. מגמה אחת היא עליה **בנזק** (נפגעים, נזק כלכלי) מאסונות טבע בשל העובדה כי קיימים יותר אנשים ויותר תשתיות אנושיות באזורים נרחבים יותר, אשר בעבר חלקם לא היו מיושבים כלל (יותר תושבים בסמוך לנהר, לחוף או להר געש). לא ניתן לצמצם את שכיחות האסונות הללו, אבל ניתן לצמצם את הנזק מהם.

המגמה השנייה היא עלייה **בשכיחות** אסונות טבע עקב פעילות אנושית. כגון, עליה באירועי מזג אוויר קיצוני שמקורו בשינוי אקלים, עליה בשיטפונות עקב צמצום חלחול נגר עילי ולעיתים אף עקב שינוי אקלים, עליה בשכיחות ובעוצמת רעידות אדמה באזורים מסוימים עקב הזרקות מים לתת-הקרקע או עקב שאיבת מים/ נפט/ גז טבעי מתת-הקרקע, עליה בשכיחות בולענים עקב פגיעה קיצונית במאזן מי התהום. מכיוון ששכיחות אסונות אלו עלתה עקב פעילות אנושית, ניתן גם לצמצם את שכיחותם^{83 84}.

להלן פירוט הגורמים הטבעיים העיקריים אשר עשויים להשפיע באופן ניכר על רשת החשמל או שעשויים לפגוע בה.

3.1.1 אקלים, מזג אוויר, מחזורי יום ועונות

מאפיינים טבעיים כמו אקלים, מזג אוויר לא קיצוני, מחזורי יום ועונות בד"כ לא משפיעים באופן ניכר על רשתות חשמל ריכוזיות מבוססות דלקי מאובנים ו/או גרעין, למעט באזורים בהם שורר אקלים קשה באופן רגיל כמו באזורים חמים

⁸³ <https://www.zavit.org.il/%D7%94%D7%AA%D7%97%D7%96%D7%99%D7%AA-%D7%A8%D7%A2%D7%99%D7%93%D7%AA-%D7%90%D7%93%D7%9E%D7%94-%D7%95%D7%94%D7%AA%D7%A4%D7%A8%D7%A6%D7%95%D7%99%D7%95%D7%AA-%D7%95%D7%95%D7%9C%D7%A7%D7%A0%D7%99%D7%95/>

⁸⁴ <https://www.zavit.org.il/%D7%A0%D7%A4%D7%90%D7%9C-%D7%90%D7%95%D7%A7%D7%9C%D7%94%D7%95%D7%9E%D7%94-%D7%A8%D7%9E%D7%AA-%D7%94%D7%92%D7%95%D7%9C%D7%9F/>

מאוד או קרים מאוד. מתקנים אלו נבנים מראש בהתאמה למאפיינים אלו- באזורים חמים למשל משקיעים יותר בקירור תחנות כוח לעומת אזורים קרים. אולם מזג אוויר חם כמו ששורר בישראל, מגביל את היקף הולכת החשמל בקווי הולכה ארוכים בשעות הצהריים החמות בקיץ. בנוסף, מאפיינים אלו משפיעים באופן מובהק על אספקת אנרגיה למתקני אנרגיות מתחדשות מבוססי שמש ורוח.

האקלים, הגובה מעל פני הים, זיהום אוויר, שעות היום ומחזורי העונות משפיעים על היקף קרינת השמש הממוצעת לו חשופים מתקנים פוטו-וולטאיים, ובהתאמה להיקף ולמועד ייצור החשמל בהם. אולם, מאפיינים אלו קבועים וניתן לחשב בדיוק רב את השפעתם על עוצמת ומשך הקרינה **הממוצעת** ולפיכך את ייצור החשמל הפוטו-וולטאי **הממוצע**. לעומת זאת, מזג-האוויר מתאפיין בשונות רבה בעוצמת הרוחות ובעננות, מה שהופך את עוצמת ומשך הקרינה **הרגעית** ולפיכך את ייצור החשמל הפוטו-וולטאי **הרגעי** לבלתי ניתנים לחיזוי. הפכפכות זאת משפיעה לרעה על יכולת של מערכת לשמור על אספקת חשמל יציבה או צפויה לצרכנים.

3.1.2 רעידת אדמה

רעידת אדמה חזקה עשויה לפגוע במתקני אנרגיה חיוניים, כמו תחנות כוח, תחנות משנה וקווי הולכה, בשטח של כמה מאות קמ"ר ממוקד הרעש. השקע הסורי-אפריקאי, אשר עובר בישראל מן ועד אילת, הוא האזור המועד ביותר לרעידות אדמה בישראל, ובממוצע התרחשה בו רעידת אדמה חזקה בעוצמה של מעל 6 בסולם ריכטר כל 150 שנים. הרעידה החזקה האחרונה ארעה בשנת 1927 בצפון ים המלח בעוצמה של 6.2⁸⁵ 86.

לכן, רעידת אדמה חזקה צפויה לפגוע בישראל בעשרות השנים הקרובות בסבירות גבוהה מאוד. הנזק הקשה צפויה להיות אזורי, בשטח של עשרות עד מאות קמ"ר, ולא צפוי לכסות את רוב המדינה. כמו כן, רוב תחנות הכוח, הלקוחות וקווי ההולכה מרוחקים מהשבר הסורי אפריקאי, לכן לא יגרם נזק מקסימלי לרשת החשמל במקרה של רעידת אדמה חזקה. יחד עם זאת, תשתיות חשמל במזרח המדינה צפויות להינזק בצורה משמעותית. בתסריט שכזה, עלולים לקחת שבועות ואפילו חודשים עד לתיקון רשת החשמל במזרח המדינה.

3.1.3 צונאמי

צונאמי משמעותי, אשר יתרחש בים התיכון, עשוי לפגוע בכל חופי ישראל בים התיכון בו זמנית, ולהשבית את רוב תחנות הכוח אשר על שפת הים התיכון המהוות 40-50% מכושר ייצור החשמל של ישראל (ובמקביל את מתקני ההתפלה, אבל זו כבר צרה אחרת). צונאמי משמעותי יכול להיווצר מרעידת אדמה חזקה בים, התפרצות הר געש בים, או עקב גלישת קרקע מסיבית לים. צונאמי משמעותי לא נפוץ בים התיכון, אך בהחלט התרחש בעבר. גלי צונאמי

⁸⁵ <https://www.mapi.gov.il/Earthquake/Pages/riskAvi.aspx>

⁸⁶ <https://www.oref.org.il/12629-19048-he/pakar.aspx>

עשויים לפגוע גם בספינות LNG, מסופי פריקת פחם, מסופי פריקת נפט ומוצרי, אסדות גז, מסוף LNG ימי⁸⁷. פגיעה קשה באסדות הגז אשר נמצאות כולן באותו אזור, תשבית את כל משק הגז הישראלי.

3.1.4 מזג-אוויר קיצוני

רשת החשמל הריכוזית תוכננה עבור מציאות בה שכיחות אירועי מזג אוויר קיצוני נמוכה ואינה מסכנת את הרשת באופן משמעותי. אולם, אירועי מזג אוויר קיצוני שהיו פעם נדירים בישראל, הולכים והופכים שכיחים יותר עם התגברות שינוי האקלים והופכים לאיום משמעותי על רשת החשמל⁸⁸. להלן מספר סוגים של מזג אוויר קיצוני והשפעתם על רשתות חשמל.

3.1.4.1 חום קיצוני

חום קיצוני ממושך גורם לגרום לשימוש מוגבר באמצעים למיזוג אוויר, לקירור, ולשימוש במים. שימוש מוגבר זה עשוי לגרום לעומס חריג על רשת החשמל. חום קיצוני ממושך אף עשוי לגרום לעליה בשכיחות תקלות ברשת החשמל אשר אינה מותאמת לפעול בתנאים שכאלו. בנוסף, חום קיצוני גורם לאירועי שריפות רבים וקשים יותר, אשר בתורן עשויות לפגוע ברשת החשמל, בעיקר בקווי הולכה באזורים מיוערים.

3.1.4.2 סופה קיצונית

סופה קיצונית, עשויה להביא לרוחות חזקות, שיטפונות, ברד כבד וקור קיצוני. רוחות חזקות גורמות לקריסת עצים, התעופפות חפצים ולנזקים לרשות ההולכה והחלוקה. באירוע סופה קיצוני שהתרחש בישראל ב-2015, נפגעו תוך שעות ספורות מאות קמ"ר מרוחות חזקות, ברד וגשמים כבדים. עקב הרוחות, עצים וענפים רבים נפלו, חסמו כבישים וקרעו אלפי כבלי חשמל ותקשורת. עקב ההיקף הגדול של הנזקים, אזור נרחב בשרון נותק למשל כמעט שבוע מחשמל⁸⁹. סופה חזקה בים התיכון עשויה לפגוע באסדות הגז, בספינות שעשויות להתנגש באסדות הגז או במסוף ה-LNG⁹⁰. למעשה, סופה חזקה שכזו הרסה את נמל הפחם בתחנת הכוח רוטנברג במרץ 2023 ובגינה צפויה פגיעה משמעותית באספקת החשמל בישראל (ראו 4.1.1).

ברד כבד (מעל קוטר של 35 מ"מ) עשוי לשבור את הזכוכית של פאנלים סולאריים, לפגוע ביעילותם ולקצר את חייהם. אולם, פאנל סולארי שבור, לרוב ימשיך לייצר חשמל בהספק מלא או כמעט מלא אפילו למשך שנים לאחר שנפגע. כך שגם במקרה של אירוע ברד כבד, פאנלים סולאריים לרוב ימשיכו לייצר חשמל בהיקפים משמעותיים, ואין צורך

⁸⁷ <https://zy1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

⁸⁸ <https://www.gao.gov/products/gao-21-346>

⁸⁹ <https://ims.gov.il/sites/default/files/2021-01/%D7%91%D7%93%D7%99%D7%A7%D7%AA%20%D7%97%D7%A8%D7%99%D7%92%D7%95%D7%AA%20%D7%94%D7%91%D7%A8%D7%93%20%D7%95%D7%94%D7%A8%D7%95%D7%97%D7%95%D7%AA%20%D7%91-25%20%D7%91%D7%90%D7%95%D7%A7%D7%98%D7%95%D7%91%D7%A8%202015.pdf>

⁹⁰ <https://zy1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

להחליפם מיידית, כמו שקורה מפגיעה קריטית ביכולת יצור/ אספקת חשמל של מתקן יצור (הרס אינורטר, הרס טורבינה, כבל חשמל קרוע וכו').

לדוגמה, מחקר אוסטרלי בחן את השפעת סופת ברד חזקה על יצור החשמל של 3 מתקנים סולאריים גדולים על גגות. 3 המתקנים נמצאים בטווח של עד 10 ק"מ אחד מהשני, חוו סופת ברד כבד (ברד בקוטר של עד 40 מ"מ) בדרום אוסטרליה, ובכולם נמצאו מודולים עם זכוכית שבורה כתוצאה מפגיעת הברד. בשני מתקנים לא הייתה כלל ירידה בהיקף ייצור החשמל עקב הנזק, ובשלישי הייתה ירידה של 10% בלבד בהיקף ייצור החשמל עקב סופת הברד.^{91 92} ההסתברות לברד בישראל היא בסביבות 3 ימי ברד בשנה לכל משבצת של 10,000 קמ"ר, שזהו תחום הביניים בשכיחות לאירועי ברד בעולם.⁹³ אזורים מועדים לברד זוכים למעל 12 ימי ברד בשנה לכל משבצת של 10,000 קמ"ר. לאחר פגיעת הוריקן מריה בפוארטו ריקו בספטמבר 2017, כל רשת החשמל של האי (ששטחו שווה לשטח ישראל בערך מבאר שבע וצפונה) שותקה לחלוטין, ו-5 חודשים אחרי הסופה רבע מהתושבים עדיין היו ללא חיבור לרשת החשמל.⁹⁴

3.1.4.3 קור קיצוני

קור קיצוני ממושך גורם לגרום לשימוש מוגבר באמצעים למיזוג אוויר ולחימום. שימוש מוגבר זה עשוי לגרום לעומס חריג על רשת החשמל. קור קיצוני ממושך אף עשוי לגרום לעליה בשכיחות תקלות ברשת החשמל אשר אינה מותאמת לפעול בתנאים שבאלו; למשל קריעת כבלי חשמל עקב הצטברות קרח, קריסת עצים בשל קרח ושלג.

אירוע קור קיצוני בטקסס שבארה"ב שנוצר משלוש סופות חמורות תוך עשרה ימים, הביא להשבתת רשת החשמל, המים והגז ל-4.5 מיליון איש במדינה למשך מספר ימים במקומות מסוימים. טקסס, שלרוב מתאפיינת באקלים חם אשר דומה יחסית לזה של ישראל, לא הייתה מוכנה לאירוע שכזה. בעקבותיו מתו כ-700 איש, ונגרמו נזקים בהיקף של כ-200 מיליארד דולר - נזק כלכלי דמה לנזק שגרם ההוריקן החמור ביותר בתולדות ארה"ב^{95 96} (ראו 6.4).

3.1.4.4 שיטפונות והצפות

בניגוד למדינות שופעות במים, שיטפונות בישראל נוטים להיות מקומיים, קצרים, ולא בהיקף גדול. לרוב, הנזק הוא מקומי, וניתן לטפל בו בפרק זמן של שעות עד ימים. מכיוון שישראל אינה שופעת במים, אין בה כמעט חשמל הידרואלקטרי. לכן לרוב השיטפונות אינם מהווים איום מרכזי על רשת החשמל, אם כי הם עשויים לגרום לבעיות מקומיות. הצפה גדולה שמקורה בסופה חזקה בים, עשויה לפגוע במספר רב של תחנות כוח לחופי ישראל, אולם סופות שכאלו במזרח הים התיכון כמעט ואינן קיימות.

⁹¹ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2019.1648597>

⁹² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117311114?via%3Dihub>

⁹³ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2019.1648597>

⁹⁴ <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/hurricane-marias-devastation-puerto-rico>

⁹⁵ <https://www.buzzfeednews.com/article/peteraldhous/texas-winter-storm-power-outage-death-toll>

⁹⁶ <https://www.cbsnews.com/news/texas-winter-storm-uri-costs/>

3.1.5 התפרצות סולארית חריפה

התפרצות סולארית היא התפרצות של אנרגיה מפני השמש, אשר עשויה לשחרר מסה של חלקיקים (אלקטרונים, יונים, אטומים) לחלל. בעקבות התפרצות סולארית, עשויים להגיע לכדור הארץ חלקיקים טעונים חשמלית. לרוב, חלקיקים אלו נבלמים ע"י השדה המגנטי והאטמוספירה של כדור הארץ, אולם כאשר ההתפרצות הסולארית חריפה ומכוונת כלפי כדור הארץ, החלקיקים עשויים לחדור הגנות אלו. במקרים כאלו, החלקיקים הטעונים יכולים לגרום לנזק לכל מעגל חשמלי, ואף להשבית רשתות חשמל שלמות, כפי שקרה בקוויבק, קנדה, ב-1989^{97, 98}.

ההתפרצות החזקה ביותר הידועה, התרחשה ב-1859 (Carrington event) והשפיעה על רוב כדור הארץ- חוטי טלגרף עלו באש ונצפתה אורורה (זוהר הקטבים הנוצר מאינטראקציה בין חלקיקי שמש טעונים לבין האטמוספירה) גם באזורים טרופיים. מכיוון שלמעט קווי טלגרף ומעגלים חשמליים במעבדות מחקר לא היו אז רשתות חשמל בעולם, הנזק היה יחסית קטן מאוד. כיום, אירוע שכזה עשוי להשבית את רשתות החשמל של מדינות רבות⁹⁹.

3.1.6 חורף געשי

חורף געשי בכל או רוב כדור הארץ עשוי להגרם עקב התפרצות געשית חזקה מאוד שתשחרר כמויות עצומות של אפר וגופרית לאטמוספירה באופן שיצמצם באופן משמעותי הגעה של קרינת שמש לפני כדור הארץ, מלבד פגיעה קשה בחי, בצומח ובחקלאות, צפויה פגיעה קשה בכושר יצור אנרגיה סולארית לתקופה של חודשים עד שנים.

אלו אירועים נדירים מאוד כאשר בממוצע פעם במאה שנה מתרחשת התפרצות שמקררת את הטמפ' הממוצעת העולמית באופן משמעותי, כמו התפרצות הר פינטובו שבפיליפינים ב-1991 שגרמה לחסימת ~10% מקרינת השמש והורידה את הטמפ' הממוצעת ב-0.4 מעלות צלזיוס; התפרצות הר קרקטואה שבאינדונזיה ב-1883 שהורידה את הטמפ' בחצי הכדור הצפוני ב-1.2 מעלות צלזיוס והשפיעה למשך 5 שנים; התפרצות הר טמבורה שבאינדונזיה ב-1815 שגרמה "לשנה ללא קיץ" בחצי הכדור הצפוני שהייתה הקרה ביותר באזור זה במאות השנים האחרונות; התפרצויות לאקי באיסלנד ב-1783-1874 שגרמו לחורף הקשה ביותר בחצי הכדור הצפוני במאה ה-18 (נהר המיססיסיפי קפא כולו עד מוצאו למפרץ מקסיקו בניו-אורלינס)^{100, 101}.

⁹⁷ https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html

⁹⁸ <https://spaceweatherarchive.com/2021/03/12/the-great-quebec-blackout/>

⁹⁹ <https://spaceweatherarchive.com/2020/08/30/a-warning-from-history-the-carrington-event-was-not-unique/>

¹⁰⁰ <https://www.worldatlas.com/articles/what-causes-a-volcanic-winter.html>

¹⁰¹ <https://www.nature.com/articles/s41561-018-0286-2>

3.2 גורמים אנושיים

3.2.1 תקיפה פיזית

ישראל נתונה לסיכון הגבוה ביותר לתקיפות פיזיות על תשתיות האנרגיה שלה מבין כל המדינות המפותחות. איומים אלו כוללים פעולות חבלה של טרור מקומי, טרור חיצוני (חמאס מעזה, חיזבאללה מלבנון, דאעש, אל-קאידה) ותקיפות של מדינות (סוריה, איראן) ^{102 103 104}.

3.2.1.1 פעולות חבלה יבשתיות

לפני הפקת גז טבעי בהיקף גדול בישראל ע"י מאגרי תמר ולוויתן, כאשר הופק גז רק מהמאגר הקטן מארי B, כ-40% מצריכת הגז בישראל נשענה על גז ממצרים. השתלטות של פעילי טרור בחצי האי סיני, הביאה ל-14 מתקפות שהשביתו את אספקת הגז המצרי לישראל (ולירדן) בשנים 2011-2012. למרות שמדובר בתקיפות פשוטות מאוד אשר אינן מצריכות תכנון מתוחכם וכלי נשק מתוחכמים, פעולות חבלה אלו היו אפקטיביות מאוד ובפועל השביתו את אספקת הגז הטבעי ממצרים לישראל ^{105 106}.

בתקופת מלחמת רוסיה-אוקראינה בין 2022-2023, דווח על מספר רב של פגיעות בתשתיות אנרגיה ברוסיה. יתכן וחלקן התרחשו עקב תקלות, אך חלקן התרחשו עקב מעשי חבלה של גורמים ברוסיה אשר מתנגדים לפלישה הרוסית לאוקראינה ו/או למשטר הרוסי. לפחות בחלק מהמקרים, לקחו על עצמן אחריות לפגיעות קבוצות שכאלו (ראו 6.3).

בארה"ב, יש עלייה של כ-200% באירועי וונדליזם ותקיפה פיזית של תשתיות אנרגיה בין 2017-2022. בשנת 2022 התבצעו תקיפות שכאלו ב-5 מדינות בארה"ב, כאשר תקיפות מכוונות של תחנות משנה במדינת וושינגטון ובצפון-קרולינה שבארה"ב בדצמבר 2022 הביאו לאבדן אספקת חשמל לעשרות אלפי אנשים למשך ימים ולנזקים כלכליים ישירים (תיקון נזקים) של מיליוני דולרים ונזקים לא ישירים (אבדן ימי עבודה ומסחר, הוצאות לא מתוכננות). בצפון קרולינה בוצע ירי מכוון לחלקים רגישים של השנאים. ההערכה היא שפעילי ימין קיצוני אחראים לכך ¹⁰⁷. אירועים אלו מראים עד כמה פגיעה רשת חשמל ריכוזית לתקיפות פשוטות.

תקיפות מסוג זה, פשוטות ביותר לביצוע מכיוון שכמעט כל רשת החשמל נמצאת בשטחים פתוחים ללא הגנה. וקל ללמד מספר רב של אנשים לא מיומנים לבצע תקיפות אלו. בנוסף, הן מצריכות שימוש בנשק קל בלבד, אינן מסוכנות למפגע כמו תקיפה של אנשים, וכמעט כל אחד עם כוונה יכול לבצע אותה. אולם, לתקיפות אלו יש אפקט ניכר. למעשה, אלו פעולות התקיפה עם יחס הגבוה ביותר של נזק/קושי בביצוע.

¹⁰² <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2020/01/weodata/groups.htm>

¹⁰³ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001378079>

¹⁰⁴ <https://zv1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

¹⁰⁵ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4024076,00.html>

¹⁰⁶ <https://www.makorishon.co.il/nrg/online/1/ART2/356/070.html>

¹⁰⁷ <https://www.vice.com/en/article/g5v9ij/north-carolina-power-grid-attack-what-we-know>

תיאורטית, 50 צוותים רכובים של 2 אנשים בכל צוות, יכולים לפגוע בו זמנית ברבע מתחנות המשנה בישראל מבלי להיתפס, להשבית כרבע (ואף יותר) מרשת החשמל בישראל, וכך לגרום לנזק כבד שייקח ימים ואף שבועות לתקן. ביצוע מספר רב של חבלות בו זמנית בשנאים של תחנות משנה ימנע תיקון שלהן במקביל בשל העדר כוח אדם בהיקף שיכול לתקן את כל הנזקים הללו בו זמנית, ימצה את חלקי החילוף הקיימים בארץ ויעכב את תיקון הנזק עד להגעת חלקי חילוף מחו"ל.

הגנה מפני תקיפות שכאלו אפשרית, אך תצריך הפניית משאבים ניכרים למימוש. אם תקיפות שכאלו יבוצעו באופן נרחב בישראל, בעת חירום, למשל בעת סבב לחימה עם החמאס, החיזבאללה או איראן- יהיה צורך בהפניית כוח אדם רב ע"מ לאבטח מתקנים שכאלו. לחילופין, המדינה יכולה לאבטח מתקנים אלו מבעוד מועד באמצעים הנדסיים וטכנולוגיים (קירות מיגון, מניעת גישה, הסתרה, מצלמות מעקב, גיבוי) וכך לחסוך בכוח אדם בעת חירום. אולם, כנראה שכל עוד האיום לא מתממש, ככל הנראה לא ינקטו צעדים להגנה מפניו.

3.2.1.2 איום אווירי- רקטות, טילים וכטב"מים

איום אווירי כנגד תשתיות אנרגיה הולך ומתעצם בישראל. בעת סבבי הלחימה בעשור האחרון עם החמאס בעזה, הושבתה מספר פעמים אסדת הגז הטבעי תמר עקב איום רקטות, כטב"מים, ותקיפה ימית; ומתקני הגז העל קרקעיים באזור אשקלון ואשדוד רוקנו מגז בשביל לצמצם נזקים במקרה של פגיעת רקטה בהם. השבתה שכזו התרחשה במאי 2019¹⁰⁸,¹⁰⁹ שבועות ספורים אחרי השבתה מתוכננת לצורך תחזוקה באפריל 2019. זאת אומרת, לא צריך לפגוע בתשתית גז בשביל להשבית אותה- מספיק לאיים.

לפני חיבור לווייתן לרשת הגז בתחילת 2020, כאשר שדה תמר היה מקור הגז היחידי לישראל, השבתות אלו גרמו להכרזת מצב חירום במשק הגז, ולצמצום משמעותי בשימוש בגז טבעי בישראל¹¹⁰ ¹¹¹. לאחר תחילת הזרמת הגז מלווייתן, המצב השתפר כי בעת השבתה של תמר המשק עבר להסתמך באופן בלעדי על לווייתן ולא היה חייב להפסיק להשתמש בגז (חוסן אנרגטי בסיסי). כך קרה בתקופת מבצע "שומר חומות" ב-2021¹¹² ¹¹³ ¹¹⁴. יחד עם זאת, במצב הנוכחי עדיין יש סיכון גבוה מאוד להשבתה של אספקת הגז לישראל, כפי שהוכח 5 ימים מאוחר יותר, כאשר תקלה

¹⁰⁸ <https://www.themarker.com/dynamo/1.7206806>

¹⁰⁹ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5504583,00.html>

¹¹⁰ <https://www.themarker.com/dynamo/1.7206806>

¹¹¹ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5510098,00.html>

¹¹² https://www.gov.il/he/departments/news/ng_130521

¹¹³ [https://www.calcalist.co.il/local_news/article/B19QQPFdu#:~:text=%D7%9E%D7%97%D7%91%D7%A8%D7%AA%20%D7%A9%D7%91%D7%A8%D7%95%D7%9F%20\(%D7%9C%D7%A9%D7%A2%D7%91%D7%A8%20%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%9C%20%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92,%D7%94%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94%20%D7%94%D7%95%D7%A4%D7%A1%D7%A7%D7%94%20%D7%94%D7%A4%D7%A2%D7%99%D7%9C%D7%95%D7%AA%20%D7%91%D7%90%D7%A1%D7%93%D7%AA%20%D7%AA%D7%9E%D7%A8.](https://www.calcalist.co.il/local_news/article/B19QQPFdu#:~:text=%D7%9E%D7%97%D7%91%D7%A8%D7%AA%20%D7%A9%D7%91%D7%A8%D7%95%D7%9F%20(%D7%9C%D7%A9%D7%A2%D7%91%D7%A8%20%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%9C%20%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92,%D7%94%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94%20%D7%94%D7%95%D7%A4%D7%A1%D7%A7%D7%94%20%D7%94%D7%A4%D7%A2%D7%99%D7%9C%D7%95%D7%AA%20%D7%91%D7%90%D7%A1%D7%93%D7%AA%20%D7%AA%D7%9E%D7%A8.)

¹¹⁴ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/rkZWDoCOu

באסדת לווייתן השביתה את פעולתה למספר שעות כאשר אסדת תמר עוד הייתה מושבתת, וכך הפקת הגז בישראל פסקה כליל^{115 116}.

בינתיים, מכיוון שיכולות החמאס מוגבלות מבחינת הדיוק, החמקנות והיקף הירי; והודות ליעילות היחסית של אמצעי ההגנה הישראליים- לא נפגעו תשתיות גז טבעי חיוניות בישראל מפעילות התקפית. אולם, במבצע שומר חומות, הוכח כי תשתיות האנרגיה הישראליות הריכוזיות פגיעות לירי רקטות, כאשר מיכל דלק ענק של חברת תש"ן (תשתיות נפט ואנרגיה) באשקלון נפגע מרקטה, דלק במשך כיום, הביא לזיהום אוויר קשה באזור ולאבדן רב של דלק¹¹⁷.

אולם, צפוי כי גם יכולות החמאס תשתפרנה עם הזמן, ובמקביל ידוע כי יכולות איראן, סוריה וחיזבאללה מסוכנות הרבה יותר. הערכות המודיעין מדברות על עשרות אלפי (ואף מאות אלפי) רקטות פשוטות, רקטות מדויקות, טילים בליסטיים, טילי שיוט וכטב"מים (כלי טייס בלתי מאויישים) התקפיים אשר נמצאים בידי איראן, סוריה וחיזבאללה^{118 119 120 121 122 123 124 125}. ישנם מקורות אשר טוענים כי במרחב סוריה ולבנון יוצבו בשנים הקרובות (או כבר הוצבו) כחצי מיליון רקטות וטילים כנגד ישראל¹²⁶.

מספרים אלו גבוהים פי 30-10 מהמספר שהיה בלבנון בזמן מלחמת לבנון השנייה, ואין לישראל יכולת מבצעית לנטרל את האיום על הקרקע, כפי שראינו במלחמת לבנון השנייה, בשל הכמות העצומה של הרקטות, הטילים והמשגרים¹²⁷. בעת עימות צבאי עם אחת או כמה מהן, צפוי כי ישראל תטווח בהיקפים של אלפי רקטות, טילים וכטב"מים בכל יום. מול מטחים שכאלו, גם יעילות יירוט של 90-95% של מערכות כיפת ברזל, שרביט קסמים וחץ- לא תספיק בשביל להגן על תשתיות אנרגיה (ותשתיות אחרות כמו מתקני התפלת מים) חיוניות^{128 129}.

למשל, ממטח אחד של 100 רקטות מדויקות, טילים וכטב"מים על אסדת גז טבעי או על תחנת כוח גדולה, צפוי כי 10 רקטות/ טילים/ כטב"מים יחדרו את ההגנה האווירית, וישמידו את המתקן או לכל הפחות ישביתו אותו לחודשים ארוכים.

¹¹⁵ <https://www.ice.co.il/finance/news/article/820250>

¹¹⁶ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/HJebamly00

¹¹⁷ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/HjUllKud

¹¹⁸ <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2022/2022.3/2022.3-107-IDF-Mesukanim.pdf>

¹¹⁹ <https://news.walla.co.il/item/2839981>

¹²⁰ https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/2017/05/Memoranda_silent_10-Dekel.Orion_.pdf

¹²¹ <https://www.maariv.co.il/news/military/Article-875473>

¹²² <https://www.haaretz.co.il/opinions/.premium-1.10486431>

¹²³ <https://www.haaretz.co.il/opinions/.premium-1.10588963>

¹²⁴ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001378079>

¹²⁵ <https://news.walla.co.il/item/3396958>

¹²⁶ https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/2019/12/memo198_e.pdf

¹²⁷ <https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/systemfiles/SystemFiles/%D7%90%D7%91%D7%99%D7%A2%D7%93.pdf>

¹²⁸ <https://www.israeldefense.co.il/node/49884>

¹²⁹ https://www.inss.org.il/he/wp-content/uploads/sites/2/2019/12/memo198_e.pdf

גם איום הכטב"מים הולך ועולה, ולישראל כבר חדרו כטב"מים של איראן ושל החיזבאללה. רובם יורטו, חלקם הצליחו לטוס זמן רב מעל שטח ישראל, וחלקם אף הצליחו לצאת מישראל בבטחה אחרי שסיירו בה זמן ארוך^{130 131 132 133}. אפילו החמאס כבר משגר באופן קבוע מל"טים ורחפנים לתקיפה ולסיוור בישראל, אם כי אלו קטנים יותר ובעלי פוטנציאל נזק קטן יותר^{136 137}.

המחשה של סיכון זה באה לידי ביטוי בעת מלחמת רוסיה-אוקראינה ב-2022-2023, כאשר רוסיה פגעה קשות בתשתיות האנרגיה של אוקראינה והשביתה 50% מרשת החשמל (ראו 6.3).

3.2.1.3 איום ימי

לגופים בעלי אמצעים, קל הרבה יותר להגיע ולפגוע פיזית בתשתית כאשר היא נמצאת רחוק בלב ים, לעומת תשתית מקבילה אשר נמצאת ביבשה. מעבר לתקיפה מהאוויר או מהקרקע שניתן לבצע גם ליעד יבשתי, תשתית אנרגיה קריטית בים חשופה למתקפה על פני הים באמצעות כלי שייט (ירי טילים, ספינת נפץ), וכן למתקפה מתחת לפני המים באמצעות צוללות גדולות תקינות, צוללות ננסיות, צוללות בלתי מאוישות וצוללנים.

במלחמת לבנון השנייה (2006) למשל, הושבתה אוניית חיל הים (אח"י) חנית ע"י טיל חוף-ים. כיום נמצאים בידי החיזבאללה, סוריה ואיראן טילים מתקדמים הרבה יותר^{138 139 140}. במבצע שומר חומות (2021) ואף בסבבי לחימה קודמים מול החמאס, נעשו ניסיונות התקפיים ע"י צוללנים, סירות ואף צוללת זעירה בלתי מאוישת של חמאס; וכן בוצע שימוש בסירות נפץ כנגד מטרות ישראליות באזור לבנון וים סוף^{141 142}. בשנים האחרונות אף התגברה הלחימה הגלויה בין ישראל לאיראן, ובמהלכה הותקפו ספינות ישראליות או בבעלות ישראלית ע"י כלי שייט טילים וכטב"מים^{143 144 145 146 147}.

גם אירוע תקיפה פשוט, כמו דריסה או ניגוח של אסדת גז טבעי ימית ע"י ספינה עוינת, עשוי להשבית כליל אסדת גז טבעי למשך חודשים ואף יותר. במידה וספינת מטען או מיכלית גדולה תנסה לנגח אסדת גז טבעי, יהיה קשה מאוד

¹³⁰ <https://www.bhol.co.il/news/130011>

¹³¹ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1000967948>

¹³² <https://www.yediot.co.il/articles/0,7340,L-4886464,00.html>

¹³³ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5102924,00.html>

¹³⁴ <https://www.makorrishon.co.il/news/yoman/167135/>

¹³⁵ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/hyodglaj9

¹³⁶ <https://www.haaretz.co.il/news/politics/2021-11-08/ty-article/0000017f-dee5-db22-a17f-fef551e20000>

¹³⁷ <https://www.israelhayom.co.il/news/defense/article/8499765>

¹³⁸ https://hms.haifa.ac.il/images/publications/Nir_Zarchi/nir.pdf

¹³⁹ <https://news.walla.co.il/item/3396958>

¹⁴⁰ <https://din-online.info/pdf/kt28.pdf>

¹⁴¹ <https://zy1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

¹⁴² <https://www.haaretz.co.il/news/politics/2021-11-08/ty-article/0000017f-dee5-db22-a17f-fef551e20000>

¹⁴³ <https://www.ynet.co.il/news/article/Sk97t11Rh00>

¹⁴⁴ <https://www.ynet.co.il/news/article/hygmttzkf>

¹⁴⁵ <https://www.calcalist.co.il/local/articles/0,7340,L-3901452,00.html>

¹⁴⁶ <https://www.calcalist.co.il/articles/0,7340,L-3895650,00.html>

¹⁴⁷ <https://news.walla.co.il/item/3429317>

לעצור אותה- אין כיום אמצעים יעודים לעצירת כלי שייט כבד אשר ינסה להתנגש באסדת גז טבעי בים. ספינה גדולה עשויה להמשיך ולנוע מכוח האינרציה אפילו 8 ק"מ מרגע שכובו/ הושבתו מנועיה ¹⁴⁸. כזכור, חיל הים התקשה בעצירת האונייה הקטנה המאווי מרמרה בעת משט המחאה לעזה. למרות שמדובר באירוע שונה מהתנגשות מכוונת של ספינה באסדה, הוא ממחיש את המורכבות של אירועים ימיים, ואת חוסר המוכנות של חיל הים לאירועים לא מורכבים ולא שגרתיים ^{149 150}.

כפי שהובח במסגרת המלחמה בין רוסיה ואוקראינה עם צינורות נורדסטרים 1 ו-2 (ראו 6.3), קיימת אפשרות של תקיפת צינורות הובלת הגז הטבעי מהבארות לאסדות הגז הטבעי או מהן לטרמינלי קליטת הגז בחוף ¹⁵¹. אמנם, התקפה שכזו מסובכת יותר מתקיפת אתר יבשתי או אסדת גז טבעי, ומצריכה טילים או פצצות מיוחדות לתקיפת תשתיות בעומק הים שישוגרו ממטוסים או ספינות, צוללות או צוללנים לעומק רב. אולם, צינורות הגז אשר בים נמתחים לאורך מאות ק"מ כמעט ללא הגנה ועשויים להוות מטרות לתקיפה ע"י מטוסי, ספינות או צוללות אויב. יותר מכך, עומק המים במרחק של עד כ-20 ק"מ מחופי אשדוד למשל, היכן שממוקמים צינורות הגז של אסדת תמר, הוא פחות מ-100 מ'- בטווח הצלילה של צוללנים טכניים התקפיים מנוסים שיש לאיראן, ושעשויים להיות לסוריה, חיזבאללה ואולי אף לחמאס ¹⁵².

3.2.1.4 חורף גרעיני

חורף גרעיני בכל או רוב כדור הארץ עשוי להגרם עקב גבוה מספר גבוה של פיצוצים גרעיניים על פני היבשה ברחבי העולם, שישחררו כמויות עצומות של אבק לאטמוספירה ויצמצמו באופן משמעותי הגעה של קרינת שמש לפני כדור הארץ, בדומה לחורף געשי (ראו 3.1.6). מלבד פגיעה קשה בחי, בצומח ובחקלאות, צפויה פגיעה קשה בכושר יצור אנרגיה סולארית לתקופה של חודשים עד שנים ¹⁵³.

3.2.1.5 פולס אלקטרו-מגנטי

מתקנים שיוצרים פולס אלקטרו-מגנטי חזק עשויים לפגוע באופן קשה במעגלים חשמליים ולכן ברשתות חשמל. האפקט שלהם דומה לאפקט שיוצרת התפרצות סולארית חזקה, בשל גודלם המוגבל הפגיעה היא באזור מצומצם יותר מאשר במקרים של התפרצות סולארית חזקה, אבל פיצוץ של פצצה גרעינית בגובה כמה מאות ק"מ באטמוספירה עדיין עשוי לפגוע ברשתות חשמל ברדיוס של מאות ק"מ ויותר ^{154 155}.

¹⁴⁸ <https://zy1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

¹⁴⁹ <https://din-online.info/pdf/hms1.pdf>

¹⁵⁰ https://hms.haifa.ac.il/images/publications/Nir_Zarchi/nir.pdf

¹⁵¹ <https://www.theguardian.com/world/2023/apr/28/russian-navy-vessel-seen-near-nord-stream-pipelines-days-before-blasts>

¹⁵² <https://msp-israel.net.technion.ac.il/files/2017/08/%D7%90%D7%A7%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92-%D7%92%D7%99%D7%90%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99%D7%94-%D7%91%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%AA-%D7%94%D7%99%D7%9E%D7%99%D7%AA-%D7%9C%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C.pdf>

¹⁵³ <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00794-y>

¹⁵⁴ <https://www.dhs.gov/science-and-technology/electromagnetic-pulse-empgeomagnetic-disturbance>

¹⁵⁵ https://www.dhs.gov/sites/default/files/2022-09/22_0902_st_emp_mitigation_best_practices.pdf

3.2.2 תקיפת סייבר/ תקיפה וירטואלית

יותר ויותר מערכות אנושיות מחוברות לדרכי תקשורת, ע"מ לאפשר דרגות גבוהות יותר של בקרה, שליטה וגמישות הפעלה. תקיפות וירטואליות, או תקיפות סייבר, הן תקיפות אשר מתרחשות דרך דרכי תקשורת של המערכת, ע"מ לגרום לנזק, לגנוב מידע או לגרום להפסד כספי/ כלכלי. תקיפות סייבר, עשויות לגרום לנזק פיזי למכשירים ואף למתקנים. כמו כל המערכות האנושיות, ככל שמערכות החשמל והאנרגיה מחוברות יותר לאמצעי תקשורת, לשליטה מרחוק ולאיסוף מידע מרחוק, כך הן פגיעות יותר לתקיפות וירטואליות^{156 157}.

אין ספק כי חיבור מערכות חשמל ואנרגיה לדרכי תקשורת מאפשר הפעלה גמישה ואופטימלית של אנרגיות מתחדשות ואגירה, וכי היקף התקשורת במערכות חשמל ואנרגיה מבוססות אנרגיות מתחדשות ואגירה גבוה יותר מאשר במערכות חשמל ואנרגיה ריכוזיות. אולם, יש לשים לב, כי מערכות חשמל ואנרגיה התחברו לדרכי תקשורת, הרבה לפני ובלי קשר לכניסה של אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה לרשתות החשמל והאנרגיה. למשל, עבור תקשורת בין תחנות כוח ומרכזי שליטה, ועבור מונים חכמים.

בשנת 2014 למשל, הותקפו מערכות חברת החשמל בישראל מאות אלפי פעמים בכל יום¹⁵⁸. ב-2015 שובשה פעילותן של 27 תחנות חלוקה ו-3 תחנות כוח ברשת החשמל של אוקראינה, ככל הנראה ע"י רוסיה, ונפגעה אספקת החשמל לכ-50 אלף איש^{159 160}. ב-2016 התקפה מוצלחת על רשת החשמל בישראל הביאה לפגיעה במערכות למשך כיומיים^{161 162}. ב-2021, התקפת סייבר גרמה לחברת Colonial, אשר מזרימה דלק ותזקיקי נפט במזרח ארה"ב, לסגור את כל המערכות שלה לשבוע, ולמחסור חמור בדלק במזרח ארה"ב^{163 164}. ב-2019 זהו 155 קבוצות אשר מתקיפות תשתיות אנרגיה ברחבי העולם¹⁶⁵.

כחלק מפלישת רוסיה לאוקראינה ב-2022, הרוסים ביצעו תקיפות סייבר רבות כנגד אוקראינה, אבל בינתיים הנזק מהן מצומצם, והאוקראינים הצליחו לנטרל את רוב התקיפות. אולם, במקביל לאירועים באוקראינה, ב-8.6.2022 ארע פיצוץ במתקן הנזלת גז טבעי גדול בטקסס שאחראי ל-15% מיצוא גז טבעי נזולי מארה"ב. למרות שכרגע האירוע נראה בתקלה, ישנם כאלו אשר טוענים שיש לחקור חשד שהאירוע התרחש עקב מתקפת סייבר רוסית^{166 167}. כך או כך,

¹⁵⁶ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559348>

¹⁵⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018303041?via%3Dihub#bib0178>

¹⁵⁸ <https://www.iec.co.il/spokesman/pages/220320151.aspx>

¹⁵⁹ https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber_Challenges_to_the_Energy_Transition_WEC_MMC_2019.pdf

¹⁶⁰ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%9E%D7%AA%D7%A7%D7%A4%D7%AA-%D7%A1%D7%99%D7%99%D7%91%D7%A8-%D7%A0%D7%92%D7%93-%D7%AA%D7%A9%D7%AA%D7%99%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%90%D7%95%D7%A7%D7%A8%D7%90%D7%99%D7%A0%D7%94/>

¹⁶¹ <https://www.maariv.co.il/news/israel/Article-523547>

¹⁶² https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber_Challenges_to_the_Energy_Transition_WEC_MMC_2019.pdf

¹⁶³ <https://www.energy.gov/ceser/colonial-pipeline-cyber-incident>

¹⁶⁴ <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IN/IN11667>

¹⁶⁵ https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber_Challenges_to_the_Energy_Transition_WEC_MMC_2019.pdf

¹⁶⁶ <https://www.npr.org/2022/06/10/1104118546/freepport-natural-gas-terminal-texas-explosion-offline-shutdown>

¹⁶⁷ <https://www.washingtonexaminer.com/opinion/did-russian-hackers-blow-up-a-texas-Ing-pipeline>

אירוע זה ממחיש את פגיעות מערכת אנרגיה ריכוזית. כמו כן, יתכן ולפחות חלק מסדרת תקלות ותאונות בסקטור האנרגיה הרוסי בתקופת המלחמה, מקורן בהתקפות סייבר אוקראיניות או פרו-אוקראיניות (ראו 6.3).

אמנם, ברשת מבוזרת וברשת חכמה יש יותר חיבורים של חלקי רשת החשמל לרשת האינטרנט ולכן יותר נתיבי התקפה/ השפעה וירטואליים¹⁶⁸. אולם, מכיוון שרוב רכיבי רשתות חשמל מבוזרות ו/או חכמות הינם קטנים ומשפיעים על חלקים קטנים ואפילו מזעריים של הרשתות (בית בודד ואף מכשיר חשמל בודד), פגיעה בהם לרוב חסרת משמעות ברמת הרשת השלמה.

3.2.3 מניפולציות גיאופוליטיות

ליחסים גיאופוליטיים תמיד הייתה חשיבות בסקטור דלקי המאובנים. מדינות (ואף חברות) עושות שימוש במניפולציות גיאופוליטיות בסקטור האנרגיה ע"מ לצבור כוח, להשיג הישגים גיאופוליטיים, להעניש יריבות, להחליש יריבות, לבדד יריבות, לבטל הישגים של יריבות ועוד. המצאות מאגרי דלקי מאובנים במדינה מסוימת מהמאה ה-20 ועד היום, העניקו לה כוח רב בזירה הבינלאומית. פיזור מאגרי הנפט בעולם והשליטה בהם, השפיעו רבות על הגיאופוליטיקה בעולם לאורך למעלה מ-100 שנים, יזמו והכריעו מלחמות, יצרו וביטלו בריתות.

חרם הנפט הערבי בשנות ה-1970 חייב מדינות רבות להפנות עורף לישראל למשל, בשביל שיוכלו להמשיך ולהנות מנפט שמקורו במדינות ערב. מדינות שסירבו לשתף פעולה, סבלו מעליות מחירים דרמטיות בסקטור הנפט. ארה"ב ביססה את עיקרי מדיניות החוץ שלה במחצית השנייה של המאה העשרים על נפט, תוך כריתת בריתות עם מדינות רודניות עשירות בנפט, בעלות ערכי מוסר שונים לחלוטין מאלו (המוצהרים) האמריקאים. במסגרת מדיניות זו ארה"ב סייעה למדינות אלו בנשק ובייעוץ, הציבה בשטחן כוחות רבים ואף לחמה.

הסיבה העיקרית למדיניות החוץ הרופסת של אירופה כנגד התוקפנות הרוסית ב-20 השנים האחרונות, ששיאה היא כרגע מלחמת רוסיה אוקראינה ב-2022-2023, היא התמכרות לדלקי מאובנים רוסיים זולים, הרוסים השתמשו בתלות האירופית כנשק גיאופוליטי למניעת ביקורת, התערבות, או התנגדות לתוקפנות (ראו 6.3.3)¹⁶⁹.

לגורם זה כמעט ואין השפעה על רשתות חשמל מבוזרות, בעיקר עם הגדלת היקפי הייצור של מתקנים של אנרגיות מתחדשות ואגירה בעולם, והגדלת מספר סוגי הטכנולוגיות וחומרי הגלם שלהם.

3.2.4 רשלנות, חוסר מוכנות או אילוצים

גורמים אנושיים שאינם מכוונים או אינם התקפיים, גם עשויים לגרום להשפעה או לפגיעה ברשת החשמל. רשלנות בהקמת מערכת או בתחזוקה שלה (תחזוקה לקויה); חוסר מוכנות לאירועים העשויים להשפיע על הרשת (הסופות

¹⁶⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018303041?via%3Dihub#bib0178>

¹⁶⁹ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

הקפואות בטקסס בחורף 2021); אילוצים כלכליים (אין תקציב לשים סוללת כיפת ברזל בכל תחנת כוח) או פוליטיים (ישראל כאי אנרגטי) – עשויים להפוך רשת חשמל לפגיעה לגורמים מסוימים.

4 השוואת סיכונים לשתי החלופות

בפרק זה נבחן כיצד משפיעים ומסכנים גורמים טבעיים ואנושיים רשת חשמל ריכוזית ורשת חשמל מבוזרת, כיצד הרשתות מתמודדות עם סיכונים אלו, ונשווה איזה רשת מראה חסינות גבוהה יותר לאתגרים אלו.

4.1 סיכון הנובע מהיות ישראל אי אנרגטי

עקב אילוצים פוליטיים, הנובעים מיחסיה של ישראל עם שכנותיה, ישראל היא אי אנרגטי, בניגוד לרוב מדינות העולם המפותח. זאת אומרת, היא אינה מחוברת למערכות האנרגיה של שכנותיה, אין לה גיבוי חיצוני והיא צריכה לסמוך רק על מערכת האנרגיה שלה במידה של תקלה. מדינה אשר מחוברת למערכות האנרגיה של שכנותיה, יכולה מצד אחד לקבל מהן אספקת אנרגיה כאשר יש צורך בכך, ומצד שני לספק להן אנרגיה. מדינות מחוברות, חסינות יותר לפגיעה במערכות האנרגיה שלהן, כי יש להן גיבוי מסוים משכנותיהן.

נסייג, כי בתקופה מסוימת לפני כעשור, ישראל כן הייתה מחוברת לצינור גז מצרי, וקיבלה ממצרים גז. אולם, לאחר התקפות טרור מרובות כנגד הצינור הזה בסיני, ולאור הגדלת הפקת הגז הטבעי הישראלי, חיבור זה למצרים לא בשימוש. בנוסף, ישראל החלה בשנים האחרונות להזרים גז טבעי למצרים ולירדן בשל שפע הגז הטבעי הישראלי. אולם חיבור זה לא מועיל לישראל מבחינת גיבוי אנרגטי. בנוסף, מתוכננת הקמת שדה סולארי בגדול ירדן, אשר צפוי לספק חשמל לישראל בעתיד.

צריך לשים לב כי מדינה אשר מחוברת אנרגטית למדינה שכנה שהיא עוינת למחצה או שיש לה בעיות ביטחון קשות, נמצאת בסיכון לפגיעה חיצונית לאספקת האנרגיה שלה. הדבר נכון בדלקי מאובנים (למשל, הפגיעות באספקת הגז ממצרים) וגם באנרגיות מתחדשות (למשל, התוכנית העתידית לאספקת חשמל פוטו-וולטאי מירדן לישראל).

בכל מקרה, כיום, בכל הקשור לרשת החשמל, ישראל היא אי חשמלי, ואין לה גיבוי ממדינה שכנה במקרה של פגיעה ברשת החשמל שלה. לכן, ישראל נמצאת בסיכון גבוה יותר לפגיעה ברשת החשמל שלה, לעומת רוב המדינות המפותחות. מדינות מפותחות הנמצאות במצב דומה, הן מדינות אי מרוחקות כמו יפן, איסלנד וניו-זילנד; או דרום קוריאה שאמנם לא מדינת אי אבל במצב מלחמה עם שכנתה היחידה צפון קוריאה (שגם כך לא מסוגלת לגבות אותה אנרגטית כי היא סובלת מעוני אנרגטי קיצוני)¹⁷⁰. אפילו בריטניה שהיא מדינת אי, מחוברת לרשתות החשמל של אירלנד, של צרפת ושל נורווגיה.

¹⁷⁰ <https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/B/htmlView/ENBAHP001.do?menuCd=EN020101>

באופן כללי, מדינה שהיא אי אנרגטי ללא משאבי טבע של דלקי מאובנים (כמו יפן, צפון קוריאה, הוואי, ישראל עד לפני 15 שנה), פגיעה יותר לשימוש ברשת חשמל ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים, כי יבוא הדלקים ארוך, מורכב ויקר. מדינות שכאלו ייהנו עוד יותר מרשת חשמל מבוזרת מבוססת אנרגיות מתחדשות ואגירה. ישראל, בזכות פיתוח מאגרי הגז הטבעי המקומיים שלה, יוצאת עם הזמן ממצב זה (אם כי אנו עדיין שם בתחום התלות בנפט).

4.2 סיכון הנובע מהמרחק וממספר השלבים בין מקור האנרגיה וצרכן החשמל

ברשת הריכוזית הישראלית, המרחק בין מקור האנרגיה (באר גז למשל) והצרכן נע בין 100-700 ק"מ, ומספר השלבים העיקריים הוא לפחות 13. לעומת זאת, ברשת מבוזרת מבוססת PV ואגירה, במקרים רבים יצור החשמל, אגירתו והשימוש בו מתרחשים באותו מבנה- כך שמעורבים בשרשרת העברת החשמל מהיצרן לצרכן מספר נמוך מאוד של שלבים (1-2), והחשמל עובר מרחק של מטרים או עשרות מטרים בלבד. במקרים בהם הייצור לא מתבצע באותו מבנה, הוא מתרחש באזורים סמוכים במרחק של עד כ-10 ק"מ ולרוב פחות מכך (ואז נדרשים ~5 שלבים בין מקור האנרגיה והצרכן, אבל עדיין יכול להיות רק שלב אחד בין מתקן אגירת אנרגיה דירתי והצרכן). כמובן, שהקמת רשת מבוזרת באזור עמוס מבנים ותשתיות מורכבת יותר, אבל גם אם יצור רוב החשמל מתבצע מחוץ לאזור זה, תמיד יש אופציה לאגירת החשמל במבנים ובדירות עצמם (ראו איור 3).

ישנו סיכון מסוים לתקלות ולפגיעות בכל ק"מ של רשת חשמל, ככל שמרחק זה יותר גדול, יש סיכוי גבוה יותר שתתרחש פגיעה בשרשרת זו (תקלה, פגיעה מכוונת, פגיעה ממקור טבעי), אשר תמנע אספקת חשמל לצרכן. ע"מ לפשט את הניתוח, נתעלם מהבדלים בסיכון לפגיעה בחלקים שונים של הרשתות ונתמקד במרחק בלבד בין מקור האנרגיה והצרכן. אם נתרגם את הנתונים הללו להבדל כמותי בין רשת ריכוזית ורשת מבוזרת, ניתן להגיד כי בישראל **הסיכון לרשת ריכוזית עקב המרחק בין מקור האנרגיה והצרכן, גדול פי 10-70,000 מאשר ברשת מבוזרת**. ככל שהרשת מבוזרת יותר והמרחק בין מקור האנרגיה וצרכנו קטן יותר (למשל, PV או אגירת חשמל באותו הבית/ דירה בהם החשמל נצרך), כך הסיכון היחסי לרשת הריכוזית גדול יותר לעומת הרשת המבוזרת¹⁷¹.

ממשק בין 2 שלבים ברשת הוא אזור ברשת אשר הינו מורכב יותר מאשר שלב ברשת, ולכן יש בממשק בין שלבים יותר סיכון לתקלות מאשר בשלב ברשת. לדוגמה, ממשק בין קו מתח גבוה לבין תחנת משנה, מורכב יותר מאשר קו מתח גבוה בלבד. לכן, ככל שיש יותר שלבים בשרשרת העברת החשמל מהיצרן לצרכן גם עולה הסיכון לתקלה. אם נתעלם מסיכון שונה בין שלבים שונים וממשקים שונים, ניתן להגיד עבור ישראל כי בקירוב, **הסיכון לרשת ריכוזית עקב מספר השלבים בה גבוה פי 3-13 לפחות לעומת רשת מבוזרת**¹⁷².

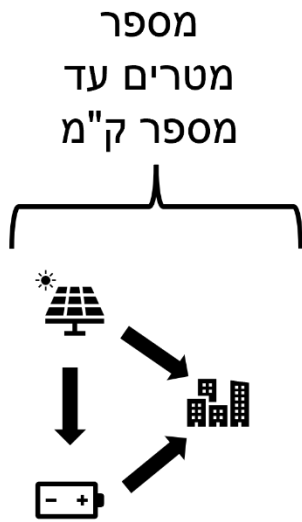
¹⁷¹ מרחקים בין מקור אנרגיה וצרכן: רשת ריכוזית- 100-700 ק"מ; רשת מבוזרת 0.01-10 ק"מ.

700 km/ 0.01 km = 70,000 ; 100 km/ 10 km = 10

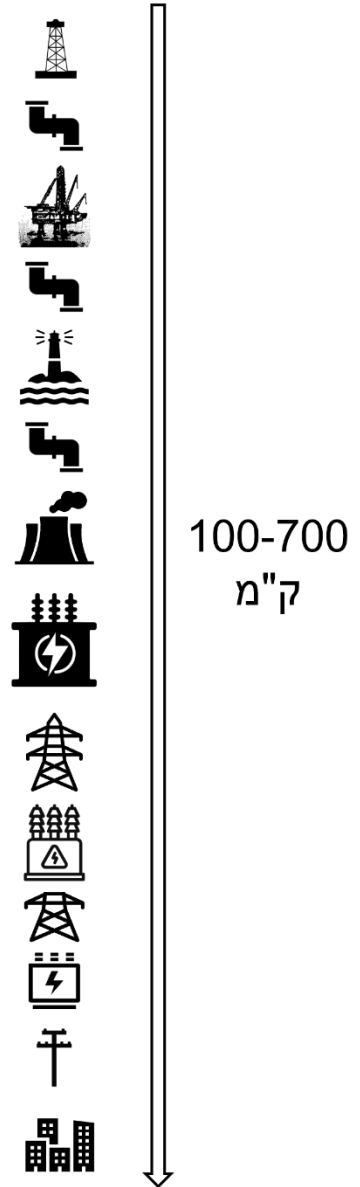
¹⁷² מספר השלבים בין מקור האנרגיה והצרכן: רשת ריכוזית- לפחות 13; רשת מבוזרת- 5-1.

13/1 = 13, 13/5 ≈ 3

רשת מבוזרת



רשת ריכוזית



איור 3: השוואת המרחק ומספר השלבים בין מקור האנרגיה וצרכן החשמל ברשת ריכוזית וברשת מבוזרת. ימין: רשת ריכוזית- באר גז, צינור גז תת-ימי, אסדת גז ימית, צינור גז תת-ימי, טרמינל גז בחוף, צינור גז יבשתי, תחנת כוח, תחנת מיתוג, קו מתח על עליון/עליון, תחנת משנה, קו מתח גבוה, שנאי ברשת החלוקה, קו מתח נמוך, צרכנים. המרחק בין מקור האנרגיה והצרכנים הוא בין 100-700 ק"מ, ומספר השלבים העיקריים ביניהם הוא לפחות 13. שמאל: רשת מבוזרת- פאנל סולארי, צרכנים ו/אן מתקן אגירת אנרגיה. המרחק בין מקור האנרגיה והצרכנים הוא בין מספר מטרים ומספר ק"מ, ומספר השלבים העיקריים ביניהם יכול להיות אפילו 1-2.¹⁷³

¹⁷³ All images are from <https://www.veryicon.com>, <https://openclipart.org>, and Office.

4.3 סיכון הנובע מפגיעה באספקת האנרגיה המשמשת לייצור חשמל

ללא אספקת מקור אנרגיה לייצור חשמל, לא ניתן לייצר חשמל. עד לאחרונה, לא היה ניתן לאגור חשמל באופן יעיל וזול. לכן, קצב אספקת אנרגיה לייצור חשמל הכתיבו את קצב ייצור החשמל. מכיוון שקצב ייצור החשמל ברשת קובבנציונאלית חייב להיות שווה לקצב צריכתו, לקצב אספקת האנרגיה לייצור החשמל היה חשיבות קריטית ביציבות הרשת ובאספקת חשמל לכל הצרכנים.

4.3.1 דלקי מאובנים

4.3.1.1 מניפולציות גיאופוליטיות

כיום יש עשרות מדינות שמייצאות נפט, ו-15 מדינות שמייצאות כמעט את כל הפחם בעולם. מגוון יצואניות זה בד"כ רחב מספיק בשביל להבטיח כי ימצא מי שייצא דלקי מאובנים אלו לישראל, בייחוד לאור פתיחת אופציות לייבוא נפט ממדינות במפרץ הפרסי בשנים האחרונות. יחד עם זאת, תמיד צריך לזכור שיחסים גיאופוליטיים לעיתים משתנים, ואיתם הנכונות לייצא דלקי מאובנים למדינות שונות, כפי שהיה בתקופת אמברגו הנפט בשנות ה-1970, וכפי שהמצב היום בין המערב ורוסיה.

הגורם האנושי של מניפולציות גיאופוליטיות (ראו 3.2.3) הוא אחד הגורמים המשפיעים ביותר על אספקת דלקי מאובנים שהופכים רשת חשמל (ואנרגיה) ריכוזית לשברירית ולנעדרת חוסן אנרגטי. התלות האירופית ביבוא גז טבעי ונפט מרוסיה בעשרים השנים האחרונות, מנעו מאירופה מלבקר או להתנגד לתוקפנות רוסית שסתרה את ערכי חוסר התוקפנות, השלום, והשוויון האירופיים¹⁷⁴.

כאשר סוף סוף החליטו האירופים להתנגד לתוקפנות הרוסית בעקבות הפלישה הרוסית לאוקראינה ב-2022, הרוסים מימשו את התלות האנרגטית האירופית בהם ואת העדר החוסן האנרגטי האירופי הנובע מכך- הם צמצמו מאוד ואף הפסיקו את אספקת דלקי המאובנים לאירופה (במסגרת העימות פוצצו גם צינורות הגז לאירופה נורדסטרים 1+2¹⁷⁵) והביאו לפגיעה קשה בכלכלה האירופית^{176 177}.

העדר חוסן אנרגטי זה הביא את האיחוד האירופי להגדיל את הקמת מתקני האנרגיות המתחדשות ב-2022 ב-34% לעומת התחזיות המקוריות^{178 179 180 181}, ולפרסם ב-2023 הצעה להאצת הקמת מתקני אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה, ולהפסקה הדרגתית של שימוש בדלקי מאובנים בכלל ובגז טבעי בפרט¹⁸². בהמשך, דוח חדש של EMBER

¹⁷⁴ <https://foreignpolicy.com/2023/01/19/russia-ukraine-economy-europe-energy/>

¹⁷⁵ <https://www.theguardian.com/world/2023/apr/28/russian-navy-vessel-seen-near-nord-stream-pipelines-days-before-blasts>

¹⁷⁶ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

¹⁷⁷ <https://edition.cnn.com/2022/09/05/energy/energy-crisis-russia-europe-costs/index.html>

¹⁷⁸ <https://iea.blob.core.windows.net/assets/64c27e00-c6cb-48f1-a8f0-082054e3ece6/Renewables2022.pdf>

¹⁷⁹ <https://m.ynet.co.il/articles/hkck7vghs>

¹⁸⁰ <https://www.weforum.org/agenda/2022/12/europe-russia-energy-imports/>

¹⁸¹ <https://edition.cnn.com/2022/05/18/energy/europe-repower-plan-russian-energy/index.html>

¹⁸² https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1591

מצא כי ייצור חשמל באמצעות שמש ורוח באירופה עבר ב-2022 לראשונה ייצור חשמל בגז טבעי (ב-2019 הם עברו כבר את הפחם), צופה ירידה של 20% בייצור חשמל מדלקי מאובנים ב-2023, וצופה כי לאחר 2025 יתחיל להתכווץ שוק הגז הטבעי ביבשת ^{183 184}.

אבל חשוב גם לשים לב מה קרה למדינה כמו רוסיה שהסתמכה באופן נרחב על יצוא דלקי מאובנים, כאשר יצוא זה נפגע- הכלכלה הרוסית כמובן שנפגעה קשות, ברמה שייקח לה זמן רב להתאושש ^{185 186}. גורל דומה צפוי למדינות אשר משקיעות הרבה בדלקי מאובנים, מבלי להתכונן למעבר לאנרגיות מתחדשות ולאגירה.

4.3.1.2 מגבלות אגירה של גז טבעי

קל לשנע בספינות, לאגור ולאחסן פחם, נפט ותוצריו בכמויות גדולות ולאורך זמן רב ובכך להימנע מחוסר יציבות בכושר ייצור החשמל. אולם לא כך הדבר לגבי גז טבעי. גז טבעי ניתן לאחסן בכמויות גדולות ולאורך זמן באמצעות הנדלתו, אולם תהליך זה מבזבז אנרגיה רבה, מצריך תשתיות מורכבות, והינו יקר. לכן, לרוב אין אחסון של גז טבעי בכמויות משמעותיות ולזמן ארוך כאשר ניתן להוליך את הגז בצינורות אל הצרכנים (השימוש באונייה המגזזת יקר ומבזבז הרבה אנרגיה), וקצב הפקת הגז הטבעי מהבארות שווה לקצב צריכת הגז הטבעי. אם אין הפקה של גז-לא ניתן להשתמש בו בייצור חשמל, בתעשייה או בבתיים. בשגרה בד"כ אין בעיות עם מערכת זו.

אבל, במשך העשור האחרון, הושבתה 5 פעמים הזרמת הגז לישראל באופן מלא או משמעותי (50%), עקב אירועי לחימה ותקלות. השבתות אלו גרמו להכרזת מצב חירום במשק האנרגיה, שימוש בגז טבעי חלופי מאוניית ה-LNG (Liquid Natural Gas) בחדרה (כאשר זו סיפקה גיבוי למשק הגז הישראלי), חלק מצרכני הגז נאלצו לעבור להשתמש בסולר ואף תוגבר השימוש בפחם בתחנות הכוח. ב-2017 כאשר גז סיפק רק 54% מהדלקים לייצור חשמל ¹⁸⁷, העלויות למשק נאמדו בכ-115 מיליון ₪ לשבוע בשל עלויות הדלקים הגבוהות יותר, ועוד כ-40 מיליון ₪ עלויות חיצוניות עקב הזיהום הגבוה יותר משימוש מוגבר בסולר ובפחם ^{188 189 190}. ככל שנתח הגז יגדל בייצור החשמל (כיום עומד כאמור על 70%) ובכלל בסקטור האנרגיה, עלויות אלו גדלות באופן משמעותי.

מכיוון שכבר היום 70% מהחשמל בישראל מופק מגז טבעי (בעתיד אפילו 70% מכל האנרגיה בישראל, כולל תחבורה ותעשייה), במקרים בהם רוב או כל אסדות, צינורות ו/או טרמינלי הכניסה של הגז לישראל יפגעו, רשת החשמל תיפגע באופן קריטי. הגדלת מספר מאגרי ואסדות הגז הפעילים בישראל אפילו פי 2, תסייע בהעלאת החוסן האנרגטי **הבסיסי**

¹⁸³ <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/>

¹⁸⁴ <https://davidson.weizmann.ac.il/online/sciencenews/%D7%90%D7%99%D7%A8%D7%95%D7%A4%D7%94-%D7%A2%D7%95%D7%91%D7%A8%D7%AA-%D7%9C%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%A0%D7%A7%D7%99>

¹⁸⁵ <https://markets.businessinsider.com/news/currencies/russia-economy-charts-ukraine-war-oil-trade-europe-sanctions-energy-2023-4?op=1>

¹⁸⁶ <https://foreignpolicy.com/2023/01/19/russia-ukraine-economy-europe-energy/>

¹⁸⁷ https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/doch_2017

¹⁸⁸ https://www.gov.il/he/departments/general/ng_emergency

¹⁸⁹ <https://www.themarket.com/dynamo/.premium-1.10609189>

¹⁹⁰ <https://www.themarket.com/dynamo/1.7206806>

שמקורו באספקת הגז אך ורק למקרים של תקלות או תקיפות פיזיות מוגבלות בהיקפן (כמו אלו שביצעו החמאס והחיזבאללה בשני העשורים הקודמים), היא לא תסייע למקרים של התקפות נרחבות על תשתיות האנרגיה הישראליות או אף במקרה של רעידות אדמה או צונאמי עוצמתיים. **לכן, כיום אין פתרון שיקנה חוסן אנרגטי מתקדם בפני פגיעה מקיפה באספקת הגז הטבעי לישראל.**

4.3.2 אנרגיות מתחדשות מודרניות

4.3.2.1 שונות טבעית נורמלית בקצב ייצור אנרגיות מתחדשות מודרניות

מתקני אנרגיה מתחדשת מודרניים, כגון שמש ורוח, מפיקים חשמל עם שונות רבה בכושר הייצור כתלות באספקת האנרגיה שלהם אשר מוכתבת ע"י מאפייני האטמוספירה, שבתורה תלויה במזג האוויר, האקלים, השעה ביום, עונות השנה, גובה מעל פני הים ואף בדיהום אוויר. חיבור מתקני אנרגיה מתחדשת מודרנית בהספקים גדולים לרשת חשמל קובנציונאלית יהפכו אותה ללא יציבה ויפגעו בתפקודה (יחד עם זאת, מדינות שונות מראות יציבות של רשת החשמל גם עם 70% חשמל מתחדש מודרני וללא אגירה משמעותית). כמו כן, רשת חשמל קובנציונאלית תוכננה ונבנתה להוליך חשמל בכיוון אחד- מאתרי ייצור מועטים בעומס גבוה, למיליוני צרכנים עם עומס נמוך.

רשת החשמל הקובנציונאלית לא תוכננה עבור ייצור אנרגיה מבוזר בקרב מאות אלפי ואף מיליוני צרכנים-יצרנים קטנים. רבים מחלקי הרשת הסמוכים לצרכנים הקטנים לא מסוגלים לעמוד בהיקף העומס שגורם ייצור חשמל פוטו-וולטאי למשל בשיא הייצור בצהריים למשל. מלבד חוסר התאמה של הרשת הנוכחית לשילוב ייצור חשמל מבוזר בהיקף גדול כיום, שילוב מאפיין חדש יחסית זה מאתגר את פיתוח הרשת העתידית^{191 192 193}.

יחד עם זאת, כיום כבר בשלו טכנולוגיות של אגירת אנרגיה, אשר מסוגלות לווסת את הזרמת החשמל לרשת החשמל, למנוע עומס ברשת, למנוע מחסור של חשמל כאשר הצריכה גבוהה, מסוגלות לאגור חשמל שמיוצר בצהריים במתקני PV ולשחרר אותו לרשת בערב או בלילה, ואף לספק אגירה לטווח ארוך: יומי, שבועי ואף עונתי.

מחיר של קילו-ואט-שעה (קוט"ש) שמיוצר ב-PV ומאוחסן בסוללות ליתיום זול יותר ממחיר קוט"ש שמיוצר בתחנת כוח גזית רגילה (שמופעלת בשגרה), וזול הרבה יותר ממחיר קוט"ש של תחנת כוח גזית פיקרית (שמופעלת באופן מוגבל כאשר יש דרישה גבוהה לחשמל ברשת). בשל המחקר והפיתוח (מו"פ) הרב בתחום בעשור האחרון, כמעט כל חודש אנו מתבשרים על טכנולוגיית אגירה חדשה שמבשילה או על שיפור משמעותי בטכנולוגיה קיימת. מציאות זו

¹⁹¹ <https://nap.nationalacademies.org/read/24836>

¹⁹²

https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

¹⁹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392#bib30>

מבטיחה המשך הוזלה ושיפור של טכנולוגיות לאגירת אנרגיה באופן שמקל על שילובן ברשת (ראו 2.2.2). לכן, מבחינת בשלות טכנולוגית והתכנות כלכלית, יש לסיכון זה פתרון כבר כיום.

למען האמת, מערכות החשמל שהוכיחו עצמן בשטח עם החוסן האנרגטי הכי טוב אל מול אתגרים קיצוניים כמו הוריקנים, סופות קפואות ותקיפות פיזיות- הן מערכות של PV ואגירה (ראו 6.4 ו-6.5). ישנם חוקרים שאף חוזים כי אפקט הטכנולוגיות המשבשות יביא להמשך הירידה המתמיד במחירי אנרגיות מתחדשות, כך שבעתיד הלא רחוק יהיה משתלם להקים מתקני אנרגיות מתחדשות בהיקפים גבוהים פי כמה וכמה מההיקף הנדרש לייצור חשמל מספק במשך רוב השנה, באופן שיאפשר לייצר מספיק חשמל גם בתקופות שפל של יצור חשמל (למשל, חשמל סולארי בחורף) אפילו בלי אגירה עונתית¹⁹⁴. או במילים אחרות, אם בשנה מדינה צורכת 10 TWh של חשמל, ישתלם להקים מתקני אנרגיה מתחדשת בהיקף שיספק 50 TWh בשנה.

4.3.2.2 פגיעה משמעותית בהיקף קרינת השמש

עבור ישראל, חשמל סולארי הוא מקור האנרגיה המתחדשת הכמעט בלעדית עליה ניתן להסתמך במסגרת הטכנולוגיות הבשלות כיום. לכן, אירועים נדירים של חורף געשי (ראו 3.1.6) או חורף גרעיני (ראו 3.2.1.4), שגורמים לצמצום משמעותי בקרינת השמש אשר מגיעה לפני כדור הארץ, צפויים לפגוע בייצור חשמל סולארי באופן ניכר. הסיכון לאירועים אלו הוא קטן מאוד.

כאמור, ההסתברות לחורף געשי היא אחת לכ-100 שנה, ובמקרים קשים יכולה להגרם צניחה של 30-50% בקרינת השמש שמגיעה לאזורים מסוימים בפני כדור הארץ. לחורף גרעיני קשה להעריך הסתברות מכיוון שמעולם לא קרה אירוע שכזה. עם זאת, כיום ההסתברות לחורף גרעיני גבוהה מאשר בעבר, עקב המצאות אלפי ראשי נפץ גרעיניים בשלל מדינות, ועקב המתיחות הגיאופוליטית בין נאט"ו, רוסיה וסין שמחזיקות ביניהן את רוב ראשי הנפץ הגרעיניים בעולם.

כיום אין מדינה שערוכה להתמודד עם ירידה שכזו בקרינת השמש, שצפויה גם להחריב את החקלאות ולפגוע בחי ובצומח (ובמקרה של חורף גרעיני, תתווסף גם הצרה של קרינה רדיואקטיבית). אולם ניתן להתמודד עם סיכון שכזה באמצעות השארת גיבוי אנרגטי של דלקי מאובנים לשעת חירום (מאגרי גז ותחנות כוח לחירום בלבד), או להקים מערך PV גדול פי כמה וכמה לעומת הצורך היום-יומי.

יהיה משתלם לנפח את מערך ה-PV אל מעבר להיקפי השימוש הדרושים כיום כאשר מחיר הטכנולוגיה יצנח לערכים מתאימים, כפי שחוקרים מסוימים חוזים שיקרה בטווח הבינוני (10-5 שנים), בשל דינמיקת טכנולוגיות משבשות (ראו

¹⁹⁴ <https://www.rethinkx.com/energy-reports>

4.3.2.1). אופציה נוספת לגיבוי היא בטווח הבינוני לפתח טכנולוגיות בנות קיימה חסינות כמו אנרגיית רוח בגובה רב ו/או בים, אנרגיית גלים, ואנרגיה גיאותרמית.

4.4 סיכון הנובע ממספר קטן של חלקים קריטיים במערכת

כפי שמפורט בחלק 2.1, רשת חשמל ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים מכילה מספר קטן (כמה מאות בלבד) של חלקים קריטיים במקטעי אספקת הדלקים, ייצור החשמל, תחנות המיתוג, מקטע ההולכה ותחנות המשנה. השבתה של כל אחד מחלקים קריטיים אלו פוגעת באופן מהותי ברשת החשמל. הרשת מתוכננת ונבנית עם יתירות מסוימת, אשר מאפשרת לה להתמודד עם השבתה של מספר קטן מהחלקים הקריטיים הללו- למשל השבתה של אסדת גז, של מספר תחנות כוח בינוניות, של קו הולכה על-עליון או קו הולכה עליון.

למרות שמדובר בכמה מאות חלקים קריטיים, מכיוון שהרשת בנויה ממקטעים עוקבים עם תפקידים שונים (מקטע אספקת דלק, מקטע ייצור חשמל, מקטע הולכה...), השבתה נרחבת של מקטע אחד תשבית את כל הרשת, גם אם שאר המקטעים תקינים. למקטע תחנות המשנה הכי הרבה חלקים קריטיים- 209, ולכן הוא יחסית הכי פחות פגיע מבין החלקים הקריטיים ברשת החשמל הריכוזית. אך גם הוא פגיע מאוד (ראו 3.2.1.1).

אבל, מקטעים אחרים פגיעים הרבה יותר: במקטע אספקת הגז הטבעי 3 אסדות בלבד, 2-3 צינורות הולכה, 5 טרמינלים יבשתיים לקליטת גז מהים; במקטע אספקת הפחם 2 נמלי פחם בלבד, 2 תחנות כוח פחמיות בלבד אשר מספקות 20-40% מצריכת החשמל בישראל; במקטע הייצור 14 אתרים של תחנות כוח; 11 תחנות מיתוג, 1-5 קווי הולכה במתח עליון או על-עליון שמוליכים חשמל לחלקי הארץ השונים. לכן, עשרות אחוזים מרשת החשמל ואף רשת החשמל כולה עשויים להפסיק לפעול מהשבתה של 2-15 אתרים בלבד (ראו איור 4).

אמנם, ייצור חשמל באמצעות גז טבעי ניתן לגבות במידה מסוימת באמצעות סולר ופחם, אבל נזכיר כי מערכות אלו חסרות חוסן אנרגטי **מתקדם**, בדומה לגז. כמו כן, יקר יותר להשתמש בדלקים אלו, הם מזהמים יותר, ובעתיד עם צמצום השימוש בהם בישראל ובעולם, אספקתם צפויה להפוך להיות מורכבת ויקרה יותר.

ביזור מרחבי של אתרים קריטיים אלו מסייע לצמצם את הסיכון מאירועים טבעיים, מתקלות, ומתקיפות מוגבלות (חמאס, סוריה, עימות מוגבל עם החיזבאללה). הקמת אמצעי הגנה מתקיפות (אבטחה, ביטון, טילים נגד טילים, ספינות טילים...) מסייעות לצמצם סיכון מתקיפות **מוגבלות** (אם כי כבר נפגע מיכל דלק גדול של תש"ן בעימות עם החמאס). אולם, צונאמי חזק בים התיכון (אירוע נדיר מאוד) עשוי להשבית את רוב או כל תחנות הכוח החופיות ואולי אף לפגוע בתשתית הגז הימיות ו/או החופיות. מתקפה נרחבת על ישראל, כמו שעשויה להתרחש בעימות עם איראן או עם החיזבאללה (תסריט סביר בהחלט), צפויה לפגוע בתשתיות קריטיות אלו באופן נרחב למרות אמצעי ההגנה. זאת מכיוון שאין כיום אמצעי הגנה שמספקים 100% הגנה, טילים נגד טילים הינם יקרים מאוד, ובידי איראן

והחיצובאללה כמויות עצומות של אמצעים מדויקים לתקיפה שניתן לשגר בו זמנית- באופן שיכריע את ההגנות הישראליות (ראו 3.2.1.2). יתכן ואף תתבצענה תקיפות אוויריות, ימיות או יבשתיות לאתרים לא מוגנים כלל כמו צינורות תת-ימיים, צינורות יבשתיים, רשת ההולכה, תחנות משנה, בארות הגז הטבעי התת-ימיות (ראו 3.2.1.3).

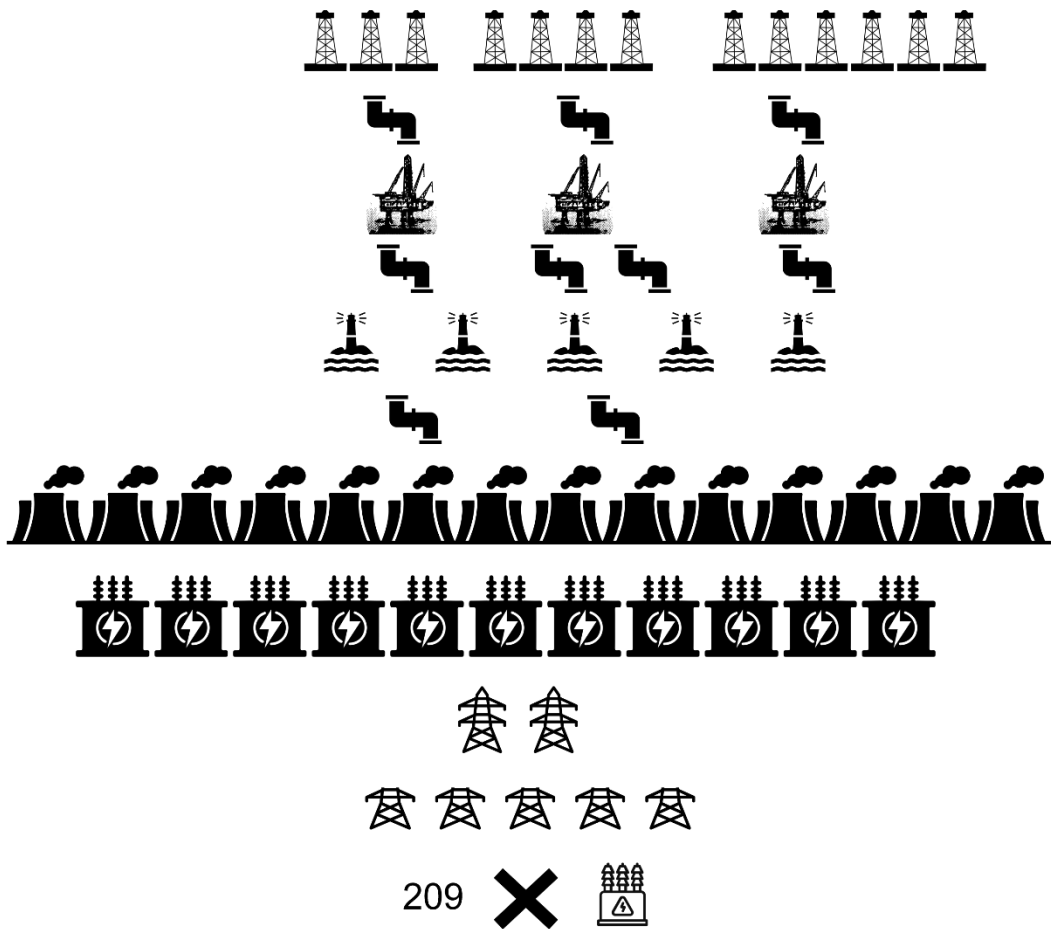
לעומת זאת, רשת חשמל מבוזרת מבוססת PV ואגירה, מורכבת ממאות אלפי ואף מיליוני יחידות ייצור ואגירה, מספרים שגדולים ב-3-6 סדרי גודל מאשר מספר החלקים הקריטיים בכל מקטע ברשת ריכוזית. לכן, אין חלקים קריטיים אשר השבתה שלהם מביאה לפגיעה באחוזים ניכרים מהרשת. פגיעה בחלקי הרשת תביא לפגיעה באספקת חשמל אך ורק לשברירי אחוזים מהרשת ולא תשפיע על שאר הרשת. כמובן, שכיום אין מדינות שלמות עם רשת מבוזרת, אבל ככל שהביזור נרחב יותר, כך חלקים נרחבים יותר ברשת הופכים חסינים (ראו איור 5).

אם נתרגם את הנתונים הללו להבדל כמותי בין רשת ריכוזית ורשת מבוזרת, ניתן להגיד כי בישראל **הסיכון לרשת ריכוזית הנובע ממספר חלקים קריטיים במערכת, גדול פי 1,000-1,000,000 מאשר ברשת מבוזרת**¹⁹⁵. כפי שביזור מיגון פיזי לרמת הדירה והבניין העלה באופן חסר תקדים ברמה עולמית את החוסן הביטחוני של תושבי ישראל מפני התקפות אוויר (ראו 6.1), ביזור רשת החשמל לרמת הדירה והבניין הופך את התושבים לחסינים אנרגטית.

¹⁹⁵ מספר חלקים קריטיים במערכת: רשת ריכוזית- 3-209; רשת מבוזרת- 3,000,000-300,000.

$300,000/209 \approx 1,000$, $3,000,000/3 \approx 1,000,000$

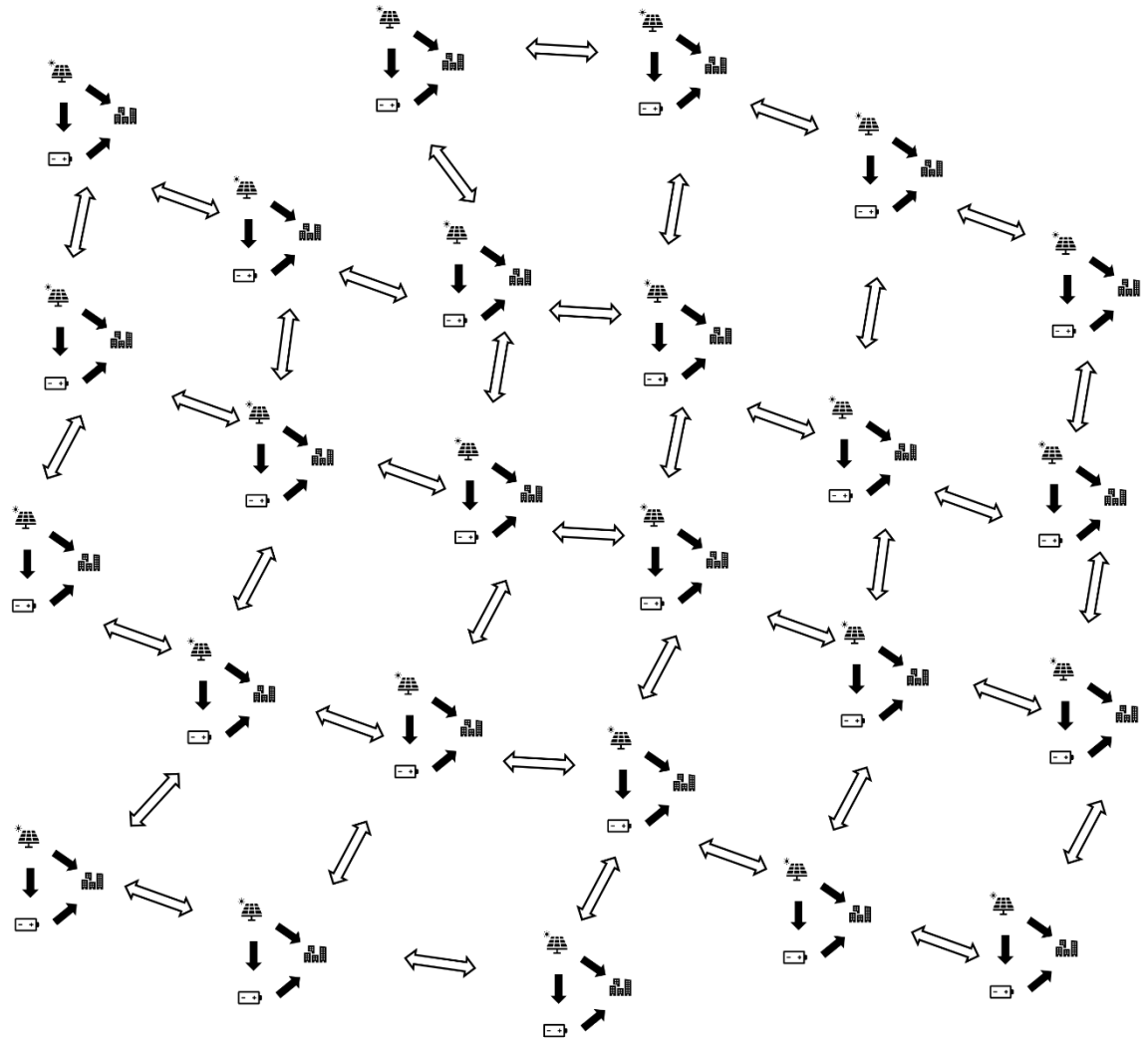
רשת ריכוזית



איור 4: המחשה של המספר הקטן של חלקים קריטיים ברשת החשמל הריכוזית הישראלית. באיור ייצוג סכמתי של כל החלקים העיקריים ברשת החשמל הריכוזית הישראלית שמבוססת על גז טבעי בין מאגרי הגז ותחנות המשנה, ומספרם בפועל: 13 בארות גז טבעי (ב-3 שדות גז), 3 צינורות תת-ימיים, 3 אסדות גז בים, 3 צינורות תת-ימיים (אחד מהם בפול), 5 טרמינלי גז בחוף, 2 צינורות גז יבשתיים (יש צינור ימי מקביל לחוף בין דור לאשקלון שיכול לשמש לגיבוי מסוים של הקווים היבשתיים), 14 תחנות כוח (חלקן עדיין פחמיות), 11 תחנות מיתוג, עד 2 קווי מתח על-עליון, עד 5 קווי מתח עליון, 209 תחנות משנה. החץ בצד ימין ממחיש את כיוונית זרימת החשמל.¹⁹⁶

¹⁹⁶ All images are from <https://www.veryicon.com>, <https://openclipart.org>, and Office.

רשת מבוזרת



איור 5: ייצוג סכמתי של חלק קטן ברשת מבוזרת תיאורטית. כל 'משולש' עם חצים שחורים מייצג מיקרוגריד מבוסס מערכת PV, מערכת אגירה ומבנה/ים (איור מוגדל של 'המשולש' באיור 3). המיקרוגרידים יכולים להיות מחוברים ביניהם, ויכולים לספק חשמל לכאלו שחווים מחסור בחשמל. רשת מבוזרת יכולה להכיל מאות אלפי ואפילו מיליוני 'משולשים' שכאלו. בכל מקרה, פגיעה בכל תת יחידה לא משפיעה על הרשת.

4.4.1 פוקוס: השבת נמל הפחם בתחנת הכוח רוטנברג במרץ 2023

במרץ 2023 קרס עגורן להעמסת פחם על מזח פריקת הפחם של חברת החשמל בנמל הפחם של תחנת הכוח רוטנברג באשקלון (ראו 2.1.1.3.3), במהלך סופה עם רוחות חזקות. קריסת העגורן הביאה לקריעת 40 מטר מהמזח וממסוע הפחם שעליו, לפגיעה בעגורן השני שעל המזח, ולהוצאת נמל הפחם מכלל שימוש לחצי שנה עד שנה. המשמעות היא כי עד שיתוקן המזח, לא ניתן יהיה לפרוק פחם מספינות בתחנת רוטנברג, וכי מאגר הפחם בתחנה יספיק למספר שבועות בלבד של פעילות מתונה באביב^{197 198}.

תחנת הכוח רוטנברג מסוגלת לספק עד כ-20% מצריכת החשמל בישראל. בשביל לפתור את בעיית אספקת הפחם עד אשר יתוקן המזח, עלו מספר פתרונות אפשריים, אולם כולם מורכבים, יקרים, חלקם לא ריאליים ליישום, וכולם צפויים להעלות את מחיר החשמל. פתרון אחד הוא הובלת פחם מנמל הפחם בחדרה במשאיות-אולם לשם הפעלה מלאה של תחנת הכוח רוטנברג בשיא צריכת החשמל בקיץ יהיה צורך בעד 10,000 טון פחם ליממה, שצריך להיות משונע בעד 286 משאיות. לא בטוח שקיימות מספיק משאיות מתאימות ופנויות לפרויקט שכזה, שגם יגרום לתוספת עומסי תנועה וזיהום אוויר¹⁹⁹.

פתרון אחר הוא האצת הסבת יחידות יצור פחמיות לגז טבעי, אולם מהלך זה לא יושלם לפני סוף 2024, ויש חשש להתחיל בו לפני סיום מוצלח של הסבת יחידת יצור שמתבצע כיום. פתרון נוסף הוא עגינת ספינה שמשמשת כתחנת כוח גזית ניידת בסמוך לחופי ישראל²⁰⁰. מה שבטוח הוא שפינוי שברי העגורן והמזח בלבד, יעלו למשלם המיסים כמעט 50 מיליון ש"ח (לפחות, נכון לאפריל 2023) והמדינה כבר מתכננת לפתוח במסע הסברה לצמצום השימוש בחשמל בקיץ, כחלק מההתמודדות עם הפגיעה הקשה בכושר ייצור החשמל בישראל²⁰¹.

מקרה זה ממחיש באופן כואב ויקר את היעדר החוסן האנרגטי ושבריריותה של רשת החשמל הריכוזית הנוכחית.

4.4.2 פוקוס: תלות 70-80% משוק האנרגיה הישראלי בגז טבעי

אספקת הגז הטבעי הישראלית היא מקרה מיוחד של סיכון מוגבר הנובע ממספק קטן מאוד של חלקים קריטיים ברשת חשמל ריכוזית. היא נשענת על עד 5 רכיבים קריטיים בכל אחת מחוליות אספקת הגז (שדות גז, אסדות, צינורות תת-ימיים, טרמינלי קליטת גז יבשתיים, צינורות הולכה יבשתיים). כבר כיום, כ-70% מכל החשמל בישראל מיוצר מגז טבעי. בנוסף, עשרות מפעלים ומתקנים אחרים בישראל מקבלים את כל או רוב האנרגיה שלהם מרשת הגז הטבעי.

¹⁹⁷ <https://www.themarker.com/dynamo/2023-03-26/ty-article/.premium/00000187-1993-d7c4-ab8f-fdb7d2540000>

¹⁹⁸ <https://www.themarker.com/dynamo/2023-03-15/ty-article/.premium/00000186-e413-d8aa-a996-f7bb4b690000>

¹⁹⁹ <https://www.themarker.com/dynamo/2023-04-10/ty-article/.premium/00000187-6ad9-d484-edef-eadd2c1c0000>

²⁰⁰ <https://www.themarker.com/dynamo/2023-03-26/ty-article/.premium/00000187-1993-d7c4-ab8f-fdb7d2540000>

²⁰¹ <https://www.themarker.com/markets/2023-04-16/ty-article/00000187-8ac4-dc6c-a5ff-efd57c0d0000>

תקלות משמעותיות במערכת הגז הטבעי עשויות להשבית את כל המערך, או חלקים נרחבים ממנו. עוד בתקופה בה פעל מאגר הגז הקטן מארי (2004-2013) B, סבל המאגר משלל תקלות אשר השביתו את פעילותו. כאשר תקלות אלו התרחשו במקביל להפסקת הזרמת הגז הטבעי ממצרים, המשק הישראלי עבר למתכונת חירום ושימוש מוגבר בפחם, בסולר ובמזוט במפעלים ובתחנות כוח^{202 203 204}. התקלה המשמעותית ביותר בו, הביאה אף לסגירתו. בשל הפקת גז מואצת לקראת התרוקנותו של המאגר, שהתרחשה בשל הפגיעה באספקת הגז ממצרים, הביאה לקריסת המאגר ולהשבתתו. קריסת המאגר אף מנעה את הפיכתו למאגר חירום לאכסון גז טבעי, כפי שתכנן משרד האנרגיה לקדם לאחר התרוקנות המאגר²⁰⁵.

בספטמבר 2017, בעת עבודות תחזוקה התרחשה תקלה שגרמה לסדק בצינור הגז מתמר, שגרם להשבתת אספקת הגז הטבעי מהאסדה למשך כשבוע^{206 207}. באפריל 2019, עקב עבודות תחזוקה מתוכננות, הוכרז מצב חירום במשק הגז, אספקת הגז מהאסדה ירדה ב-50%²⁰⁸. בחצי השנה לאחר הפעלת אסדת הגז לווייתן בסוף 2019, הושבתה הפעילות באסדה שוב ושוב עקב 30 תקלות²⁰⁹. רק העובדה שלישראל 2 אסדות ו-2 צינורות גז מנעו שיבוש באספקת הגז לישראל.

בשני העשורים הקרובים, ישראל צפויה להסב את רוב רובם של כלי התחבורה שלה משימוש בדלקים נוזליים לשימוש בחשמל (רכבות, רכבים פרטיים, אוטובוסים, משאיות), כך שצפוי כי 70-80% מכל משק האנרגיה הישראלי ישען על גז טבעי. **המשמעות היא שתוך 10-20 שנה, כל סקטור האנרגיה הישראלי, עשוי לקרוס כליל מכ-5 פגיעות מדויקות בלבד של טילים, כטב"מים, סירות וכדומה. מצב זה הוא בלתי נסבל. מחקר של המכון למחקרי בטחון לאומי בישראל, (INSS- The Institute for National Security Studies) מצא כי המצאות כל מקור אספקת הגז הטבעי של ישראל, כולל אסדות הגז, בים- מגדיל מאוד את הסיכון לתשתית אנרגיה קריטית זו²¹⁰.**

פגיעה קשה באסדת גז טבעי בים בישראל תביא להשבתת האסדה לחודשים ארוכים לפחות ואפילו לשנה, ויתכן אפילו שיהיה צורך להחליף את האסדה לחלוטין- תהליך שייקח שנה-שנתיים עד אשר תבנה אסדה חדשה ותוצב בישראל. אבטחת מתקני אנרגיה קריטיים בים קשה, מסובכת ויקרה הרבה יותר לעומת אבטחת מתקנים אלו ביבשה²¹¹. לדוגמה, היה צורך להסב את מערכת כיפת ברזל לפעילות על גבי ספינות בים, לשם שיפור יכולת ההגנה על אסדות

²⁰² <https://finance.walla.co.il/item/1800857>

²⁰³ <https://www.tashtiot.co.il/2011/08/01/%D7%99%D7%9D-%D7%AA%D7%98%D7%99%D7%A1/>

²⁰⁴ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1000703899>

²⁰⁵ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001047662>

²⁰⁶ <https://www.themarket.com/dynamo/1.7206806>

²⁰⁷ <https://www.themarket.com/dynamo/premium-1.10609189>

²⁰⁸ <https://www.themarket.com/dynamo/1.7139319>

²⁰⁹ <https://news.walla.co.il/item/3365845>

²¹⁰ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

²¹¹ <https://din-online.info/pdf/hms1.pdf>

גז בים. עלות הפיתוח של כיפת ברזל היבשתית הייתה מספר מיליארדי ש"ח עד שנת 2015²¹² ועלות מערכת כיפת ברזל יבשתית הוא 100 מיליון דולר. הסבת כיפת ברזל יבשתית לימית, ארכה 8 שנים לפחות, סביר שעלתה מאות מיליוני דולרים, וסביר כי עלות מערכת ימית גבוהה מעלת מערכת יבשתית (100 מיליון דולר)^{213 214 215}.

בנוסף, חיל הים הצטייד ב-4 ספינות טילים חדישות מדגם סער-6, לטענתו ע"מ להגן על אסדות הגז הטבעי. לא מדובר רק על רכש של ספינות חדשות- מדובר בספינות הטילים הגדולות ביותר שהופעלו אי פעם בישראל, כאשר סה"כ מדובר על עלות של כמעט 2 מיליארד ש"ח ברכישת הספינות, תחזוקה בהיקף 260 מיליון ש"ח בשנה, הוספת כ-400 חיילים וקצינים לאיוש הספינות ועוד כמה מאות לתמיכה^{216 217 218}.

לשם השוואה, תקציב תחזוקה שנתי נוסף זה מהווה כרבע מהתקציב השנתי של חיל הים בין 2008-2012 והיקף כוח האדם שיתווסף לחיל הוא 10% לפחות²¹⁹, ועפ"י מנכ"ל משרד הביטחון לשעבר לחיל הים אין תקציב להחזיק סדר כוחות נוסף שכזה²²⁰. לכן, לצורך הקמת כוח זה נדרשות תוספות תקציב קבועות עצומות לתקציב הביטחון של ישראל ותוספות כוח אדם ניכרות לחיל הים. אולם, גם כל המשאבים הללו לא מסוגלים להבטיח חוסן אנרגטי לישראל. לו משאבים אלו היו מושקעים בפיתוח רשת חשמל מבוזרת, היה ניתן להפוך חלקים משמעותיים מרשת החשמל הישראלית לחסינה.

הכפלה של מספר אסדות הגז הישראלית תסייע בהתמודדות עם השבתה **מקומית** של שדה גז, אסדה, צינור או טרמינל קליטת גז (תקלה מקומית, התקפה מקומית מוגבלת). אולם, היא לא תסייע במצב של פגיעה אסטרטגית נרחבת בסקטור הגז (רעידת אדמה קשה, צונאמי, מלחמה כוללת עם איראן ו/או חיזבאללה). בנוסף, הגדלת מספר האסדות תחייב הגדלת התקציב, האמצעים וכוח האדם להגנתם. כל הסיכונים הללו וההוצאות הללו אינם רלוונטיים במקרה של רשת חשמל מבוזרת.

לאור ההתפתחויות יוצאות הדופן בגזרת רוסיה בשנים האחרונות, אשר כוללות סחיטות גיאופוליטיות של אירופה באמצעות שליטה באספקת דלקי המאובנים שלה, 4 חבלות מכוונות בצינורות הגז התת-ימיים נורדסטרים 1+2 (כרגע הסבירות הגדולה ביותר היא שרוסיה ביצעה חבלות אלו²²¹), תקיפות מכוונות להשמדת רשת החשמל האוקראינית, בידודה המדיני של רוסיה, מצוקתה הכלכלית והפוליטית של רוסיה, תמיכתה באויבות ישראל (איראן, סוריה)

²¹² <https://din-online.info/pdf/mr461.pdf>

²¹³ <https://www.calcalist.co.il/internet/articles/0,7340,L-3749715,00.html>

²¹⁴ <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/02/rafaels-c-dome-completes-1st-interceptions-from-israeli-navys-saar-6-corvettes/>

²¹⁵ <https://www.israeldefense.co.il/node/53706>

²¹⁶ <https://www.themarker.com/news/politics/1.7284966>

²¹⁷ <https://news.walla.co.il/item/3396958>

²¹⁸ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4655939,00.html>

²¹⁹ <https://www.themarker.com/law/1.487457>

²²⁰ <https://www.themarker.com/allnews/.premium-1.7256189>

²²¹ <https://www.theguardian.com/world/2023/apr/28/russian-navy-vessel-seen-near-nord-stream-pipelines-days-before-blasts>

הסתמכותה על יבוא נשק איראני לטובת מלחמתה באוקראינה (ראו 6.3)- לא ניתן כיום לשלול תוקפנות רוסית כנגד יעדים אסטרטגיים ישראליים כגון תשתית הגז הטבעי, או לכל הפחות סיוע והעברת ידע לאיראן ליישם יכולות שכאלו.

4.5 סיכון הנובע מגודל תשתית חשמל אחת

כאמור, ברשת חשמל ריכוזית יש מספר קטן של יחידות אשר מייצרות, צורכות, מוליכות או ממירות חשמל בהספקים גדולים מאוד (מאות ואף אלפי MW). מלבד הבעיה של מספר קטן של חלקים קריטיים ברשת, בעיה נוספת ברשת שכזו היא שהשבתת פעילות פתאומית של יחידה שעובדת בהספק גדול (או אפילו החזרה פתאומית של יחידה שכזו לפעולה), פוגעת ביציבות הרשת, שלפתע לא יכולה לספק חשמל בהיקף הנדרש לצרכנים, או לשמור על תדר או מתח מתאימים. חוסר יציבות זה עשוי להביא לפגיעה בחלקים אחרים ברשת ולגרום לנזק רחב היקף. כאשר נוצרת תקלה בהיקף גדול, בד"כ יש הכרח להשבית מיידיית חלקים נרחבים ברשת, ע"מ למנוע פגיעה ברכיבים קריטיים אחרים.

דוגמה עדכנית לכך היא קריסת רשת החשמל בארגנטינה כולה ב-2019, תוך מילישניות מרגע שיציבות המערכת נפגעה. בקריסה זו, הושפעו 48 מיליון איש מארגנטינה, פרגוואי, אורוגוואי, ברזיל וצ'ילה שרשתות החשמל שלהן מחוברות לזו של ארגנטינה ^{222 223}.

אבל לא צריך ללכת רחוק. בליל ה-29 באוקטובר 2020, שותקה אספקת החשמל לכשליש מתושבי המדינה, למשך עד 40 דקות. גורמי ביטחון קראו שלא לשלול כי הסיבה לתקלה הנרחבת היא מתקפת סייבר, ובאינטרנט לקחו לכך אחריות האקרים איראניים. בחברת החשמל שללו זאת מכל וכל, וטענו בתוקף שמדובר בתקלה בה קרס ייצור החשמל ב-3 תחנות כוח בשל "השלת עומס" ²²⁴. או במילים אחרות, הפסקת אספקת חשמל מ-3 תחנות כוח בלבד הביאה לניתוק מידי של שלישי מצרכני החשמל במדינה בשביל למנוע פגיעה קשה ברשת החשמל, במתקני חשמל ובמוצרי חשמל רבים עקב חוסר התאמה קיצוני בין הצריכה והייצור. גם חיבור מחדש של 3 תחנות כוח גדולות מצריך החזרה הדרגתית של היקף הייצור ושל היקף הצריכה (כמה תרכנים מחוברים לרשת), גם בשביל למנוע פגיעות דומות. אם מדובר בתקלה או במתקפת סייבר, השורה התחתונה נשארת זהה- אירוע זה ממחיש עד כמה רשת החשמל הישראלית הריכוזית פגיעה, ועד כמה אירוע אחד פשוט, ופגיעה ב-3 תחנות כוח בלבד, משבית שלישי מהמשק.

ברשת חשמל מבוזרת מבוססת PV ואגירה, רוב רכיבי המערכת קטנים, והשבתה או החזרה לפעילות של אחד מהם (או אפילו מאות מהם) לא פוגעת ביציבות הרשת ואינה מהווה בעיה. כמו כן, במידה ורכיב קריטי גדול מושבת באופן פתאומי בחלק הריכוזי של הרשת, מיקרוגרידים יכולים לבודד עצמם מהפגיעה ברשת הריכוזית ולהמשיך לתפקד.

²²² https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Cyber_Challenges_to_the_Energy_Transition_WEC_MMC_2019.pdf

²²³ <https://www.cybersecurity-insiders.com/south-america-power-outage-could-have-been-caused-by-a-cyber-attack/>

²²⁴ https://www.mako.co.il/news-israel/2020_q4/Article-43b9b1ef5587571027.htm

אם נתרגם את הנתונים הללו להבדל כמותי בין רשת ריכוזית ורשת מבוזרת, ניתן להגיד כי בישראל הסיכון לרשת ריכוזית הנובע מגודל תשתית חשמל במערכת, גדול פי 10-200,000 מאשר ברשת מבוזרת (תלוי בגודל התשתיות שמשויים) ²²⁵.

גודל, מחיר ומורכבות תשתית חשמל אחת משפיעים גם על משך הזמן שלוקח לתקן תקלות. תיקון תקלות במתקנים קטנים, להם יש חלקי חילוף בשפע, כמו ברשת מבוזרת- יכול לארוך מספר שעות בלבד או עד מספר שבועות במידה וצריך להביא חלק מחו"ל. לעומת זאת, כאשר יש חלק או תשתית חשמל ריכוזי ללא תחליף זמין, כדוגמת אסדת גז טבעי או צינור תת-ימי- זמן החלפת או תיקון תקלה יכול לארוך הרבה יותר זמן. במקרה של הרס מוחלט של אסדת גז טבעי (תרחיש אפשרי בהחלט), ייקח שנתיים להזמין אסדה חדשה, לבנות אותה ולהשיט אותה לישראל ^{226 227}. במקרה שכזה, יש אפשרות שהחברה המפעילה את מאגר הגז כלל לא תטרח להחליף את האסדה הפגועה. לכן, הסיכון לרשת ריכוזית עקב הזמן שלוקח לתקן תקלות ברשת, גדול פי 1-30,000 מאשר ברשת מבוזרת ²²⁸.

4.6 סיכון כלכלי

שימוש בגז טבעי המופק באופן מקומי, בהחלט הגן על ישראל מפני עליית מחירים דרמטית בסקטור החשמל והגז הטבעי במהלך משבר האנרגיה של 2021-2023. אולם, הוא לא הספיק להגן עלינו לגמרי, עקב עליית מחירי הפחם המיובא, והמדינה החליטה לבטל כמעט לחלוטין את מס הבלו על הפחם ע"מ לצמצם את עליית מחירי החשמל. פעולה זו גרעה כמיליארד ש"ח מקופת המדינה ועשויה לעודד שימוש בפחם מזהם ^{229 230 231 232}.

למרות יציבות מסוימת זו, אופיו השברירי של משק הגז הישראלי אל מול המציאות הישראלית הביטחונית, עשוי להביא לפגיעה אנושה במשק זה, אשר תכריח את ישראל לשוב ולהסתמך על יבוא גז ו/או הגברת יבוא תזקי נפט ופחם כתחלופה. במצב שכזה, ישראל עשויה לשלם מחיר כבד מאוד על היבוא, בנוסף למחיר הכבד של הפגיעה במשק הגז המקומי והעלויות החיצוניות של חזרה לשימוש בדלקים מזהמים יותר. משבר האנרגיה של 2021-2023 הביא לקפיצות

²²⁵ גודל תשתית חשמל במערכת: רשת ריכוזית- 2,000-200 MW; רשת מבוזרת- 0.01-20 MW.

$2,000/0.01 = 200,000$, $200/20 = 10$

²²⁶ [Foundation of rig for Leviathan gas field arrives in Israel | The Times of Israel](https://www.calcalist.co.il/local_news/article/b1gb9fhio)

²²⁷ [FPSO vessel for the bp-operated Greater Tortue Ahmeyim project successfully sets sail for project site | News and insights | Home](https://www.calcalist.co.il/local_news/article/rjgfelawi)

²²⁸ זמן תיקון תקלות: רשת ריכוזית- שעות עד שנתיים; רשת מבוזרת- שעות עד שבועיים. שעות\שעות = 1; שנתיים = 122,640 שעות, 122,640 שעות\ 4 שעות = 30,000.

²²⁹ <https://www.gov.il/he/departments/news/sa230123-3>

²³⁰ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/b1gb9fhio

²³¹ https://www.calcalist.co.il/local_news/article/rjgfelawi

²³² <https://www.sp-interface.com/2023-ng-4th-round>

בכל מחירי דלקי המאובנים בעולם, ברמות אשר לא רק פגעו בכלכלות של מדינות רבות, אלא אף השפיעו על יציבותן.^{238 237 236 235 234 233} (ראו 6.3.3).

לפני משבר האנרגיה הנוכחי, מחירי הגז הטבעי והפקת החשמל ממנו נשארו קבועים פחות או יותר ברוב העשור הקודם. יהיו כלכלנים אשר יצביעו על נתון זה כעל הוכחה שדלקי מאובנים מספקים יציבות כלכלית, אולם אלו נתונים מטעים. הם מצביעים על סטגנציה בתחום- אין מקום לשיפורים בסקטור באופן שיוזיל את המחירים. לחילופין, יש שיאמרו שהעדר תחרות אמיתית בשוק הגז מדכאת את הורדת מחירים. לעומת זאת, נזכיר כי בתחום האנרגיות המתחדשות והאגירה לא רק שהמחירים יורדים באופן אקספוננציאלי וכבר זולים יותר מאשר מחירי דלקי מאובנים, אלא מחיריהם ממשיכים לרדת וצפויים להמשיך כך עם הבשלת טכנולוגיות נוספות בתחום²³⁹.

יותר מכך, הרכבו של מחיר החשמל בישראל מכתוב כי אפילו הוזלה של 50% במחירי דלקי המאובנים להפקת חשמל לעומת מחירים ב-2018 (שכמובן היו זולים יותר מאשר היום), יוכלו להוזיל את מחיר החשמל בעד 7 אגורות בלבד לקוט"ש. לעומת זאת, אנרגיה פוטו-וולטאית בשילוב אגירה עשויה להוזיל את מחיר החשמל ברשת ב-20-15 אגורות ואף יותר לקוט"ש, וכמובן שמאפשרות לכל עסק ואדם לייצר אנרגיה, לאגור אותה ולמכור אותה. אדם או עסק אשר מקים מערכת פוטו-וולטאית ואגירה מבוצרת כיום, יכול לייצר חשמל באופן יציב עם מחיר נמוך וקבוע למשך עשרות שנים, לעומת אדם או עסק אשר מחוברים לרשת ריכוזית ותלויים בחסדיה²⁴⁰.

יותר ויותר מחקרים ומקרים מהעולם מצביעים על כך כי תשתיות גז טבעי הופכות 'לנכסים תקועים' (stranded assets), נכסים אשר לא ניתן להרוויח עוד באמצעותם או שלא ניתן להחזיר את ההשקעה הכלכלית שהושקעה בהם. זאת בשל העלויות הגבוהות שלהם וההצטמקות הצפויה של שוק הגז העולמי והישראלי. מכיוון שישראל משקיעה ומסבסדת את סקטור הגז בעשרות מיליארדי ש"ח לפחות בעשור האחרון, גם היא נמצאת בסיכון כלכלי עקב כך, וזה אפילו אם אין פגיעה בתשתית קריטית^{241 242}.

²³³ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5506827,00.html>

²³⁴ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001370886>

²³⁵ https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&type=217&free_text=%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA%20%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C

²³⁶ <https://euobserver.com/green-economy/153218>

²³⁷ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

²³⁸ <https://www.sp-interface.com/2023-ng-4th-round>

²³⁹ <https://www.sp-interface.com/2023-ng-4th-round>

²⁴⁰ <https://www.sp-interface.com/2023-ng-4th-round>

²⁴¹ <https://www.sp-interface.com/2021-ng-economy>

²⁴² <https://www.sp-interface.com/2023-ng-4th-round>

4.6.1 נזק למתקן אחד כתוצאה מפגיעה אחת

רשתות מבוזרות בנויות באופן מודולרי מחלקים קטנים וזולים יחסית, אשר פרושים על פני שטח גדול יחסית, לעומת רשתות ריכוזיות. לכן, השבתה או פגיעה בנקודה אחת ברשת מבוזרת תגרום לנזק כלכלי קטן יותר לתשתית, לעומת מקרה דומה ברשת ריכוזית. אסדת גז טבעי בים (FPSO) היא הרכיב הכי יקר הייחודי לרשת ריכוזית, אשר פגיעה או תקלה אחת עשויה להוציא אותו מכלל שימוש. אסדת לווייתן היא הגדולה מסוגה בעולם, ועלותה כ-2 מיליארד דולר. לעומת זאת, הרכיב הכי יקר הייחודי לרשת מבוזרת הוא מודול של סוללות לאגירת אנרגיה מסוג ליתיום-יון. מודול שכזה בד"כ מגיע במכולה וגודלו כ-1MW. מתקן אגירת אנרגיה בהספק של 20MW (קיבולת 100 MWh), עולה 40 מיליון דולר, ובו 100 מכולות של 1MWh. פגיעה אחת בו יכולה להרוס 100-4 מכולות, או נזק כלכלי בשווי 1.6-40 מיליון דולר (נזק מקסימלי אם כל המתקן נשרף למשל). שדה PV בהספק של 20MW, מתפרש על פני 230 דונם ושווי 16 מיליון דולר. לפי פגיעות אמיתיות בשדה סולארי באוקראינה עקב מתקפה רוסית, נהרסו בפגיעה אחת ~50 פאנלים. נניח כי כ"א מייצר 400 watt, אז סה"כ מדובר על הרס של 20kW בפגיעה אחת, או אלפית מהספק השדה. לכן שווי הנזק הוא 16,000 דולר. כך, **הסיכון מנזק כלכלי עקב פגיעה אחת ברשת ריכוזית הוא פי 50-125,000 יותר לעומת רשת מבוזרת מבוססת PV ואגירה**²⁴³.

4.6.2 מודל כלכלי לחישוב עלות הפרעה באספקת החשמל

כפי שהראנו בעבודה זו, ובעיקר ב-4.3 וב-4.4, השבתה של מספר קטן מאוד של תשתיות אנרגיה קריטיות בישראל בו זמנית, עשויה לגרום לפגיעה קריטית באספקת החשמל והאנרגיה למשק הישראלי. עוד כעשור, כ-70% מסקטור האנרגיה הישראלי (חשמל, תחבורה, תעשייה) יהיה תלוי לחלוטין בגז טבעי ישראלי. בהנחה ובעת זו יהיו 5 אסדות גז טבעי, השבתה בו-זמנית שלהן תביא לקריסת שוק האנרגיה הישראלי. גם השבתת רשת החשמל ו/או האנרגיה ב-5 נקודות קריטיות אחרות (טרמינלי קליטת גז טבעי בחוף, קווי הולכת חשמל על-עליון, תחנות מיתוג-ראו 2.1) תביא לנזק דומה. פגיעה בתשתית קריטית אחת עשויה להביא לירידה של 30% באספקת החשמל בישראל ב-2035.

בישראל היו ב-2021, 2,766,000 משקי בית²⁴⁴ ו-653,000 עסקים²⁴⁵. כמו כן, מדדי איכות אספקת החשמל במדינה הם CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) של 140 דקות\שנה בממוצע²⁴⁶, ו-SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) של 3.7 בממוצע²⁴⁷. מודל (Interruption Cost) ICE

²⁴³ שווי אסדת גז 2 מיליארד דולר \ שווי מתקן אגירה 40 מיליון דולר = 50

שווי אסדת גז 2 מיליארד דולר \ שווי 50 פאנלים סולאריים בשדה סולארי 16,000 דולר = 125,000

²⁴⁴ <https://www.cbs.gov.il/he/publications/Pages/2022/%D7%9E%D7%A9%D7%A7%D7%99-%D7%91%D7%99%D7%AA-%D7%95%D7%9E%D7%A9%D7%A4%D7%97%D7%95%D7%AA-%D7%AA%D7%9B%D7%95%D7%A0%D7%95%D7%AA-%D7%93%D7%9E%D7%95%D7%92%D7%A8%D7%A4%D7%99%D7%95%D7%AA-2021-%D7%A2%D7%9C-%D7%A4%D7%99-%D7%A1%D7%A7%D7%A8-%D7%9B%D7%95%D7%97-%D7%90%D7%93%D7%9D.aspx>

²⁴⁵ <https://www.cbs.gov.il/he/publications/Pages/2022/%D7%A2%D7%A1%D7%A7%D7%99%D7%9D-%D7%A9%D7%A0%D7%AA%D7%95%D7%9F-%D7%A1%D7%98%D7%98%D7%99%D7%A1%D7%98%D7%99-%D7%9C%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-2022-%D7%9E%D7%A1%D7%A4%D7%A8-73.aspx>

²⁴⁶ https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

²⁴⁷ <https://www.runi.ac.il/media/cusliqec/mikrogrid0israel.pdf>

(Estimate) האמריקאי ²⁴⁸, מחשב נזק כלכלי במדינות ארה"ב לפי מזדי איכות אספקת החשמל ומאפייני המדינות. לישראל מאפייני גודל, אוכלוסייה וכלכלה דומים למדינות דרום קרולינה וניו-ג'רזי, או על הספקטרום שביניהן ²⁴⁹ ²⁵⁰ ²⁵¹. עפ"י מודל ICE, במדינות אלו הנזק הכלכלי שווה ל~\$32 (נתוני דרום קרולינה) או \$53 (נתוני ניו-ג'רזי) USD_{2016} לכל kWh שלא סופק.

בהנחה וניתן להשוות את ישראל למודל ICE במדינות אלו, במידה ו-10% מלקוחות רשת החשמל הישראלית (277,000 משקי בית ו-65,300 עסקים) מנותקים מהרשת ליום אחד (בישראל צורכים ביום 0.19 TWh) ²⁵², הנזק הכלכלי עשוי להיות \$6.15 ועד \$10.07 מיליארד USD_{2016} . הנזק הכלכלי מניתוק 30% מלקוחות רשת החשמל הישראלית לחודש ימים, עשוי להיות למעלה מ-\$553 מיליארד USD_{2016} . רוב הנזק הכלכלי מקורו בפגיעה באספקת החשמל בעסקים, ומיעוטו בפגיעה באספקת חשמל בדירות.

לעומת זאת, ניקח גודל מקסימלי של 20MW מערכת PV ברשת מבוזרת, אשר מייצרת ~100MWh של חשמל בממוצע ביום או ~3,000MWh בחודש ²⁵³, ומספקת חשמל ל-1 עד 3,400 לקוחות ²⁵⁴ ²⁵⁵. השבתה של מערכת שכזו ליום אחד תביא לנזק כלכלי מקסימלי מאי אספקת חשמל של \$3.2 ועד \$5.3 מיליון דולר, והשבתה שלה לחודש תביא לנזק של \$100 ועד \$160 מיליון דולר. אלו סכומים נמוכים פי 2,000. כפי שצוין כבר בעבודה- קל, מהיר וזול יותר לתקן תקלות ברשת מבוזרת; וכן גודל כל תשתית הוא קטן וניתן לספק את כל החשמל החסר ממערכות אחרות שלא נפגעו. לכן, ניתן לצמצם את משך הזמן בו לא מסופק חשמל ללקוחות מחודש או אפילו יום- לשעות, דקות ואפילו למצב בו אין פגיעה באספקת החשמל. זאת, באמצעות אספקה ממתקני יצור אחרים או ממתקני אגירת אנרגיה. במצב כזה, אין פגיעה כלכלית למעט הנזק למתקן האנרגיה.

הפגיעה הכלכלית של מניעת אספקת חשמל ברשת ריכוזית הם אסטרונומיים, אבל הם עשויים להיות גדולים בהרבה. כפי שהראנו, 5 פגיעות קריטיות בלבד עשויות לשתק כליל את כלל המשק הישראלי לא ליום או לחודש, אלא לחודשים ואף למעלה מכך. המספרים הללו לא כוללים את העלויות החיצוניות הנובעות מקריסה ברמת החיים ובהיקף השירותים שהמדינה מספקת לתושביה יום-יום (בריאות, תחבורה, ביטחון, מים, ביוב, חינוך...).

מספר הלקוחות המנותקים מחשמל עקב 5 פגיעות קריטיות ברשת ריכוזית יכול להיות 3 מיליון, במידה וכל הרשת נופלת עקב השבתה בו זמנית של כל אסדות הגז, או טרמינלי הקליטה של הגז בחוף, או תחנות מיתוג. ברשת מבוזרת,

²⁴⁸ <https://icecalculator.com/interruption-cost>

²⁴⁹ <https://www.statista.com/statistics/183497/population-in-the-federal-states-of-the-us/>

²⁵⁰ <https://www.statista.com/statistics/248053/us-real-gross-domestic-product-gdp-by-state/>

²⁵¹ <https://www.worldatlas.com/geography/us-states-by-size.html>

²⁵² https://www.gov.il/BlobFolder/reports/doch_meshek_hachashmal_2021/he/Files_Hadashot_press_doch_2021_n.pdf

²⁵³ [Global Solar Atlas](https://www.global-solar-atlas.com/)

²⁵⁴ [np24 \(cbs.gov.il\)](http://np24.cbs.gov.il)

²⁵⁵ [What's in a Megawatt? | SEIA](https://www.seia.com/what-is-a-megawatt/)

5 פגיעות קריטיות יכולות לנתק 17,000-1 לקוחות מחשמל²⁵⁶. בשל הגיבוי הצולב ברשת מבוזרת והעובדה שלא מדובר בהיקף חשמל גדול, שניתן לספק אותו מחלקים אחרים ברשת, סביר כי לא ינתקו כלל לקוחות. כך, **הסיכון לניתוק לקוחות מחשמל עקב 5 פגיעות קריטיות בתשתית אנרגיה ברשת ריכוזית גדול פי 3,000,000-176**²⁵⁷ **מאשר ברשת מבוזרת מבוססת PV ואגירה.**

בנוסף, **הסיכון הכלכלי ממניעת חשמל ללקוחות עקב 1-5 פגיעות קריטיות בתשתית אנרגיה ברשת ריכוזית גדול פי 2,000-5,100,000**²⁵⁸ **מאשר ברשת מבוזרת מבוססת PV ואגירה, ואף יותר מכך.**

4.7 סיכון משני הנובע מפגיעה בחומרים מסוכנים בסקטור החשמל

מלבד סיכונים לסקטור החשמל עצמו, פגיעה בסקטור החשמל כרוכה בסיכון לגרימת נזקים היקפיים באזור שמסביב למתקן סקטור האנרגיה שנפגע. דוח מבקר המדינה מ-2016 קבע כי תשתיות הדלקים הלאומיות בישראל אינן מוכנות להתמודדות עם מצבי חירום כגון לחימה ורעידות אדמה, וכי פגיעה בהם עלולה לגרום לנזקים היקפיים חמורים לתושבים, לתשתיות אחרות ולסביבה.^{259 260 261 262}

דוח מבקר המדינה ממרץ 2022, אשר עסק בהיערכות לפגיעה במתקני חומרים מסוכנים בעת לחימה, מתייחס גם למתקנים המאחסנים דלק או גז טבעי כמתקני חומרים מסוכנים. בדוח מודגש כי פגיעה במתקנים אלו עשויה להביא לפגיעה בתשתיות חיוניות, הרס מבנים, שטחי מגורים, שטחי חקלאות, מקורות מים, פגיעה כלכלית, פגיעה ברציפות התפקודית במשק, פגיעה בצירי תנועה, זיהום אוויר, זיהום ים, זיהום מים, זיהום קרקע, פגיעה בפינוי אוכלוסייה²⁶³.

²⁵⁶ מתקן MW20 של PV, מייצר ~1,700 KWh/KW בשנה, או $1,700 * 20,000 = 34,000,000$ KWh. מספק חשמל ל~3,400 בתים, כאשר כ"א צורך בערך 10,000 KWh בשנה. אז 5 פגיעות קריטיות יכולות לשתק 5 מתקנים כאלו, או ~17,000 לקוחות. אבל, ברשת מבוזרת יש גם אגירה, ואם היא לא בדיוק באותו מקום וחיבור של מתקני ה-PV, אז אם היא בכל בית, אז הפגיעות הרבה פחות משמעותיות עד לא משפיעות בכלל. כמו כן, מכיוון שלא מדובר בהיקף גדול של אספקת חשמל למתקן, אז סביר שהלקוחות יוכלו לקבל חשמל חלופי ממקורות גיבוי אחרים. לכן נחשב כאילו מספר הלקוחות המינימלי שנתקו שווה לניתוק מתקן אחד.

[What's in a Megawatt? | SEIA](#)
[np24 \(cbs.gov.il\)](#)

²⁵⁷ מספר לקוחות מנותקים עקב 5 פגיעות קריטיות: מבוזרת- 17,000; ריכוזית- 3,000,000. $3,000,000 * 17,000 = 51,000,000$ פחות חמור מאשר חושב 2 פסקאות למעלה (ואפילו יכול להיות שלא יהיה נזק), או $320,000 - 530,000$ בלבד ליום. נניח 5 פגיעות ברשת מבוזרת = $(320,000 \text{ עד } 530,000) * 5 = 1,6 - 2.65$ מיליון דולר. בנוסף, אנו מניחים כי לאחר 5 פגיעות קריטיות ברשת החשמל הריכוזית, 90% מהלקוחות לא מקבלים חשמל לחודש לפחות = $6 - 10$ מיליארד דולר ליום $30 * 9 = 2.7 - 1.6$ טריליון דולר = $1.6 - 2.7$ טריליון דולר. = הנזק ממניעת חשמל מ-90% מהלקוחות למשך 30 ימים הוא $1.6 - 2.7$ טריליון דולר. $(320 \text{ עד } 530 \text{ אלף דולר}) =$ הסיכון הכלכלי ממניעת חשמל ברשת ריכוזית גדול פי 5.1 מיליון.

²⁵⁹ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4872966,00.html>

²⁶⁰ <https://www.mevaker.gov.il/he/publication/Articles/Pages/2016.11.01-67a.aspx?AspxAutoDetectCookieSupport=1>

²⁶¹ <https://www.mevaker.gov.il/he/Reports/Pages/552.aspx>

²⁶² https://www.mevaker.gov.il/he/Reports/Report_552/96919cc4-26d4-4e2c-9753-148d340a65fd/511-teshen.pdf

²⁶³ <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2022/2022.3/2022.3-107-IDF-Mesukanim.pdf>

לשם השוואה, הנדק הכלכלי מהפיצוץ בנמל בירות באוגוסט 2020, הגיע ל-4.5 מיליארד דולר. פגיעה במתקנים אלו עשויה להביא לפגיעה נרחבת בחיי אדם- 3.2 מיליון ישראלים מתגוררים באזורים בהם יש סיכון לשהייה בשטח פתוח ללא מגון בעת אירועי חומרים מסוכנים²⁶⁴.

הדוח מוסיף כי העורף הישראלי אינו ערוך להתמודד עם תרחישי איום אלו כיום. זאת אומרת, במקרה של פגיעה באתר חומר מסוכן בישראל, לא רק שיש סכנה מיידית מהפגיעה לחיי אדם ולפגיעה קשה בתשתיות אלו, אלא גם לא צפויה תגובה יעילה של כוחות ההצלה. לכן יש סיכוי גבוה שהאירוע לא יהיה מוכל באתר הפגיעה ויגרמו נזקים היקפיים רחבים ולאורך זמן. כתוצאה מכך, לא יהיה ניתן למנוע או לתקן במהירות פגיעות ברשת הריכוזית או בתשתיות אחרות, ומענה רפואי או בטחוני לא יתאפשר או לא יהיה יעיל.

למשל, דליפת שמן מאסדת גז בים אשר תזהם את הים, את החוף, את מתקני התפלת המים, את תחנות הכוח הסמוכות לים ונשענות על קירור באמצעות מי ים; פגיעה במיכל דלק או גז ביבשה אשר יגרום לפיצוץ ו/או שריפה שתתפשט למתקני חומ"ס או למבנים סמוכים²⁶⁵.

דוח אשר בחן היבטים ביטחוניים של הקמת מסוף ל-LNG בים מול חדרה, מציין את הפגיעות של מתקן שכזה לאיומים, ואת הסיכון הגדול לתשתיות ולתושבים באזור הכרוך בפגיעה במתקן שכזה. מלבד נזקים משריפה ופיצוץ ענק פוטנציאליים, נזק למתקן או ספינה שמאחסנים גז טבעי נזלי עשוי לשחרר ענן ענק של גז טבעי רעיל, דליק ונפיץ. במידה ומיכלית LNG בינונית מתפוצצת, היקף ההרס והחום יהיה שווה ערך לכ-60 פצצות גרעין כמו זו שהוטלה על הירושימה²⁶⁶. למרות השימוש בספינת ה-LNG המגזזת בחדרה לגיבוי צפוי להסתיים בתקופה הנוכחית (ראו

2.1.1.2.4), בישראל יש כאלו ששואפים להקים מתקן הנזלה של גז טבעי ל-LNG, אשר צפוי לסבול מאותו סיכון.

נציין, כי רוב רובם של מתקני אנרגיה מתחדשת, רשת חכמה ואגירת אנרגיה, אינם מוגדרים כחומרים מסוכנים, וכי פגיעה בהם לא תגרום לסיכון בסביבתם. יוצאות דופן הן סוללות ליתיום-יון אשר יכולות לבעור, אולם הן לא צפויות להתפוצץ בצורה מסיבית כמו שעלול לקרות במאגרי דלקים וגז טבעי. מתקני אגירת אנרגיה מסוג לחץ אוויר ואוויר נזלי עשויים להתפוצץ עקב פגיעה, אך הפיצוץ מוגבל בהיקפו. בסוללות אחרות (כגון אבץ-ברום, ברזל-אוויר, סוללות זרימה) ובטכנולוגיות אחרות לאגירת אנרגיה (כגון אגירה שאובה, אגירת מסה, לחץ אוויר, גלגלי תנופה, אוויר נזלי) אין סכנות שריפה כלל. סוללות ברום עשויות לגרום לזיהום ברום מקומי במקרה של דליפה, אך בניגוד לשריפה ולפיצוץ שיכולים לגרום לפגיעה במתקנים סמוכים ולכן להרחבה של האירוע, בדליפת ברום אין כזו סכנה.

4.8 סיכום כימות סיכונים בין רשת חשמל ריכוזית אל מול מבוזרת

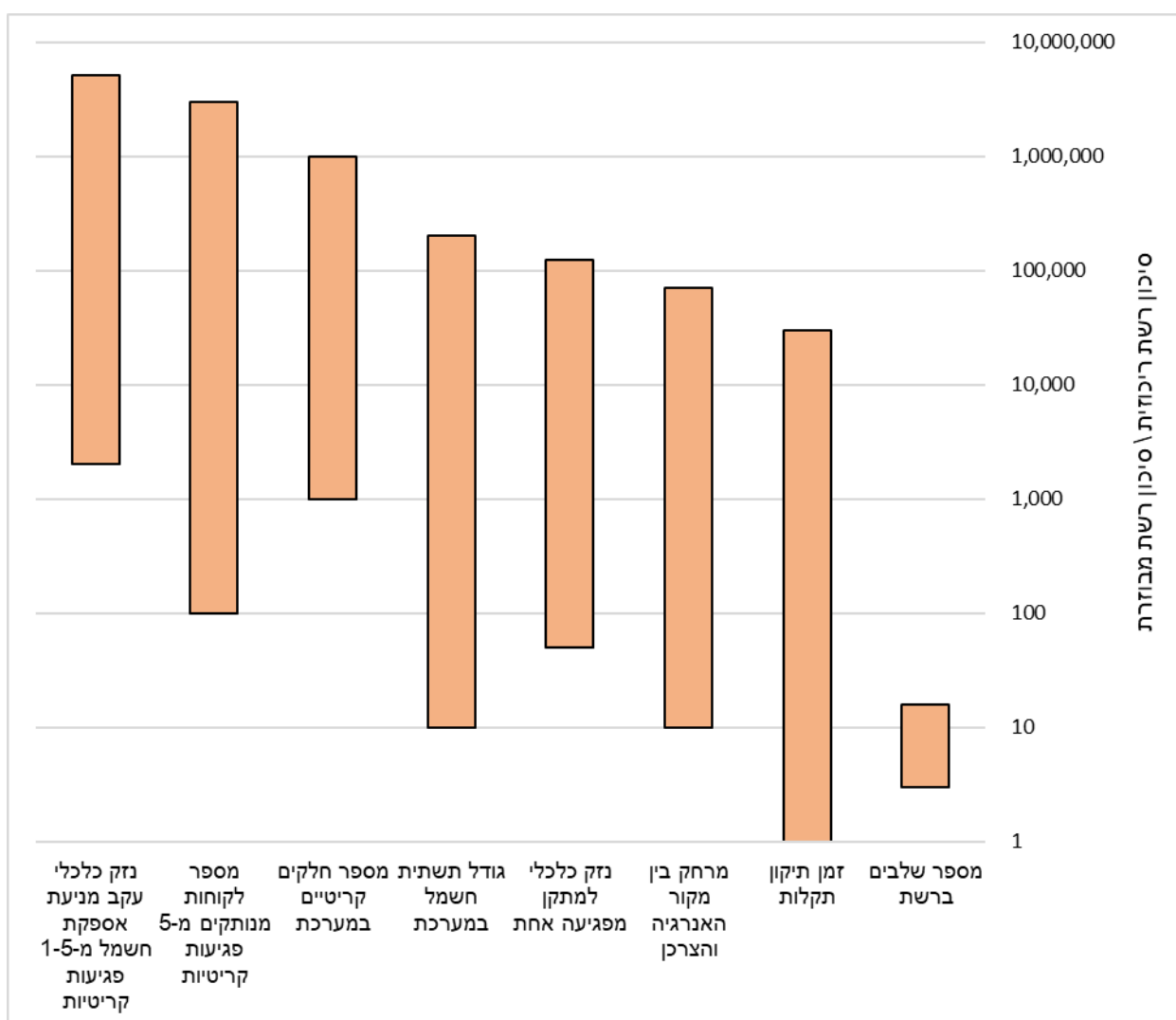
בתת פרק זה מרוכזים הנתונים הכמותיים לגבי הסיכון העודף ברשת ריכוזית אל מול רשת מבוזרת בשלל פרמטרים.

²⁶⁴ <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2022/2022.3/2022.3-107-IDF-Mesukanim.pdf>

²⁶⁵ <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2022/2022.3/2022.3-107-IDF-Mesukanim.pdf>

²⁶⁶ <https://zy1882.co.il/SystemFiles/21695.pdf>

רשתות חשמל ריכוזיות הן בעלות סיכון גבוה יותר לפגיעה בכל הפרמטרים שנבדקו, ובעלי יכולת התאוששות איטית ויקרה הרבה יותר לעומת רשתות מבוזרות. הסיכון לרשת ריכוזית עקב מספר השלבים בה גבוה פי 13-3 לפחות לעומת רשת מבוזרת (ראו איור 6). הסיכון לרשת ריכוזית עקב הזמן שלוקח לתקן תקלות ברשת, גדול פי 1-30,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית עקב המרחק בין מקור האנרגיה והצרכן, גדול פי 10-70,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית עקב נזק כלכלי למתקן מפגיעה אחת, גדול פי 50-125,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית הנובע מגודל תשתית חשמל במערכת, גדול פי 10-200,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון לרשת ריכוזית הנובע ממספר חלקים קריטיים במערכת, גדול פי 1,000-1,000,000 מאשר ברשת מבוזרת. הסיכון הכלכלי ממניעת אספקת חשמל ללקוחות ברשת ריכוזית גדול פי 2,000-5,100,000 מאשר ברשת מבוזרת.



איור 6: השוואת סיכונים בין רשת חשמל ריכוזית ומבוזרת. ציר Y- יחס הסיכון בין שני התרחישים בסקאלה לוגריתמית (סיכון ברשת ריכוזית/ סיכון ברשת מבוזרת). הפרמטרים: מספר שלבים עיקריים ברשת (ראו 4.2), זמן לתיקון תקלות (ראו 4.5), מרחק בין מקור האנרגיה והצרכן (ראו 4.2), נזק כלכלי למתקן מפגיעה אחת (ראו 4.6.1), גודל תשתית חשמל קריטית במערכת (ראו 4.5), מספר חלקים קריטיים במערכת (ראו 4.4), מספר לקוחות מנותקים מ-5 פגיעות קריטיות ברשת, נזק כלכלי עקב מניעת אספקת חשמל מ-1-5 פגיעות קריטיות ברשת (ראו 4.6.2).

5 מחקרים בנושא חוסן אנרגטי ברשתות חשמל

5.1.1 מדוע רשת ריכוזית אינה חסינה?

הסיכונים הגדולים לחוסן אנרגטי הנובעים ממבנה רשת חשמל ריכוזית הם מורכבות ופגיעות שרשרת האספקה של דלקי מאובנים; ייצור חשמל במספר מצומצם מאוד של אתרים; ייצור חשמל במתקנים גדולים, יקרים, ומורכבים; ייצור חשמל במרחק רב מאתרי צריכת האנרגיה מחייבים שימוש בקווי הולכה וחלוקה ארוכים ופגיעים; קיום מספר מצומצם של רכיבים קריטיים שחוסר תפקוד שלהם יכול לשתק עשרות אחוזים מהרשת או את כולה; הספק ייצור חשמל עצום ע"י כל יחידת ייצור חשמל גורם לעומס על הרשת בכל פעם שיחידת ייצור מתחילה או מפסיקה לעבוד; השפעות גיאופוליטיות.

רשת חשמל ריכוזית חייבת לפעול בהספקים גבוהים מאוד בשביל לוודא שכל הצרכנים יקבלו חשמל ללא הפרעות בכל זמן ובכל מקום. כמו כן, היא צריכה לייצר יותר חשמל מאשר נצרך ע"י הצרכנים, מכיוון שייצור החשמל רחוק מצריכתו, ויש לקחת בחשבון הפסדים של חשמל בהולכה לאורך עשרות ומאות ק"מ. בנוסף, הולכת חשמל לאורך עשרות ואף מאות ק"מ מהייצור וצריכה, מסבכים את המערכת, וגורמים לכך שפגיעה ברשת במרחק של עשרות ואף מאות ק"מ מהיצרן או מהצרכן עשויה להפיל את הרשת²⁶⁷.

מחקר של המכון למחקרי בטחון לאומי בישראל (INSS- The Institute for National Security Studies) מצא כי נכון ל-2016, לא הייתה בישראל הסדרה של ברורה של סוגיית ביטחון התשתיות הלאומיות הקריטיות, כי נדרשת בניה של אסטרטגיה כוללת לנושא זה בכלל ולנושא ביטחון תשתיות חשמל בפרט. המחקר קובע כי הסתמכות על גז טבעי כמקור אנרגיה עיקרי וכמעט יחיד של רשת החשמל (צינור ואסדת גז אחת ב-2016, שניים מכל סוג היום) היא בעיה קריטית²⁶⁸. ככל שלרשת יש יותר צמתים מרכזיים, שיותר חלקים תלויים בה, וקישוריות נמוכה יותר, היא פחות חסינה²⁶⁹.

5.1.2 מדוע רשת מבוזרת חסינה יותר?

רשת חשמל מבוססת אנרגיות מתחדשות מודרניות בלבד, כמובן שאינה מקנה חוסן אנרגטי לרשת. זאת, משום שאנרגיות מתחדשות מודרניות אינן פועלות בהספקים קבועים ונשלטים כמו תחנות כוח מבוססות דלקי מאובנים, גרעין וסכרים הידרואלקטריים. אלא, הן בעלות הספק ממוצע קבוע לפי האזור האקלימי בו הם נמצאים, אך מרגע לרגע הספק הייצור שלהן עשוי להשתנות בהתאם למזג-האוויר²⁷⁰.

²⁶⁷

https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

²⁶⁸ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

²⁶⁹ <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2013/135731/>

²⁷⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018303041?via%3Dihub#bib0178>

לכן, רשת חשמל מבוססת אנרגיות מתחדשות מודרניות חייבת לגבות עצמה באמצעות אגירת אנרגיה, להזרמה מיידית של חשמל ממתקני אגירת אנרגיה, כאשר היקף ייצור החשמל צונח מאנרגיות מתחדשות מודרניות; וכן לאגירת אנרגיה עודפת מיידית כאשר היקף ייצור החשמל מאנרגיות מתחדשות מודרניות עולה על היקף צריכת החשמל של הצרכנים.

מחקר מדיניות אמריקאי מ-2012 קבע כי רשת חשמל מבוזרת חסינה יותר מרשת חשמל ריכוזית. זאת, בשל יכולת ריפוי עצמית טובה יותר של רשת מבוזרת ובשל העובדה שתקלות ברשת מבוזרת משפיעות על אזורים קטנים יותר. במקרים של נזק נרחב לרשת (סופות הוריקן או טורנדו בארה"ב, אירועי לחימה בישראל, רעידות אדמה ומתקפות סייבר בשתייהן), היכולת של רשת מבוזרת לבדד אזורים פגועים מאזורים תקינים וכך לאפשר לאזורים תקינים להמשיך לתפקד, מקנים לה חוסן אנרגטי עדיף על רשת ריכוזית.²⁷¹

מחקר ה-INSS קובע שביזור אתרי ייצור החשמל יכול לשפר את שרידות המערכת ולחזק את ממד הביטחון של המערכת כולה; שרשת חשמל מבוזרת עושה שימוש יעיל במשאבי הרשת; שהיא יכולה לצמצם השפעה של אסון טבע או אירוע חירום על כדי הפיכתם לאירוע מקומי; שחיבור הרשת למתקני ייצור אנרגיה מתחדשת ואגירת אנרגיה יכול לשפר את שרידותה ולחזק את ממד הביטחון של המערכת כולה.²⁷²

מחקר ה-INSS ממליץ שיש לקדם רגולציה תומכת ייצור מבוזר, כדי לאפשר ייצור חשמל מקומי בעת אירוע אסון טבע או אירוע חירום גם בהעדר מתח רשת, שיש לקדם ייצור אנרגיה מתחדשת ואגירת אנרגיה ולהגדיל את המכסות עבורם, שיש לשנות את הרגולציה כך שמערכות קטנות לייצור חשמל מתחדש (למשל, מערכות סולאריות על גגות) יוכלו להמשיך לספק חשמל גם בהעדר מתח ברשת הראשית.²⁷³

מוטיב ברשת, הוא דפוס של קשר בין מספר יחידות ברשת, אשר ניתן ליחס לו השפעה על פעילות הרשת. דוגמה למוטיב פשוט הוא היזון חיובי (או שלילי) בין שני אתרים ברשת, או 'המשולש' (PV) שיכול לספק חשמל למבנה ולסוללה, כאשר הסוללה גם מסוגלת לספק חשמל למבנה) ברשת המבוזרת פאנל השמאלי באיור 3. מחקר בנושא מראה כי רשתות חשמל עם ריכוז מוטיבים גבוה יותר, חסינות יותר. רשתות חשמל מבוזרות, נוטות להיות עם יותר מוטיבים (ראו איור 4 ואיור 5).²⁷⁴

²⁷¹

https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

²⁷² <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

²⁷³ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

²⁷⁴ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1819529116>

מחקר בריטי-אוסטרלי²⁷⁵ הראה איך שילוב של מיקרוגרידים ברשת חשמל מספק אמינות קצרת טווח וגם חסינות ארוכת טווח מעבר לסכום פשוט של כל המיקרוגרידים יחדיו, ומראה אפקט סינרגיסטי של שילוב המיקרוגרידים ליצירת ערך גבוה מסך כל החלקים. המחקר בוחן מיקרוגרידים מבוססי גז טבעי (תחנות כוח קטנות של CHP-combined heat and power) ומיקרוגרידים מבוססי PV+ אגירה (סוללות ליתיום-יון), ומראה איך שני הסוגים תורמים לחסינות הרשת. אולם, המחקר מדגיש כי מיקרוגרידים מבוססי גז טבעי תורמים לחסינות כל עוד אספקת הגז תקינה. לכן, מיקרוגרידים שכאלו לא הופכים את כל הרשת לחסינה יותר, אלא רק את מקטע הייצור, ההולכה והחלוקה; כאשר מקטע אספקת הגז הטבעי אינו חסין כלל.

מחקרים נוספים מראים איך רשת מבוזרת מבוססת מתחדשות ואגירה מעלה את חסינות הרשת בפני שריפות ואף בעלות התכנות כלכלית טובה בהרבה לעומת מערכת ריכוזית²⁷⁶ ²⁷⁷. מחקר אחר²⁷⁸ מראה כי הסתמכות על סוללות ליתיום-יון במיקרוגרידים מאפשר חסינות גבוהה מאוד למשך ~5 שעות (מכיוון שזהו אמצעי אגירה לטווח קצר). לכן יש להשקיע באמצעים לאגירת אנרגיה לטווח בינוני וארוך לשם הבטחת חסינות גם לטווח זמן אלו.

רשת חשמל חכמה, מבוססת אנרגיות מתחדשות ואגירה, חסינה יותר מרשת חשמל ריכוזית, ב-3 המקטעים המרכזיים של רשת החשמל: מקטע הייצור (תחנות כוח), מקטע ההולכה והחלוקה (כבלי ועמודי חשמל), ומקטע הצריכה (לקוחות, צרכנים)²⁷⁹ ²⁸⁰ ²⁸¹.

חסינות במקטע הייצור: אמנם, מתקנים פוטו-וולטאיים פרושים על פני שטחים נרחבים על מנת לספק את אותו ההספק כמו תחנת כוח מבוססת דלקי מאובנים אחת, ולכן סטטיסטית קל יותר לפגוע במתקן פוטו-וולטאי, גם עם רקטות פחות מדויקות. אולם, גם אם מתקן אנרגיה מתחדשת נפגע, הפגיעה אינה בכל המתקן אלא בחלק קטן שלו, וזניחה מבחינת ההשפעה על היקף הייצור של המתקן, ובאופן מעשי לא תהיה השפעה כלל על היקף הייצור הארצי.

אם נבחן פגיעה טיפוסית של רקטה או טיל במתקן פוטו-וולטאי, ניתן להניח כי ברדיוס של כמה מטרים או עשרות מטרים (תלוי בעוצמת הפיצוץ), התאים הפוטו-וולטאים יחרסו כליל. ברדיוס של עשרות מטרים עד מאות מטרים בודדים

²⁷⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918312108>

²⁷⁶ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9675050>

²⁷⁷

<https://registroface.blob.core.windows.net/docs/ForoXM2022/Dia1/Power%20System%20Resilience%20Experiences%20and%20Applications%20from%20International%20Projects.pdf>

²⁷⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918312108>

²⁷⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392#bib30>

²⁸⁰

https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

²⁸¹ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

סביר כי הזכויות של הפאנלים הסולאריים תתנפצנה. אולם, גם אם הזכויות בתאים פוטו-וולטאים נשברת כתוצאה מפיצוץ, התאים ממשיכים לעבוד ולייצר חשמל ברמה סבירה ויכולים לעשות זאת עד אשר יתוקנו.

בנוסף, מתקני אנרגיות מתחדשות ואגירה (למעט אגירה שאובה) הינם מודולריים, ומורכבים מחלקים רבים, קטנים, פשוטים, זולים וזהים. לכן, לרוב יש מספר גבוה של חלקי חילוף בארץ בכל רגע נתון (ואם יש רצון, ניתן להחזיק מלאי של חלקי חילוף לחירום), וכן החלפתם או תיקונם הינו מהיר. כך, גם אם מתקן אנרגיה מתחדשת נפגע, הפגיעה לא תפגע בכל המתקן אלא בחלק קטן שלו, אשר ניתן יהיה להחליף או לתקן תוך שעות עד ימים²⁸².

גם אם הפגיעה במתקן פוגעת ברכיבים קריטיים כמו ממיר או חיבור המתקן לרשת והמתקן כולו משותק, מכיוון שכל מתקן הוא בהספק קטן יחסית, לא נגרמת פגיעה משמעותית בכושר הייצור הארצי, והיא כאמור יכולה להיות מתוקנת תוך שעות עד שבועות. לכן, השרידות של מערכת מבוצרת שכזו גבוהה מאוד. מתקני אגירה שאובה אמנם מורכבים ויקרים, אולם שרידותם גבוהה מכיוון שחלק ניכר מהמתקן שכולל את החלקים הרגישים והמורכבים שלו (טורבינות, פיר המים המחובר בין המאגר העליון והתחתון), נמצא בעומק האדמה²⁸³.

זאת, לעומת רשת חשמל ריכוזית, בה פגיעה ביחידת ייצור (טורבינה), בארובה, בממיר, בחיבור לרשת- מפילים ברגע בין מאות לאלפי MW הספק ייצור. בשל המורכבות, המספר הקטן והעלויות הגבוהות של רכיבים שבאלו- תיקון או החלפה שלהם עשוי לארוך שבועות, חודשים ואף מעבר לכן.

חסינות במקטע הצריכה: ברשת ריכוזית יש אבחנה ברורה בין מקטע הייצור ומקטע הצריכה. בצד אחד יש את תחנות הכוח, ובצד השני את צרכני החשמל (דירות, משרדים, מבנים, מפעלים). הם (לרוב) לא יכולים להיות אותה היישות, הייצור יכול להתרחש בדרום הארץ והצריכה יכולה להתבצע במרכז הארץ.

ברשת חשמל מבוצרת, יש טשטוש בין הייצור והצריכה, כאשר יצרן יכול לייצר לעצמו חלק מהצריכה שלו, כל הצריכה שלו או אפילו יותר מהיקף הצריכה שלו. צרכן אף יכול אגור חשמל- מהרשת או מייצור עצמי כאשר הייצור עודף או שמחיר החשמל נמוך, להשתמש בו או למכור אותו חזרה לרשת בזמנים אחרים כאשר יצור החשמל בחסר או שמחיר החשמל גבוה.

²⁸² <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

²⁸³ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

המשמעות היא שצרכנים יכולים להפוך תלויים פחות ברשת החשמל, לא תלויים בכלל ברשת החשמל, או אף יכולים לסייע לרשת החשמל. לכן, במצב של פגיעה ברשת החשמל, יצרכנים יכולים להמשיך ולהנות מאספקת חשמל, ואף יכולים להמשיך ולספק חשמל לאחרים.

חסינות במקטע ההולכה והחלוקה: פגיעה במקטע זה מונעת העברת חשמל ממקטע הייצור למקטע הצריכה. לא רק שפגיעה שכזו מנתקת את אספקת החשמל לצרכנים, היא גם עלולה לגרום לפגיעה בתשתית רשת החשמל במקטע הייצור וכן בצידוד חשמלי במקטע הצריכה. כאשר יש פגיעה במקטע ההולכה והחלוקה, ברשת מבוססת מתחדשות ואגירה, ניתן עדיין לספק חשמל לפחות לחלק מהצרכנים במקטע הצריכה. כמו כן, המצאות מתקני אגירת אנרגיה מסייעת לצמצום פגיעה בתשתיות חשמל ובצידוד חשמלי במקטע הצריכה.

כיום, פתרונות של רשת חשמל מבוססת לא רק אפשריים מבחינה טכנולוגית, אלא כבר זולים יותר בחלק מהטכנולוגיות (PV, רוח, אגירה בסוללות, אגירה שאובה) אל מול ייצור חשמל קונבנציונאלי (דלקי מאובנים, גרעין, הידרואלקטרי), הופך יותר ויותר משתלם כלכלית ככל שהטכנולוגיות מבשילות ומתפשטות, ומיושם בהצלחה בפועל בשלל מדינות ואזורים בעולם ^{284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294}.

מעבר מסיבי לרשת חשמל מבוססת מתחדשות מודרניות ואגירה יחסוך טריליוני דולרים כל שנה בכל העולם בעשורים הבאים (מתורגם למיליארדי דולרים בשנה עבור ישראל), לעומת המשך הרחבה ותחזוקה של רשת חשמל קונבנציונאלית. חסכון עצום זה אפילו אינו כולל את החסכון בעלויות החיצוניות של שימוש בחשמל שמופק מדלקי מאובנים, שגם הוא שווה טריליוני דולרים כל שנה וצפוי לגדול עם החמרת שינוי האקלים ^{295 296}.

החסכון נובע מחסכון בהתקנת רשתות הולכת חשמל למרחקים ארוכים, צמצום באבדן חשמל עקב הולכה למרחקים ארוכים, צמצום בדרישות החשמל ע"י הצרכנים (כי חלקם מייצרים ו/או אוגרים אנרגיה), שיטוח עקומות צריכת החשמל הודות לאגירה, השקעה ישירה של מיליוני צרכני חשמל בתשתית הרשת, בניה מודולרית של הרשת לפי הצורך ובאופן הדרגתי ללא קפיצות כפי שמתקיים ברשת קונבנציונאלית בשל ההכרח בהקמת תחנות כוח גדולות,

²⁸⁴ https://www.sp-interface.com/files/ugd/2c7e82_fe052e30a99e462dbea8f549e4315133.pdf

²⁸⁵ https://www.energy-storage.news/us-national-renewable-energy-lab-forecasts-rapid-cost-reduction-for-battery-storage-to-2030/?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

²⁸⁶ <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>

²⁸⁷ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/no-2021-01-empirically-grounded-technology-forecasts-and-the-energy-transition/>

²⁸⁸ <https://www.energy-storage.news/large-quantities-of-energy-storage-can-balance-the-us-grid-all-year-round-nrel-study-finds/>

²⁸⁹ <https://ieefa.org/wp-content/uploads/2018/02/Power-Industry-Transition-Here-and-Now-February-2018.pdf>

²⁹⁰ <https://nap.nationalacademies.org/read/24836>

²⁹¹

https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

²⁹² <https://www.gao.gov/assets/gao-21-105403.pdf>

²⁹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392#bib30>

²⁹⁴ <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f64/EEDG-Resilience.PDF>

²⁹⁵ https://www.sp-interface.com/files/ugd/2c7e82_fe052e30a99e462dbea8f549e4315133.pdf

²⁹⁶ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/no-2021-01-empirically-grounded-technology-forecasts-and-the-energy-transition/>

מחיר נמוך של טכנולוגיות רשת מבוצרת כבר היום עם צפי להוזלת עלויות נוספות עם הגידול בשימוש ופיתוח טכנולוגיות חדשות, רמת מחירים סטטית ואף מאמירה בייצור חשמל קובנציונאלי ^{297 298}.

ראיות לאמון שנותנים ברשתות חשמל מבוצרות מבוססות אנרגיה מתחדשת, אגירה ומיקרוגרید באמצעים לחוסן אנרגטי, הן כי כבר ב-2007 הוחלט כי ב-2025 לפחות 25% מכל החשמל שנצרך ע"י יחידות הצבא האמריקאי יהיה ממקור מתחדש, יש מספר רב של יחידות צבא אמריקאי שמייצרות אנרגיה מתחדשת בשטחן (החל מ-1987), וכן פרויקטים של הקמת מיקרוגריד בבסיסים. למשל, בבסיס חיל האוויר קירטלנד הוקם מיקרוגריד מבוסס זרם ישיר (DC-Direct Current), PV ואגירה בסוללות. לחשמל DC יתרונות ברשתות חשמל קטנות על פני זרם חלופי (AC-Alternative Current) אשר משמש ברשתות חשמל קובנציונליות גדולות ^{299 300}.

בארה"ב הותקנו עד 2019 4GW של מיקרוגרידים ³⁰¹. אלסקה והוואי הן שתי המדינות הכי פגיעות מבחינת אספקת החשמל- אלסקה עקב מזג אוויר קיצוני ונידחותה; והוואי עקב גודלה הקטן, המרחק הרב מהיבשת וניתוקה מכל רשת חשמל אחרת, והמחיר הגבוה של שינוע דלקי מאובנים אליהן. לכן, מדינות אלו מובילות את היקף השימוש במיקרוגרידים ובייצור אנרגיה מבוצר לנפש בארה"ב. מבחינת היקף ייצור מבוצר באמצעות אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה לנפש, הוואי וקליפורניה מובילות בארה"ב ³⁰². בקליפורניה, החל מ-2021 ולאור פגיעות רשת החשמל הריכוזית לשריפות, מחויבות ספקיות התקשורת הגדולות בתחום התקשורת הקוויים, לספק גיבוי חשמל באמצעות סוללות ל-72 שעות לפחות במקרי חירום ³⁰³. הממשל האמריקאי מכיר בחשיבות של מיקרוגרידים, אגירת אנרגיה ואנרגיה מתחדשת כחלק מאדפטציה לשינוי אקלים והתמודדות עם אירועי קיצון, ומקדם חקיקה ותקציבים לתחום זה ^{304 305 306 307 308}.

5.1.3 מה ממליצים המחקרים לעשות?

בארה"ב מתקיים תהליך כתיבת תקנים שיבטיחו חוסן של תשתיות לאומיות, ושל הקמת גוף שיסייע בהטמעת תקנים אלו. חוקרים ממליצים כי גם בישראל יבוצע מהלך דומה ³⁰⁹.

²⁹⁷ https://www.sp-interface.com/files/ugd/2c7e82_fe052e30a99e462dbea8f549e4315133.pdf

²⁹⁸ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/no-2021-01-empirically-grounded-technology-forecasts-and-the-energy-transition/>

²⁹⁹ https://acore.org/wp-content/uploads/2018/10/ACORE_Issue-Brief_-The-Role-of-Renewable-Energy-in-National-Security.pdf

³⁰⁰ <https://www.sandia.gov/labnews/2021/11/05/providing-resilient-power/>

³⁰¹ <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/Solar%20Futures%20Study.pdf>

³⁰² <https://nap.nationalacademies.org/read/24836/chapter/1>

³⁰³ <https://legacy.energy-storage.news/blogs/texas-winter-storm-highlights-the-importance-of-battery-storage-for-telecom>

³⁰⁴ <https://microgridknowledge.com/microgrids-climate-strategies/>

³⁰⁵ <https://microgridknowledge.com/bipartisan-senate-infrastructure-bill-microgrids/>

³⁰⁶ <https://www.vnf.com/biden-signs-largest-climate-and-resiliency-infrastructure-bill-in-us-history>

³⁰⁷ <https://cleantechica.com/2021/11/09/climate-resilience-in-the-infrastructure-bill-a-first-step-toward-hope/>

³⁰⁸ <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/08/09/fact-sheet-biden-administration-announces-nearly-5-billion-in-resilience-funding-to-help-communities-prepare-for-extreme-weather-and-climate-related-disasters/>

³⁰⁹ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

יש להחליף את גישת הדחיינות, ואת גישת ה"בתקופתנו זה לא יקרה" אשר שגורה במערכת הפוליטית בישראל וגם במדינות רבות אחרות בעולם. גישת החוסן האנרגטי הנוכחי של ישראל היא מוגבלת ביותר, ומסתמכת על משק אנרגיה ריכוזי ועל הגז הטבעי הישראלי כמקור האנרגיה העיקרי, כאקסיומות שאין עליהן עוררין. סביב אקסיומות אלו נבנית גישת חוסן משק אנרגיה פרימיטיבית, מבלי לבדוק טוב האם קיימות אלטרנטיבות טובות יותר. אמנם, הסתמכות על גז טבעי מקומי עדיפה מבחינת חוסן אנרגטי על יבוא בלעדי של דלקי מאובנים מחו"ל, אבל רק באופן מוגבל. ברשת חשמל ריכוזית משקיעים תקציבים עצומים בהגנה מסיבית על מתקני אנרגיה ריכוזיים. לא משנה כמה מסיבית תהיה ההגנה, לעולם היא לא תוכל למנוע ב-100% נזק או פגיעה. כאשר פגיעה שכזו תתרחש, הנזק יהיה נרחב, יקר ויקח זמן רב לתקן אותה ³¹⁰.

יש לתכנן את חוסן סקטור האנרגיה מתוך תפיסה כי בוודאות חלק מהמערכת תיפגע, אם זה מאסון טבע, תקלה או פגיעה מכוונת- ומשם להמשיך. רשת חשמל ריכוזית לא יכולה להתמודד עם פגיעה בחלק קריטי בה. לעומת זאת, רשת חשמל מבוזרת בה לא קיימות נקודות תורפה קריטיות, לא רק שתוכל להכיל פגיעה וודאית בחלק ממנה, היא גם תוכל לתקן נזקים אלו תוך זמן קצר ובעלות נמוכה. אין ספק כי גישה אסטרטגית של זיהוי וטיפול בנקודות תורפה בחוסן תשתיות לאומיות בכלל, ובחוסן רשת החשמל בפרט- תהיה משתלמת כלכלית, בריאותית ומשקית לאין ערוך לעומת גישת "רשת חשמל ריכוזית וגז טבעי כהכרח" ³¹¹.

המתווה אשר מספק את החוסן האנרגטי הגבוה ביותר, הוא המשך פיתוח רשת חשמל מבוזרת המבוססת בעיקר על עשרות אלפי מתקני אנרגיה מתחדשת פוטו-וולטאית, שילוב עשרות אלפי מתקני אגירת אנרגיה, רשת חשמל עם מיקרו-גריד אשר מסוגלות לפעול בצורה עצמאית מהרשת המרכזית. יש לשמור את היכולת של הפקת גז טבעי וכן את המרתו לחשמל בתחנות כוח, למקרי חירום ולמקרים בהם רשת החשמל לא עומדת בעומס. במידה והרשת תתוכנן בחכמה מבעוד מועד, יהיה ניתן לוותר לפחות על חלק מהתוכנית היקרה והמורכבת להכפלת היקף רשת ההולכה שמתוכננת בעשור הקרוב.

לאור שינוי האקלים המתעצם אשר גורם לעליה באירועי מזג-אוויר קיצוני, ולאור ההמלצות לעבור ולהסתמך על חשמל פוטו-וולטאי ברשת החשמל, מומלץ לחזק את יכולת חיזוי מזג-האוויר של חברת ניהול מערכת החשמל בישראל (נגה), בשביל שיהיה ניתן לתכנן את המערכת ואת הפעלתה בצורה מדויקת, יעילה ואמינה ³¹².

³¹⁰ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

³¹¹ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

³¹² <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

יש לבצע ניתוח סיכונים לקראת שינוי האקלים, כגון השפעת עליית מפלס הים התיכון על תחנות הכוח הסמוכות לו, וכן על הסיכון מאירועי קיצון לרשת החשמל. מומלץ לגבש מנגנון ביטוחי לאומי, כדוגמת הקרן לנזקי טבע (קנ"ט) המשמשת לפיצוי חקלאים עקב פגעי מזג האוויר, שיפצה ברמה לאומית מפני פגעי טבע כדוגמת אירועי קיצון כתוצאה משינוי אקלים או כדוגמת רעידת אדמה.

הקמת מיקרו-גרידס/גרידים- יש להאיץ הקמת רשתות חשמל מקומיות קטנות מודרניות ליישובים קטנים (קיבוצים, מושבים), גושי יישובים, בסיסי צבא, בתי חולים, אוניברסיטה, עיירה, מרכזים מסחריים, אזורי תעסוקה ותעשייה, משרדי רשויות. ניתן לספק חשמל למיקרוגריד באמצעות דלקי מאובנים- למשל ע"י תחנות כוח קטנות מונעות בגז טבעי או בסולר. למעשה מיקרוגרידים פשוטים כבר הוקמו לפני עשרות שנים בישראל, בבסיסי צבא, במפעלים ובקיבוצים. הם פועלים באמצעות גנרטורים או תחנות כוח שמספקות חלק או את כל אספקת החשמל בעת חירום.

מיקרוגריד פוסילי חסין יותר מאשר רשת חשמל ריכוזית, אך יקר ומזהם יותר לכל קוט"ש מיוצר. מיקרוגריד פוסילי פחות חסין ופחות כלכלי לעומת מיקרוגריד מבוסס פוטו-וולטאי ואגירה. זאת כי מיקרוגריד מבוסס מתחדשות ואגירה מורכב מעשרות מתקני PV ומספר יחידות לאגירת אנרגיה לעומת ממיקרוגריד פוסילי מבוסס תחנת כוח **אחת** קטנה. כמו כן, מיקרוגריד פוסילי עדיין תלוי באספקת דלקי מאובנים, דורש תחזוקה מורכבת, ותחנת הכוח בו מונעת תוך 2 דקות לפחות; זאת לעומת חוסר תלות באספקת אנרגיה חיצונית, תחזוקה מינימלית ותגובה מיידיית (פחות משניה) של מיקרוגריד מבוסס אגירת חשמל ומתחדשות.

המודולריות של מתקנים פוטו-וולטאיים ואגירה מאפשרת הקמת מיקרוגריד בכל גודל שהוא (בית, בניין, שכונה, עיר, מדינה) וכן שינוי הגודל בהתאם לצמיחה עתידית או לשינויים בהיקף הצריכה ודפוסי השימוש; זאת בניגוד למיקרוגריד מבוסס דלקי מאובנים שהינו גמיש הרבה פחות ^{313 314}

6 מקרי בוחן

להלן מקרי בוחן מהעולם, אשר מדגימים מקרים של העדר חוסן באופן כללי, והעדר חוסן אנרגטי של רשתות חשמל ריכוזיות בפרט וסקטורי אנרגיה ריכוזיים בפרט. בחלק מהמקרים כבר ניתן לראות תגובת נגד להעדר החוסן האנרגטי של רשת החשמל הריכוזית, והקמה של רשתות חשמל מבזרות מבוססות אנרגיות מתחדשות מודרניות ואגירת אנרגיה.

³¹³ <https://www.inss.org.il/he/publication/%D7%91%D7%99%D7%98%D7%97%D7%95%D7%9F-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%AA-%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%91%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%90%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%98/?offset=0&posts=1&>

³¹⁴ https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf

6.1 ביזור תשתיות מיגון מפני איומים אוויריים בישראל

איום אווירי על מדינת ישראל, כבר הביא בעבר לביזור מיגון פיזי לשם חיזוק בטחון התושבים, הכלכלה והמדינה. עד שנות ה-1990, כל התשתיות להגנה פיזית על אנשים מפני איום אווירי, כדוגמת מקלט, היו אך ורק ברמת היישוב, השכונה או במקרה הטוב ברמת הבניין. אולם, לאחר ירי הטילים המסיבי לישראל במלחמת המפרץ הראשונה, הוחלט לבזר תשתיות אלו עד לרמת הדירה הבודדת. מאז, חובה על בניית מרחב מוגן דירתי, קומתי ו/או מוסדי בכל דירה, בניין או מוסד בישראל³¹⁵. זאת, למרות העלויות הכבדות הכרוכות בכך.

ביזור זה העלה את החוסן הביטחוני של תושבי ישראל מפני איומים אוויריים לרמה חסרת תקדים בעולם. הוא אפשר לתושבים הגעה למרחב מוגן תוך שניות מרגע גילוי האיום, ואף אפשר קיום שגרת חיים או המשך קיום שגרת חיים בתוך המרחבים המוגנים. ביזור זה הציל חיים רבים בהתקפות הטילים והרקטות שבוצעו על ישראל בשנים שעברו מאז, העלה את תחושת הביטחון של התושבים, אפשר לשגרת החיים האזרחיים והכלכליים במדינת ישראל להמשיך ואף לצמוח עם הפרעות מינימליות. ביזור דומה של רשת החשמל לרמת הדירה, הופך את התושבים לחסינים אנרגטית ברמה שאין שניה לה.

6.2 תקיפות תשתיות אנרגיה במדינות המפרץ הפרסי

פגיעה בתשתיות אנרגיה חיוניות כבר מזמן אינן תיאורטיות בלבד. בשנים האחרונות ראינו תקיפות שכאלו שביצעו בני ברית של איראן, מצליחות לגרום לנזק רב בסעודיה, באיחוד האמירויות^{316 317 318}, בבחריין ובעירק. ב-2019 הותקפו 2 מתקני נפט גדולים של סעודיה, בהם המתקן הגדול מסוגו בעולם, בעשרות טילים וכטב"מים, ונגרם להם נזק רב. המורדים הח'ותים בתימן (בעלי הברית של איראן) קיבלו אחריות לתקיפה (שימוש בנשק מהאיראנים), אך במערב סבורים שההתקפה היא איראנית ולקיחת האחריות של הח'ותים היא רק בשביל מראית עין. כך יכולים האיראנים להציג את יכולותיהם (גם לישראל), את פגיעותה של סעודיה, ולאפשר לסעודיה להימנע מתגובה ישירה כנגד איראן^{319 320}. ההתקפה פגעה ב-50% מכושר ייצור הנפט הסעודי, וב-5% מכושר ייצור הנפט העולמי, והביאה לעליה של 20% במחיר הנפט תוך יום, הקפיצה הגדולה ביותר ביממה בעשור האחרון³²¹.

³¹⁵ <https://www.oref.org.il/12495-19255-he/Pakar.aspx>

³¹⁶ <https://icpa.org.il/article/%D7%94%D7%AA%D7%A7%D7%99%D7%A4%D7%94-%D7%91%D7%90%D7%91%D7%95-%D7%93%D7%90%D7%91%D7%99-%D7%90%D7%99%D7%AA%D7%95%D7%AA-%D7%9C%D7%9B%D7%9C-%D7%94%D7%90%D7%96%D7%95%D7%A8/>

³¹⁷ <https://icpa.org.il/article/%D7%94%D7%AA%D7%A7%D7%99%D7%A4%D7%94-%D7%91%D7%90%D7%91%D7%95-%D7%93%D7%90%D7%91%D7%99-%D7%94%D7%99%D7%93%D7%99%D7%99%D7%9D-%D7%99%D7%93%D7%99-%D7%90%D7%99%D7%A8%D7%90%D7%9F/>

³¹⁸ <https://www.haaretz.co.il/news/world/middle-east/.premium.HIGHLIGHT-1.10566256>

³¹⁹ <https://www.inss.org.il/he/publication/the-attack-on-the-saudi-oil-facilities-a-new-level-of-iranian-audacity/>

³²⁰ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5631543,00.html>

³²¹ <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IN/IN11173>

אמנם, סעודיה דיווחה כי היקף אספקת הנפט מהמדינה חזר לרמתו הרגילה במהרה, אולם זה נעשה ע"י שחרור נפט ממאגרים קיימים ומהעלאת הפקת הנפט משדות נפט אחרים. לקחו מספר חודשים לתקן את כל הנזק באתר^{322 323}.

יותר מכך, סביר כי לפגיעות סעודית זו (יחד עם צמצום הגיבוי האמריקאי לסעודיה, עקב פשעי המלחמה שלה בתימן, רצח העיתונאי הסעודי שעבד עבור עיתון אמריקאי, ועוד), חלק בהתקפלות הסעודית בפני איראן לה אנו עדים כיום. מקרה זה מראה שוב איך העדר חוסן אנרגטי מתקדם פוגע ו/או משפיע באופן ניכר על מדיניות חוץ של מדינות. יתכן והתפתחות זו תשפיע לרעה על ישראל, אשר קיוותה לנרמול יחסים עם סעודיה, בהמשך למגמת נרמול היחסים עם נסיכויות המפרץ הפרסי.

6.3 מלחמת רוסיה אוקראינה 2022-2023

בפברואר 2022 פלשה רוסיה לאוקראינה במטרה להשתלט על המדינה, להדיח את שלטון שנבחר באופן דמוקרטי, ולהציב במקומו שלטון בובות. מלחמה זו היא חלק ממדיניות אסטרטגית של כמעט 25 שנים של פוטין, להחזיר את רוסיה לגדולתה, תוך השגת שליטה מחודשת בשטחים שהיא איבדה במסגרת התפרקות ברית המועצות. כחלק ממדיניות אסטרטגית זו, רוסיה הפכה לספקית דלקי מאובנים עיקרית של אירופה, באמצעות אספקת נפט וגז זולים. ההתמכרות האירופית לדלקי המאובנים הזולים מרוסיה, הפכו את אירופה לשבויה גיאופוליטית של רוסיה^{325 326 327}. בתת-פרק זה דוגמאות לפגיעות רשתות החשמל והאנרגיה הרוסיות, האוקראיניות והעולמיות.

6.3.1 אוקראינה

6.3.1.1 פגיעות במתקני תשתית אנרגיה באוקראינה

ב-2021, 93% מייצור החשמל באוקראינה היה מתחנות כוח ריכוזיות (מונעות בגרעין, פחם, נפט, גז טבעי והידרואלקטרי קונבנציונאלי), והשאר מאנרגיות מתחדשות מודרניות מבוזרות^{328 329}. כחלק מהמורשת הסובייטית, רשת החשמל האוקראינית הייתה מחוברת באופן הדוק לרשתות החשמל הרוסית והבלרוסית. מאז רוסיה כבשה את חצי האי קרים האוקראיני ופתחה במלחמה מוגבלת ולא רשמית במזרח אוקראינה ("מרידה של כוחות פרו-רוסיים כנגד השלטון בקייב") ב-2014, אוקראינה עושה מאמצים להתנתק מרשת החשמל הרוסית ולהתחבר לזו האירופית. זאת, במקביל להתנתקות הפוליטית, התרבותית, והכלכלית מרוסיה³³⁰.

³²² <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-09-27/saudi-recovery-from-oil-attack-isn-t-all-it-seems-oil-strategy>

³²³ <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/oil/101320-feature-a-year-after-abqaiq-attacks-saudi-aramco-still-seen-vulnerable>

³²⁴ <https://www.reuters.com/world/middle-east/saudi-arabia-iran-reopen-embassies-within-days-2023-04-28/>

³²⁵ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

³²⁶ <https://foreignpolicy.com/2023/01/19/russia-ukraine-economy-europe-energy/>

³²⁷ <https://edition.cnn.com/2022/09/05/energy/energy-crisis-russia-europe-costs/index.html>

³²⁸ <https://ourworldindata.org/energy/country/ukraine>

³²⁹ <https://www.statista.com/statistics/1237676/ukraine-distribution-of-electricity-production-by-source/>

³³⁰ <https://www.power-technology.com/analysis/ukraine-war-dtek-russia-eu-power/>

ראוי לציין, שביום בו פלשה רוסיה לאוקראינה, ה-24.2.2022, האוקראינים תכננו לבצע תרגיל ראשון לניתוק זמני של רשת החשמל האוקראינית מרשת החשמל הרוסית, לבחינת יציבות הרשת שלהם במנותק מרוסיה וכהכנה להתחברות לרשת האירופית. לאחר הניתוק (שהיה אמור להיות זמני) ופלישת הרוסים, האוקראינים לא טרחו לחבר את הרשת שלהם מחדש לרשת הרוסית. מכיוון שאוקראינה טרם התחברה לרשת האירופית, היא כרגע בפועל מדינת אי-חשמלי, כמו ישראל, ללא גיבוי מרשתות שכנות.³³¹

במסגרת המלחמה בין רוסיה ואוקראינה ב-2022-2023, הרוסים תוקפים את תשתיות האנרגיה האסטרטגיות של אוקראינה: תחנות כוח גרעיניות, תחנות כוח פוסיליות, מאגרי דלק, בתי זיקוק, מתקני גז טבעי, צנרת גז טבעי ואת רשת החשמל עצמה. פגיעה ברשת החשמל הריכוזית מביאה להשבתת רשת החשמל האוקראינית באזורים נרחבים, ולעיתים לתקופות ארוכות. אנשי חברת החשמל האוקראיניות לא יכולים לתקן נזקים באזורים בשליטה רוסית או כאלו שנמצאים באזורי לחימה פעילה, או כאלו שמלאים במוקשים, מטענים ונפלים.³³²

במחצית השנייה של 2022, כאשר התברר לרוסים שהם לא מצליחים להביא להישגים הנדרשים בלחימה ואף סופגים מפלות, הם החלו לבצע תקיפות מכוונות, נרחבות ושיטתיות של מאות אתרי תשתיות אנרגיה ריכוזית אוקראינית, באמצעות אלפי טילים ומל"טים, והביאו לקריסה של 50% מרשת החשמל האוקראינית.^{333 334} נציין כי סקטור החשמל האוקראיני גדול פי 3-4 מזה הישראלי, ופרוש על פני שטח גדול פי 30 משטחה של ישראל.³³⁵ האוקראינים הצליחו להציל חלק מהרשת שלהם הודות לאספקה מסיבית של טילים ותותחים נגד טילים ומל"טים מהמערב.

השבתת סקטור האנרגיה מפעילה לחץ כפול- היא מקשה על כוחות הביטחון לתפקד כנגד הפולשים הרוסיים, והופכת אזורים שלמים לבלתי אפשריים למגורים עבור אנשים רבים, וכך המדינה צריכה להתמודד עם קושי עצום בטיפול בפליטים וכן לנסות ולספק שירותים חיוניים לאזורים הפגועים בהם עוד מתגוררים אנשים.

ישנו חשש שהרוסים יפגעו בטעות או אפילו בכוונה בכורים גרעיניים אוקראינים, וכתוצאה מכך יגרם זיהום רדיואקטיבי נרחב, בדומה לאסון הגרעיני בצ'רנוביל. במהלך הלחימה אף נפגע מהתקפה רוסית חלק ממתחם תחנת הכוח הגרעינית הגדולה באירופה (Zaporizhzhia), אך בינתיים הנזק היה קטן ולא הייתה פגיעה בכורים עצמם.³³⁶

כחלק מהמלחמה, הרוסים מבצעים תקיפות סייבר על סקטור האנרגיה האוקראיני, אבל כרגע ללא הצלחה משמעותית. זאת הודות להגברת אבטחת הסייבר באוקראינה בסיוע המערב, בעקבות תקיפות סייבר רוסיות החל מ-

³³¹ <https://www.power-technology.com/analysis/ukraine-war-dtek-russia-eu-power/>

³³² <https://www.power-technology.com/analysis/ukraine-war-dtek-russia-eu-power/>

³³³ <https://www.cbsnews.com/news/ukraine-russia-electricity-60-minutes-2023-02-19/>

³³⁴ <https://www.bbc.com/news/world-europe-63754808>

³³⁵ <https://www.statista.com/statistics/1219982/ukraine-power-system-capacity-by-plant-type/?locale=en>

³³⁶ <https://www.power-technology.com/analysis/ukraine-war-dtek-russia-eu-power/>

2014,³³⁷ וכן ניכרת עליה בתקיפות סייבר רוסיות על מדינות ידידותיות לאוקראינה במהלך המלחמה.³³⁸ האמריקאים פרסמו במהלך המלחמה כי הם הגישו כתבי אישום נגד 4 אזרחים רוסיים באשמת ניסיונות להשתלטות על מערכות מיחשוב ב-135 מדינות, כולל על מערכות קריטיות בסקטור האנרגיה.³³⁹ לפחות כרגע, הנזק מתקיפות סייבר באוקראינה אינו גדול כפי שחששו בעבר, ונזק שמתרחש מתוקן יחסית מהר.³⁴⁰

במקביל להרס הנרחב של התשתיות, 12 מיליון פליטים ברחו מביתם, כאשר באופן מצטבר 8 מיליון עברו מאוקראינה למדינות שכנות עד היום, כאשר בינתיים כמעט 3 מיליון מהם כבר חזרו לאוקראינה, וכרגע ההערכה היא שיש כ-7 מיליון פליטים בתוך אוקראינה עצמה וכ-5 מיליון פליטים מחוץ לאוקראינה. כמובן שפעילויות עסקית, תחבורתיות ותעשייתיות שותקו גם כן באזורים נרחבים ונפגעו באזורים נרחבים אחרים.³⁴¹ ³⁴² מציאות חדשה זו גרמה לשינויים חסרי תקדים בהיקף צריכת החשמל, אשר גם ללא פגיעה פיזית בתשתיות חשמל מאתגרים מאוד את רשת החשמל, עקב חוסר התאמה בין היקף יצור החשמל להיקף צריכת החשמל שהתרסקה, וכן עקב פגיעה כלכלית קשה בחברות החשמל המקומיות אשר כעת יש להן הוצאות גדולות יותר מבעבר והרבה פחות הכנסות.³⁴³

6.3.1.2 דוגמאות לחוסן אנרגטי באוקראינה

בניגוד להעדר החוסן האנרגטי של רשת החשמל הריכוזית, מתקן סולארי הפגין חוסן אנרגטי. באירוע במאי 2022, נפגע מירי טילים שדה סולארי אוקראיני בהספק 3.9MW בו 13,680 פאנלים סולאריים בעיר Merefafa.³⁴⁴ ³⁴⁵ ³⁴⁶ למרות שכמה עשרות פאנלים סולאריים נהרסו כליל וכ-400 אחרים נפגעו מרסיסים, המתקן חזר לתפקד עם חצי מהספק החשמל המותקן בו תוך כמה שעות. זאת, לאחר שצוות התחזוקה ניתק את שורות הפאנלים הפגועים מהמערכת. תיאורטית, ניתן היה להחזיר אפילו 90% מהמתקן לפעילות עוד באותו היום, כי הפאנלים השבורים עדיין מסוגלים לייצר חשמל, אולם במתקן העדיפו שלא לעשות זאת. בהמשך, במידה וחלקי חילוף זמינים, ניתן לתקן את כל הנזק תוך מספר ימים.³⁴⁷ ³⁴⁸ ³⁴⁹ ³⁵⁰

בנוסף, הפגיעות ברשת החשמל הריכוזית ובאספקת הדלקים האיצי באוקראינה הקמת מערכות סולאריות קטנות עם או בלי אגירה בבתיים ובעסקים.³⁵¹ ³⁵²; והגבירה את השימוש האזרחי והצבאי במערכות סולאריות ניידות ובאופניים

³³⁷ <https://apnews.com/article/russia-ukraine-kyiv-technology-business-hacking-0147e33bc1846a3f8039f9c65a1b4b50>

³³⁸ <https://techmonitor.ai/technology/cybersecurity/cyberattacks-ukraine-russia-war>

³³⁹ https://www.huffpost.com/entry/russia-hack-energy-sector_n_623d167be4b0e3a314352d40

³⁴⁰ <https://techmonitor.ai/technology/cybersecurity/cyberattacks-ukraine-russia-war>

³⁴¹ <https://www.bbc.com/news/world-60555472>

³⁴² <https://data.unhcr.org/en/situations/ukraine>

³⁴³ <https://www.power-technology.com/analysis/three-months-at-war-with-dtek-part-two/>

³⁴⁴ https://www.energo.ua/en/assets/pv_plant_merefafa

³⁴⁵ <https://liveuamap.com/en/2022/28-may-damage-in-merefafa-after-missile-strike>

³⁴⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=qh3wU9hyNs>

³⁴⁷ <https://www.pv-magazine.com/2022/05/30/missile-strike-destroys-solar-plant-in-ukraine/>

³⁴⁸ <https://www.vice.com/en/article/qjbg5/russian-missiles-strike-solar-power-plant-in-ukraine>

³⁴⁹ <https://cleantechnica.com/2022/06/22/solar-power-plants-are-more-missile-resistant/>

³⁵⁰ <https://reneweconomy.com.au/russian-missile-strikes-ukraine-solar-farm-solar-farm-powers-on/>

³⁵¹ <https://statensolar.com/2022/07/01/ukraine-powering-forward-with-solar/>

³⁵² <https://pv-magazine-usa.com/2022/06/30/war-pushes-ukraine-to-deploy-solar/>

חשמליים^{353 354 355 356}. יותר מכך, המלחמה, חוסר הוודאות האנרגטי והרצון להפוך לעצמאיים אנרגטית- גרמו לעליה דרמטית בביקוש להתקנת מערכות אלו גם במקומות אחרים באירופה³⁵⁷. באותו האופן, גם גבר הרצון לקבל שירותי אינטרנט לווייניים על פני קוויים, באמצעות חברת Starlink למשל.

6.3.2 רוסיה

האוקראינים גם מנסים לפגוע בתשתיות אנרגיה רוסיות. אולם בשל גודלה העצום של רוסיה, ההיקף הגדול של תשתיות האנרגיה הפוסילית הרוסית, ויכולת התקיפה המוגבלת של הצבא האוקראיני, ההתקפות מתרכזות באזורים אוקראינים כבושים ע"י הרוסים או בשטחים רוסיים שסמוכים לאוקראינה.

במהלך המלחמה, מתרחשים מספר גדול של שריפות ופיצוצים במתקני תשתית אנרגיה רוסיים ללא שנלקחה אחריות על האירועים, יש מקרים בהם אוקראינה הכחישה מעורבות ויש מקרים אשר התרחשו אלפי ק"מ מאוקראינה ולא יתכן שבוצעו ע"י צבא אוקראינה. יתכן וחלק מהאירועים בוצעו ע"י תושבי רוסיה פרו-אוקראינים ויתכן וחלקם נבעו מתקלות ותאונות שגם שכיחות ברוסיה, ויתכן אף שחלק מהאירועים מקורם במתקפת סייבר אוקראינית או מערבית.

למשל, ב-1.4.2022 פגעו 2 מסוקי קרב ב-8 מאגרי דלק ב-Belgorod³⁵⁸ (30 ק"מ צפונית לגבול אוקראינה). ב-25.4.2022 התפוצצו ונשרפו מאגרי דלק ב-Bryansk³⁵⁹ (110 ק"מ צפונית לגבול אוקראינה), אך אוקראינה הכחישה מעורבות באירוע וטוענת כי רוסיה ביצעה את התקיפה בעצמה כדי לגרום לבהלה בקרב האזרחים ולהעצים תמיכה אזרחית בפלישה הצבאית הרוסית לאוקראינה (False flag operation)³⁶⁰. באותו יום מאגר דלק אחר נשרף סמוך לגבול סין-רוסיה והאוקיינוס השקט במזרח הרחוק (6,500 ק"מ מזרחית לאוקראינה)³⁶¹.

ב-16 ביוני 2022, התרחש פיצוץ ושריפה גדולה בשדה הגז הטבעי הגדול ביותר ברוסיה (Urengoy במערב סיביר) של גזפרום, אשר מספק גז לאירופה. הרוסים טוענים שהפיצוץ נגרם כתוצאה מתקלה, כי השריפה כובתה תוך כיום, וכי היא לא פגעה באספקת גז ללקוחות. יחד עם זאת, מכיוון שבתקופה זו הרוסים צמצמו בעשרות אחוזים את אספקת הגז לאירופה, כתגובה לסנקציות של המערב על רוסיה שהוטלו עקב הפלישה הרוסית, יתכן ואין פגיעה באספקת הגז ללקוחות כי מראש האספקה צומצמה משמעותית^{362 363}.

³⁵³ <https://businessmirror.com.ph/2022/06/21/in-ukraine-entrepreneurs-e-bikes-face-off-against-putins-war-machine/>

³⁵⁴ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-06-18/ukraine-engineers-create-new-electric-bike-model-during-war>

³⁵⁵ <https://pv-magazine-usa.com/2022/04/28/lion-energy-donates-portable-solar-pv-modules-and-generators-to-ukraine/>

³⁵⁶ <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/solar-support-in-hazardous-locations/>

³⁵⁷ <https://www.cleaneenergywire.org/news/ukraine-war-pushes-demand-solar-batteries-homeowners-strive-independence>

³⁵⁸ <https://www.washingtonexaminer.com/news/ukrainian-airstrike-hits-oil-depot-in-russian-territory-local-official>

³⁵⁹ <https://www.thesun.co.uk/news/18362953/russia-oil-depot-explosion-fire-ukraine/>

³⁶⁰ <https://www.intellinews.com/update-massive-explosions-at-oil-depot-in-western-russia-but-who-is-to-blame-242412/>

³⁶¹ <https://www.intellinews.com/update-massive-explosions-at-oil-depot-in-western-russia-but-who-is-to-blame-242412/>

³⁶² <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Russias-Largest-Gas-Field-On-Fire-After-Pipe-Bursts.html>

³⁶³ <https://www.express.co.uk/news/world/1626621/Putin-news-Russia-oil-field-fire-Gazprom-sabotage-Ukraine-war-update>

למרות ההודעה הרוסית על כי מדובר בתקלה, עלו חשדות כי הפיצוץ והשריפה נגרמו כתוצאה מחבלה פיזית או תקיפת סייבר ע"י גורמים פרו-אוקראינים. זאת, בשל העובדה שמאז פלישת רוסיה התרחשו ברוסיה למעלה מתריסר שריפות יוצאות דופן במתקנים צבאיים ואסטרטגיים רוסיים, כאשר ידוע בוודאות שלפחות חלקן נגרמו כתוצאה מחבלה של גורמים פרו-אוקראינים.^{365 364}

ב-20.6.2022 האוקראינים תקפו בטילים אסדות גז טבעי ימיות עליהם השתלטו הרוסים ב-2014 כחלק מכיבוש חצי האי קרים האוקראיני. בתקיפה נפגעה אסדת גז טבעי ימית אחת^{366 367}. ב-22.6.2022 נפגע בית זיקוק רוסי ב-Rostov, ככל הנראה מפגיעת מל"ט. יש הטוענים כי אירוע זה בוצע ע"י רוסיה כדי להצדיק גיוס כוחות מילואים רוסיים למלחמה באוקראינה לאור כשלונו של הצבא הרוסי (False flag operation), זאת מכיוון שטווח הטיסה המקסימלי של מל"טים אוקראינים הוא 150 ק"מ בלבד, בעוד התקיפה אירעה לפחות 200 ק"מ מאזורים בשליטת אוקראינה³⁶⁸.

ב-23.6.2022 אירעו אירועים חריגים בסקטור האנרגיה ברוסיה: בתחנת כוח Gysinoozerskaya ליד Ulan-Ude שבמזרח רוסיה אירעה שריפה בתאונה קשה שגרמה להפסקת חשמל בכל האזור (4,800 ק"מ מזרחית לאוקראינה); וכן מיכלית גז התפוצצה ב-Talitsa (2,000 ק"מ מזרחית לאוקראינה)³⁶⁹. ב-29.4.2023 פוצצו 10 מיכלי דלק של ספינות הצי הרוסי בסבסטופול שבחצי האי קרים, שנכבש מאוקראינה. התקיפה בוצעה ככל הנראה ע"י מספר רב של כטב"מים ואבדו בה כ-40,000 טון של דלק שמהווים חלק ניכר מאספקת הדלק של הצי. התקיפה גרמה לזיהום אוויר חמור וככל הנראה גם לזיהום קרקע וים³⁷⁰.

6.3.3 שאר העולם

למרות שהמלחמה הפיזית מתרחשת באוקראינה, יש לה השפעות על סקטור האנרגיה העולמי, וזאת אפילו לפני שהיא התחילה. המלחמה וסחטנות האנרגיה הגיאופוליטית הרוסית שקדמו לה, המחישו שוב (כמו במשבר הנפט של שנות ה-1970, או אלו שסבבו את מלחמות ארה"ב בעירק) כי סקטור אנרגיה אשר נשען על יבוא דלקי מאובנים לא רק שאינו חסין, הוא אף שבירי^{371 372 373}.

מחירי דלקי המאובנים עלו בכל העולם עוד טרם התחילה המלחמה, ובעיקר אחרי שהיא התחילה. עליות המחירים הגבוהות ביותר היו של גז טבעי. בחלק משווקי הגז האירופיים, מחיר גז טבעי קפץ פי 49 (!) באוגוסט 2023 לעומת

³⁶⁴ <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Russias-Largest-Gas-Field-On-Fire-After-Pipe-Bursts.html>

³⁶⁵ <https://www.express.co.uk/news/world/1626621/Putin-news-Russia-oil-field-fire-Gazprom-sabotage-Ukraine-war-update>

³⁶⁶ <https://www.aljazeera.com/news/2022/6/20/ukraine-attacks-sea-drilling-platforms-crimea-official-says>

³⁶⁷ <https://www.thedrive.com/the-war-zone/ukraine-attacks-russian-oil-platforms-snake-island-strike-rumors-swirl>

³⁶⁸ <https://euroweeklynews.com/2022/06/23/oil-refinery-rostov-russia-drone/>

³⁶⁹ <https://www.msn.com/en-us/news/world/two-more-mystery-explosions-in-russia-send-fireballs-into-the-sky/ar-AAyNaU9>

³⁷⁰ <https://www.msn.com/en-us/news/other/ukraine-live-briefing-russia-blames-ukraine-drone-for-crimea-fuel-depot-attack/ar-AA1axB9E>

³⁷¹ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

³⁷² <https://foreignpolicy.com/2023/01/19/russia-ukraine-economy-europe-energy/>

³⁷³ <https://edition.cnn.com/2022/09/05/energy/energy-crisis-russia-europe-costs/index.html>

מחירו בשפל תקופת הקורונה, ופי 12 לעומת מחירו הממוצע בעשור הקודם.³⁷⁴ קפיצת מחירי דלקי המאובנים גרמה לעליה תלולה במחירי החשמל, הדלקים לתחבורה ומוצרים רבים אחרים; לפגיעה ברמת החיים; להפגנות ואף לחוסר יציבות פוליטי.³⁷⁵

אולם, חשוב לציין כי המשבר לא נולד אתמול, אלא התבשל במשך 20 שנה, והיו סימנים רבים שהעידו על כי אירופה מכניסה עצמה ביוזעין למלכודת גיאופוליטית רוסית, תוך התעלמות מגורמים לא מעטים אשר הזהירו מפני סכנה זו.³⁷⁶ לאחר התפרקות ברית המועצות, גורמים באירופה פעלו לקרוב רוסיה אל המערב, דרך הרחבת קשרי מסחר ושיתופי פעולה. אחד הכיוונים היה הגדלת יבוא דלקי המאובנים מרוסיה, אשר שופעת במשאבי טבע אלו, ואירופה הפכה ליבואנית דלקי המאובנים הגדולה ביותר מרוסיה.³⁷⁷

בעשורים האחרונים, גדל יבוא דלקי המאובנים/ הגז הטבעי מרוסיה לאירופה, עד שרוסיה הפכה למקור ל-50% מכל הגז הטבעי באירופה.^{378 379} במקביל, פעלו פוטין ורוסיה להחזרת עטרה ליושנה, לחיזוק ההשפעה והשליטה הרוסית במדינות ברה"מ לשעבר: מלחמת רוסיה-צ'צ'ניה (1994-1995) והשנייה (1999-2000),³⁸⁰ פלישת רוסיה לגיאורגיה (2008),^{381 382} הפיכת בלארוס למדינת חסות ואולי אף סיפוחה בעתיד^{383 384 385}, 3 פלישות לאוקראינה (2014 קרים, 2014 דונבאס, 2022 כל אוקראינה)^{386 387}, תמיכה צבאית ברודנים במדינות ברה"מ לשעבר ואיום על עצמאותן.³⁸⁸ רוסיה פעלה באתרים נוספים להגברת השפעתה הגיאופוליטית ברחבי העולם, כמו למשל כאשר סייעה לאסד להינצל ממלחמת האזרחים הסורית (החל מ-2015).

בין 2005-2021, רוסיה הגבילה, צמצמה או הפסיקה את אספקת הגז לאוקראינה ו/או לאירופה מספר פעמים כחלק ממנוף הלחץ הגיאופוליטי, ותמיד אירופה התיישרה.³⁸⁹ רק ב-2022, עם הפלישה השלישית של רוסיה לאוקראינה תוך 8 שנים, הפסיקה אירופה להתקפל. אולם, ההצתה המאוחרת הזו גררה שבריריות אנרגטית, פגיעה קשה בכלכלה

³⁷⁴ <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>

³⁷⁵ <https://abcnews.go.com/Business/wireStory/inflation-protests-europe-threaten-political-turmoil-91905279>

³⁷⁶ https://www.sp-interface.com/files/ugd/2c7e82_a517276b13e04a4b87910b890bff25f4.pdf

³⁷⁷ <https://foreignpolicy.com/2023/01/19/russia-ukraine-economy-europe-energy/>

³⁷⁸ https://ecfr.eu/article/commentary_the_eu_and_russias_gas/

³⁷⁹ <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/>

³⁸⁰ <https://www.historynet.com/russias-forever-war-chechnya/>

³⁸¹ <https://www.history.com/news/russia-georgia-war-military-nato>

³⁸² <https://editorials.voa.gov/a/ten-years-ago-russia-invaded-georgia/4516130.html>

³⁸³ <https://www.dw.com/en/will-russia-swallow-up-belarus/a-59193355>

³⁸⁴ <https://www.reuters.com/world/europe/russian-pm-says-moscow-minsk-keen-boost-union-state-cooperation-amid-sanctions-2022-03-14/>

³⁸⁵ https://news.yahoo.com/russia-belarus-strategy-document-230035184.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9kdWNRZHVja2dvLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAALLfAGRnCOs9bbxdSsp2D0Ssz3TJI

[QEAOAr0Y2W_KOFFzMBI1_fFdW6VjWosvB2QplhNgr6LMTe6C0f1QllapPVJ4gRLhMYnl0ex3N_pRV9FrI9R0u_ns_JRNp5a4QE2q3T3iJGEa8cnGD71qBYR_xg5Rnyo5Z3FtM_SWUW30jX](https://www.reuters.com/world/europe/russian-pm-says-moscow-minsk-keen-boost-union-state-cooperation-amid-sanctions-2022-03-14/)

³⁸⁶ <https://www.britannica.com/topic/Ukraine-crisis>

³⁸⁷ <https://www.vox.com/2014/9/3/18088560/ukraine-everything-you-need-to-know>

³⁸⁸ <https://www.rferl.org/a/russia-lawmakers-question-kazakhstan-territorial-integrity-statehood/31003732.html>

³⁸⁹ <https://www.sp-interface.com/ukraine2022>

ואף ביציבות האירופית. ההתפכחות האירופית הביאה אותם להכיר כי יבוא דלקי מאובנים הינו נקודת תורפה אסטרטגית ואינה מקנה חוסן אנרגטי.

על מנת לצאת מהבור שהיא כרתה לעצמה, בטווח הקצר אירופה פנתה לצמצם באופן חסר תקדים את יבוא דלקי המאובנים מרוסיה, תוך יבוא חלופי ממדינות אחרות. כחלק מהמהלך הזה, אירופה פנתה גם לישראל בניסיון לבחון יבוא גז טבעי מישראל³⁹⁰. אולם, בטווח הבינוני והארוך אירופה פועלת להפוך עצמה לחסינה אנרגטית באופן מלא, באמצעות התייעלות אנרגטית, מעבר לשימוש נרחב באנרגיות מתחדשות, אגירת אנרגיה, אנרגיה גרעינית, וחישובול סקטור האנרגיה שלה^{391 392}. חישובול סקטור האנרגיה יאפשר התייעלות אנרגטית: למשל משאבות חום חשמליות צורכות פי 3-5 פחות אנרגיה לעומת חימום בגז טבעי, רכבים חשמליים חוסכים עד פי 5 אנרגיה לעומת רכבים מונעים בנפט ומצמצמים את התלות ביבוא נפט^{393 394 395 396 397}.

עפ"י ה-IEA, בשנת 2022, כתגובה מיידית למשבר האנרגיה, היקף הקמת מתקני אנרגיות מתחדשות קפץ ב-34% אל מול התכנון לאותה שנה; ועד שנת 2030 צפוי כי צריכת האנרגיה הסופית באירופה תהיה ממתחדשות^{398 399}. דוח חדש של EMBER מצא כי ייצור חשמל באמצעות שמש ורוח באירופה עבר ב-2022 לראשונה ייצור חשמל בגז טבעי (ב-2019 הם עברו כבר את הפחם), צופה ירידה של 20% בייצור חשמל מדלקי מאובנים ב-2023, וצופה כי לאחר 2025 יתחיל להתכווץ שוק הגז הטבעי ביבשת^{400 401}.

באביב 2023, הציעה הנציבות האירופית יישום תהליך של הפסקת השימוש בדלקי מאובנים באופן כללי וגז טבעי בפרט ברשת החשמל האירופית **מסיבות של העדר חוסן אנרגטי**, באמצעות מעבר לאנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה⁴⁰².

6.4 מזג אוויר קיצוני בארה"ב 2020-2022

תוך שנה אחת בלבד בארה"ב (אוגוסט 2020 - אוגוסט 2021) התרחשו 3 אסונות רשת חשמל ריכוזית (סופת חורף קיצונית בטקסס, רוחות חזקות באיווה ואילינוי, הוריקן איידה בניו-אורלינס) עקב שינוי אקלים שגרמו לניתוק מאות אלפי עד מיליוני תושבים מחשמל למשך ימים, מאות מקרי מוות, ונזקים במאות מיליארדי דולרים. בנוסף נותק החשמל

³⁹⁰ https://www.gov.il/he/departments/news/ng_150622

³⁹¹ <https://iea.blob.core.windows.net/assets/64c27e00-c6cb-48f1-a8f0-082054e3ece6/Renewables2022.pdf>

³⁹² <https://m.ynet.co.il/articles/hkck7vghs>

³⁹³ <https://www.weforum.org/agenda/2019/04/electrification-energy-transition-decarbonization-climate-change/>

³⁹⁴ <https://fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>

³⁹⁵ <https://www.nrdc.org/bio/lauren-urbanek/how-efficiency-will-help-get-us-net-zero-2050>

³⁹⁶ <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-systems>

³⁹⁷ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/how-a-heat-pump-works>

³⁹⁸ <https://iea.blob.core.windows.net/assets/64c27e00-c6cb-48f1-a8f0-082054e3ece6/Renewables2022.pdf>

³⁹⁹ <https://m.ynet.co.il/articles/hkck7vghs>

⁴⁰⁰ <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/>

⁴⁰¹ <https://davidson.weizmann.ac.il/online/sciencenews/%D7%90%D7%99%D7%A8%D7%95%D7%A4%D7%94-%D7%A2%D7%95%D7%91%D7%A8%D7%AA-%D7%9C%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C-%D7%A0%D7%A7%D7%99>

⁴⁰² https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1591

מספר רב של פעמים באזורים נרחבים למיליוני תושבים בקליפורניה עקב שריפות באזורים של קווי הולכה, וב-2022 הוריקן איאן גרם לניתוק ~9.6 מיליון תושבים מחשמל בדרום-מזרח ארה"ב הגורמים הישירים העיקריים לפגיעות היו שריפות בקווי מתח שלא תוחזקו כראוי, קפיאה של שרשרת האספקה בסקטור הגז, פגיעת רוחות והצפות של קווי מתח 410 409 408 407 406 405 404 403 .

6.4.1 חוסן אנרגטי והעדרו בהוריקן איאן

בספטמבר 2022 היכה הוריקן איאן את קובה ואת דרום-מזרח ארה"ב, כאשר הנזק הגדול ביותר נגרם בפלורידה. בארה"ב ובקובה, נהרגו לפחות 156 ו-5 אנשים בהתאמה. הנזק בארה"ב נאמד בכ-113 מיליארד דולר - ההוריקן השלישי בהיסטוריה של ארה"ב בהיקף הנזק שגרם. כ-6,000 בתים נהרסו כליל, כ-60,000 ספגו נזקים משמעותיים, וכ-9.6 מיליון תושבים נותקו מחשמל. בעיירה פורט מאיירס דרכה עבר מרכז ההוריקן, נהרסו כליל 900 בתים ו-2,200 נפגעו באופן קשה ^{411 412}.

בעקבות הוריקן צ'ארלי שפגע קשות בפלורידה ב-2004, העיירה החדשה באבוקוק ראנץ' שבפלורידה תוכננה ב-2006 ובבנתה מראש כעיירה חסינה לאירועי קיצון, עם תקן בניה מחמיר, תכנון למניעת הצפות ורשת חשמל חסינה. רשת החשמל בנויה כמיקרוגרید, מבוססת על שדה סולארי מקומי, מתקן עירוני של סוללות לאגירת חשמל, וקווי חשמל מוטמנים. בנוסף, לחלק מהבתים פאנלים סולאריים על הגגות ו/או סוללות לאגירת חשמל. למרות שהיא שוכנת 20 ק"מ בלבד מהעיר פורט מאיירס שנפגעה קשות, למרות שחוותה את אותם כוחות הרסניים, ולמרות שרשת החשמל סביבה קרסה, באבוקוק ראנץ' לא נפגעה כלל ולא איבדה את אספקת החשמל שלה אפילו לשנייה. חלק מתושבי פורט מאיירס החבוטה אף נקלטו במרכז החירום של באבוקוק ראנץ' לאחר ההוריקן ^{413 414 415}.

6.4.2 עליה תלולה באגירת אנרגיה מבוזרת כתוצאה מהעדר חוסן אנרגטי ברשת החשמל האמריקאית

כפי שצוין, בעשור האחרון אנו עדים לשטף של טכנולוגיות והתקנות של מתקני אגירת אנרגיה מבוזרים (ראו 2.2.2.2). ב-2020 בארה"ב, הצפי להגדלת הספק הסוללות לאגירת אנרגיה בקנה מידה גדול (מתח עליון) עד 2023 היה 4,600MW, מתוכם רק 200MW בטקסס ⁴¹⁶ (ראו בירוק ERCOT [חברת החשמל בטקסס] באיור 7 פאנל עליון).

⁴⁰³ <https://www.ferc.gov/media/february-2021-cold-weather-grid-operations-preliminary-findings-and-recommendations-full>

⁴⁰⁴ <https://www.renewableenergyworld.com/policy-regulation/investigation-into-texas-freeze-highlights-natural-gas-failures-frequency-of-cold-weather-events/>

⁴⁰⁵ <https://www.buzzfeednews.com/article/peteraldhous/texas-winter-storm-power-outage-death-toll>

⁴⁰⁶ <https://buzzfeednews.github.io/2021-05-tx-winter-storm-deaths/>

⁴⁰⁷ <https://www.wsws.org/en/articles/2021/06/01/texa-i01.html>

⁴⁰⁸ <https://ieer.org/news/the-electric-grid-in-a-time-of-climate-disasters-communities-show-the-way/>

⁴⁰⁹ <https://legacy.energy-storage.news/blogs/texas-winter-storm-highlights-the-importance-of-battery-storage-for-telecom>

⁴¹⁰ https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092022_lan.pdf

⁴¹¹ https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092022_lan.pdf

⁴¹² <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/national/202209/supplemental/page-5>

⁴¹³ <https://babcockranch.com/>

⁴¹⁴ <https://cleantechnica.com/2022/10/03/babcock-ranch-was-designed-to-be-sustainable-resilient-hurricane-ian-was-its-first-real-test/>

⁴¹⁵ <https://www.ynet.co.il/environment-science/article/bk00wlb9eo>

⁴¹⁶ https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/pdf/battery_storage.pdf

בנתונים מבוססים על פרויקטים קיימים, בהקמה ומתוכננים. הנתונים עבור ארה"ב משקפים עליה אקספוננציאלית מהירה עבור השנים הקרובות בהספק המותקן הצפוי, שהיו צפויים לאור ההוזלה המשמעותית במחיר חשמל מתחדש ובמחירי סוללות לאגירת חשמל, ולאור הקמה מסיבית של מתקני אנרגיה מתחדשת.

אולם, בכל אסונות קריסת רשת החשמל הריכוזית בארה"ב ב-2020-2021 שהוזכרו, פרויקטים מקומיים של מיקרוגרید, של יצור אנרגיה מתחדשת ושל אגירת אנרגיה באזורי האסונות המשיכו לתפקד, אפשרו אספקת חשמל חלקית או מלאה, שמרו על תושביהם ללא כל נזק, וסייעו לרבים מאלו בסביבתם שנותרו ללא חשמל, מים ואנרגיה⁴¹⁷ 418 419 420. לכן, אחרי אותה שנה עמוסת אסונות ברשתות החשמל בארה"ב, במקביל להוזלה המשמעותית באנרגיות מתחדשות ובסוללות לאגירה, במקביל להקמת מתקני אנרגיות מתחדשות בהיקפים גדולים, ובמקביל לפרסום תחזיות על כי שינוי האקלים יביא עימו עוד ועוד אירועי קיצון; הוקמו בטקסס תוך **חצי שנה** מהאסון מתקני אגירת אנרגיה גדולים מבוססי סוללות בהספק של 1,400MW. אלו מספרים גדולים פי 7-8 מההספק שהיה במדינה לפני האסון והותקנו לאורך שנים, והצפי הוא שעד מרץ 2023 מספר זה יעלה ל-4,000MW^{424 423 422}.

ז"א, היקף האגירה בטקסס יגדל ב-3,825MW תוך שנתיים בלבד. הצפי החדש להספק המותקן בטקסס ב-2023, גדול פי 20 (!) לעומת הצפי ל-2023 רק שנה קודם לכן (ראו באיור 7 פאנל עליון לעומת פאנל תחתון), לפני האסון. בנוסף, ב-2021 (שוב, לאחר אותה שנה מוכת אסונות לרשתות החשמל בארה"ב), צפי הגדלת הספק סוללות בקנה מידה גדול לאגירת חשמל בארה"ב כולה בין 2020-2023 במצטבר קפץ מ-4,600MW ל-12,000MW לפחות (ראו באיור 7 פאנל עליון לעומת פאנל תחתון)⁴²⁵.

נתונים עדכניים בארה"ב מראשית 2023, מראים כי התחזיות מתחילת 2021 התממשו פחות או יותר, עם התקנת סוללות לאגירה בהספקים של כ-3,500 MW ו-4,800 MW ב-2021 וב-2022 בהתאמה בכל הרמות השונות: רמת הרשת (utility scale); רמה קהילתית, מסחרית ותעשייתית (CCI) (community, commercial, and industrial); ורמה ביתית/ דירתית (residential), כך שבסוף 2022 היו בארה"ב סוללות לאגירה בהספק של כ-12,000 MW. זאת למרות האטה משמעותית בחציון השני של 2022 כתוצאה מהקשיים הכלכליים^{428 427 426}.

⁴¹⁷ <https://www.buzzfeednews.com/article/peteraldhous/texas-winter-storm-power-outage-death-toll>

⁴¹⁸ <https://buzzfeednews.github.io/2021-05-tx-winter-storm-deaths/>

⁴¹⁹ <https://www.wsws.org/en/articles/2021/06/01/texa-i01.html>

⁴²⁰ <https://ieer.org/news/the-electric-grid-in-a-time-of-climate-disasters-communities-show-the-way/>

⁴²¹ <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f64/EEDG-Resilience.PDF>

⁴²² <https://www.utilitydive.com/news/texas-adding-energy-storage-ahead-of-risky-summer-months-sp-analysis/601868/>

⁴²³ <https://spectrumlocalnews.com/tx/south-texas-el-paso/news/2022/01/07/tesla-provides-1st-look-at-massive-texas-megapack-battery-project->

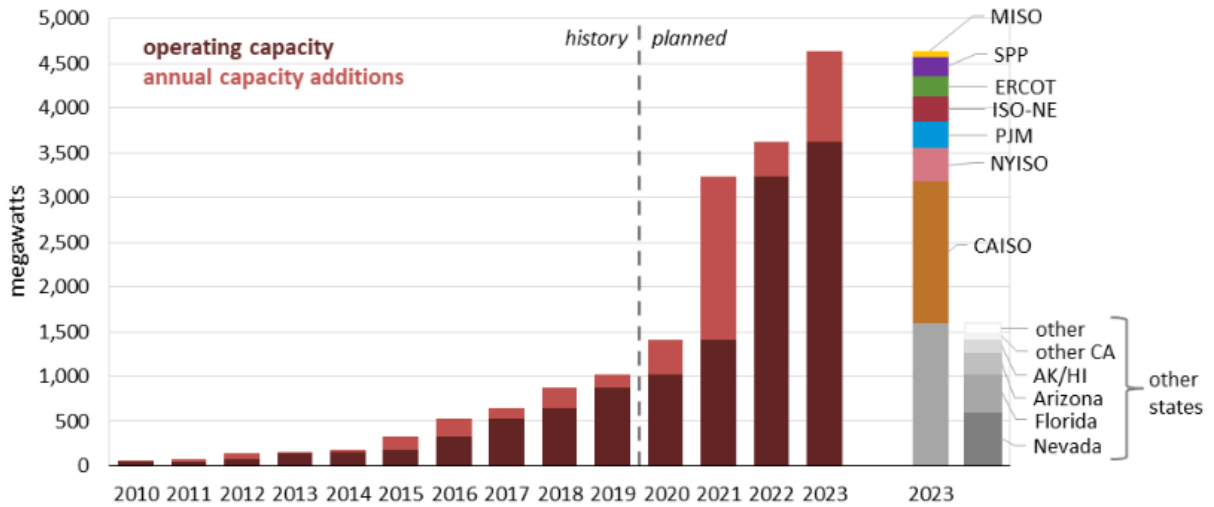
⁴²⁴ <https://www.renewableenergyworld.com/storage/texas-adds-battery-storage-to-support-grid-ahead-of-winter/>

⁴²⁵ <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/>

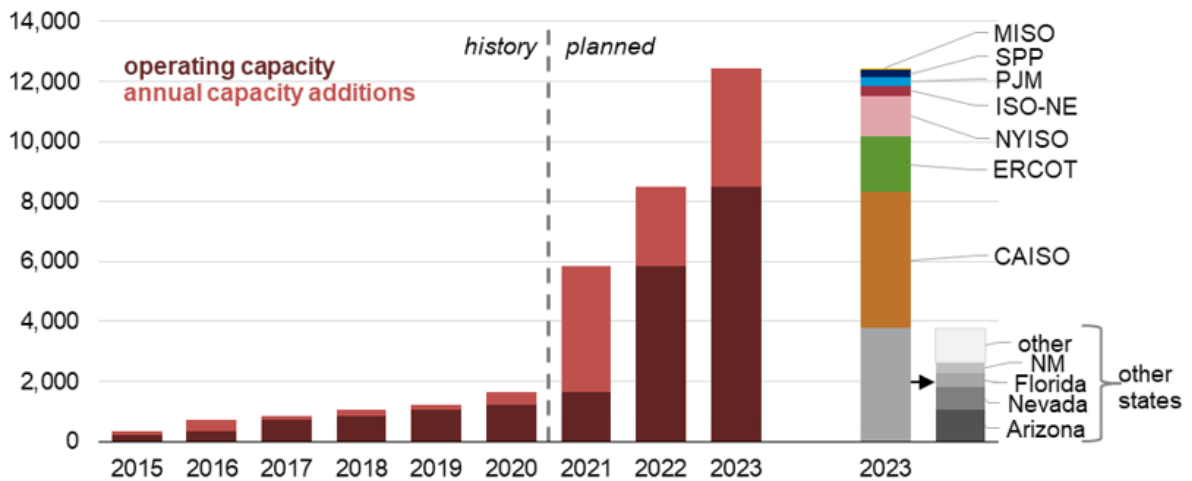
⁴²⁶ https://storage.pardot.com/131501/1678799258s8JG50DV/US_ESM_Q12023_executivesummary.pdf

⁴²⁷ <https://pv-magazine-usa.com/2023/03/15/u-s-energy-storage-capacity-to-increase-nearly-6x-in-five-years/>

⁴²⁸ <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/>



power capacity
megawatts



איור 7: הספק מותקן של סוללות לאגירת חשמל בקנה מידה גדול (מתח עליון) בארה"ב. מבוסס על פרויקטים קיימים, פרויקטים בביצוע ופרויקטים מתוכננים. בברדו ההספק המותקן בתחילת אותה שנה ובאדום התוספת באותה שנה. העמודות משמאל לקו האנכי המקווקו הן של נתונים היסטוריים ומימין הן של תחזיות. בעמודות הצבעוניות מימין פירוט לפי חברות החשמל השונות בארה"ב. **פאנל עליון:** תמונת המצב בתחילת 2020.⁴²⁹ **פאנל תחתון:** תמונת המצב בשנת תחילת 2021.⁴³⁰ שימו לב להבדלים בסקאלות של ציר Y בין שני הפאנלים.

מעניין כי התקנת סוללות לאגירה ברמה הביתית/ דירתית בארה"ב, שבד"כ מצומדת לפאנלים סולאריים על הגג, בינתיים לא נפגעה מהקשיים הכלכליים והיא צומחת בקצב אקספוננציאלי של כ-40% בשנה בשנים האחרונות, כולל ב-2022 בה הותקנו כמעט 600 MW. גם ברמה הקהילתית, מסחרית ותעשייתית יש עליה בהתקנות השנתיות, אם

⁴²⁹ https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/pdf/battery_storage.pdf
⁴³⁰ <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/>

כי עליה זו מתונה יותר. תחזיות מעודכנות צופות כי בסוף 2027 תהיה בארה"ב פי 7 אגירה בסוללות בכל הרמות במצטבר (~85,000 MW) לעומת המצב בסוף 2022^{431 432}.

מספרים אלו ממחישים את האמון שחברות חשמל ריכוזיות, עסקים ותושבים שרשת החשמל שלהם קרסה, נותנים באגירת אנרגיה וברשת מבוצרת. כמו כן, הם ממחישים את המהירות הגבוהה בה ניתן לגבות את רשת החשמל באמצעות אגירת אנרגיה ואת המהירות בה ניתן להפוך רשת ריכוזית פגיעה לרשת מבוצרת וחסונה יותר, הודות למודולריות ולמחיר התחרותי של אגירת אנרגיה מודרנית. מכון המחקר הפדרלי האמריקאי (US National Renewable Energy Laboratory) מצא במחקר מינואר 2022 כי ניתן לשלב הספקים גדולים של אנרגיות מתחדשות ברשת באמצעות שילוב של אגירת חשמל בהיקפים גדולים, ואף לעבור לרשת חשמל המסתמכת בעיקר על אנרגיות מתחדשות, אגירת אנרגיה וללא שימוש בדלקי מאובנים⁴³³.

נתון מעניין נוסף הוא הפופולריות העצומה לה זוכה הטנדר החשמלי החדש של חברת פורד - F150 Lightning ששיווקו החל בשנת 2022. חברת פורד סגרה כבר ב-2021 את האפשרות לבצע הזמנה מוקדמת של הרכב לפני ששיווקו החל כאשר מספר ההזמנות הגיע ל-200,000 רכבים בארה"ב. עפ"י מספר רב של דיווחים, אחד המאפיינים של הרכב שהכי משך קונים, הוא היכולת של הרכב לספק חשמל בחירום לבית למשך 10-3 ימים^{434 435 436 437 438 439 440}.

במהלך הוריקן איאן ב-2022, ידוע על לפחות מקרה אחד בו רכב שכזה אכן סיפק חשמל לבית אשר איבד את אספקת החשמל שלו בעקבות פגיעת ההוריקן⁴⁴¹. באופן מוגבל יותר, סיפקו רכבי פורד F150 היברידיים חשמל חלקי לחימום בתים במהלך סופת החורף הקיצונית בטקסס ב-2021⁴⁴².

הרכב אף יכול לאפשר לבעליו לאגור חשמל כאשר תעריך החשמל נמוך (או מפאנלים סולאריים) ולספק חשמל זול לבית כאשר מחיר החשמל ברשת גבוה - בדומה לסוללה ביתית. שימוש שכזה עשוי לסייע לרשת להסיט יצור חשמל מהצהרים או מהלילה בהם יש חשמל זול בשפע, אל שעות אחה"צ והערב בהם החשמל נמצא במחסור והוא יקר⁴⁴³.

⁴⁴⁴. רגולציה ותמריצים מתאימים יכולים למנף את היכולות החדשות הללו של רכבים חשמליים, שאינם קיימים ברכבים מונעי דלקי מאובנים, לשם הגברת החוסן האנרגטי הלאומי.

⁴³¹ https://storage.pardot.com/131501/1678799258s8JG50DV/US_ESM_Q12023_executivesummary.pdf

⁴³² <https://pv-magazine-usa.com/2023/03/15/u-s-energy-storage-capacity-to-increase-nearly-6x-in-five-years/>

⁴³³ <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80688.pdf>

⁴³⁴ <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2022/02/02/f-150-lightning-power-play.html>

⁴³⁵ <https://www.barrons.com/articles/ford-stock-f150-lightning-ev-51652879404>

⁴³⁶ <https://www.topspeed.com/why-the-ford-f-150-lightning-is-the-best-electric-truck-you-can-buy/#propower-onboard-with-9-6-kw-of-power>

⁴³⁷ <https://www.forbes.com/wheels/features/10-things-f-150-lightning-pickup/>

⁴³⁸ <https://www.makeuseof.com/how-ford-f150-lightning-power-your-home/>

⁴³⁹ https://www.greencarreports.com/news/1132334_ford-f-150-lightning-home-backup-power-what-tesla-powerwall

⁴⁴⁰ <https://www.motortrend.com/features/2022-ford-f-150-lightning-home-power/>

⁴⁴¹ <https://cleantechnica.com/2022/10/02/ford-f-150-lightning-powers-florida-mans-cooking-lights-fridge-entertainment-during-hurricane-ian/>

⁴⁴² <https://www.motortrend.com/features/2022-ford-f-150-lightning-home-power/>

⁴⁴³ <https://www.makeuseof.com/how-ford-f150-lightning-power-your-home/>

⁴⁴⁴ https://www.greencarreports.com/news/1132334_ford-f-150-lightning-home-backup-power-what-tesla-powerwall

לפעמים, לא צריך ללכת רחוק בשביל להגיע לתובנות מרחיקות לכת. מקרה הבוחן הכי משכנע על כך שרשת חשמל מבזרת חסינה אנרגטית בכמה וכמה רמות לעומת רשת חשמל ריכוזית, נמצא בחצר האחורית שלנו- ברצועת עזה. בעזה, מתרחשת בעשור האחרון אבולוציית חוסן אנרגטי "ספונטנית" ולא מתוכננת בעקבות העימותים בין ישראל, הממשלה הפלסטינית (הפתח) ומצרים- לבין החמאס, אשר במרכזה ירידה דרמטית בהסתמכות על רשת חשמל ריכוזית ועליה דרמטית בהסתמכות על רשתות חשמל מבזרות.

רצועת עזה היא דוגמה לשטח שנקודת המוצא שלו היא תלות אנרגטית מוחלטת בגורמים חיצוניים. עד לפני עשור, רוב צריכת האנרגיה של עזה הייתה נתונה בידי ישראל: ישראל סיפקה לה 60% מצריכת החשמל, וסיפקה לה את כל הדלקים להפעלת תחנת הכוח בעזה שייצרה 30% מצריכת החשמל; כאשר מצרים סיפקה לעזה כ-10% מצריכת החשמל⁴⁴⁵.

מאז 2005 מתקיים בין ישראל לרצועת עזה מצב לחימה בעצימויות משתנות, אשר כולל פגיעות פיזיות (מכוונות ולא מכוונות, משני הצדדים) בסקטור האנרגיה של רצועת עזה, צמצום מכוון באספקת החשמל מישראל לרצועת עזה, וצמצום באספקת דלקים נזליים לייצור חשמל (בתחנת הכוח ובגנרטורים) מישראל לרצועת עזה⁴⁴⁶.

כמו כן, מאז החמאס ביצע הפיכה צבאית והדיח את שלטון הפתח הפלסטיני ברצועת עזה ב-2006, גם החמאס וממשלת הפתח הפלסטינית (אשר יושבת ביהודה ושומרון) נמצאים בעימות. כחלק מהעימות, הממשלה הפלסטינית אשר עדיין משלמת לישראל על החשמל המוזרם לרצועת עזה, הודיעה ב-2017 לישראל כי היא מצמצמת את התשלום על חשמל המסופק לרצועת עזה, וכך בפועל צמצמה את אספקת החשמל לעזה כמנוף לחץ על החמאס⁴⁴⁷.

בנוסף, מצרים סובלת מחוסר יציבות והתעצמות טרור בחצי האי סיני, כאשר חלק מהגורמים לכך הם פעילות ארגוני הטרור של רצועת עזה במרחב. לכן, גם מצרים מפעם לפעם פוגעת באספקת האנרגיה לרצועת עזה- אם דרך צמצום באספקת החשמל לרצועה ואם בסיכול הברחות דלקים בגבול ממצרים לרצועת עזה. צמצום העברת הדלקים לרצועה מעלה את מחיר הדלקים ברצועה, מצמצם את היקף יצור החשמל הריכוזי ברצועה ומצמצם את ייצור החשמל הפרטי באמצעות גנרטורים^{448 449}.

בעזה גידול אוכלוסין שנתי בקצב של 2.7% וצפיפות אוכלוסייה מהגבוהות בעולם⁴⁵⁰. למרות זאת, בשל הבידוד הבינלאומי של שלטון החמאס ברצועה ובשל מצור ישראלי ומצרי על אספקת חומרי גלם ומוצרים רבים לרצועה- אין

⁴⁴⁵ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁴⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁴⁷ <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-022-00343-7>

⁴⁴⁸ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁴⁹ https://web.archive.org/web/20170322142754/https://www.ochaopt.org/documents/ocha_opt_electricity_factsheet_march_2014_english.pdf

⁴⁵⁰ <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-022-00343-7>

הגדלה של כושר ייצור החשמל הריכוזי בה. כתוצאה מכך, כושר ייצור החשמל הריכוזי ברצועת עזה הוא רק כ-40% (180MW) מהביקוש (450MW), וחשמל מסופק לתושבים במשך 4-14 שעות ביממה בלבד (ראו איור 8). כך, הפכו סקטור האנרגיה בכלל וסקטור החשמל בפרט ברצועת עזה לחסרי חוסן אנרגטי ^{451 452 453}.

עד לפני כמה עשרות שנים, באזורים בהם לא הייתה קיימת רשת חשמל ריכוזית, לא היה חשמל. בהמשך, רק אנשים בעלי אמצעים שרצו חשמל יכלו לרכוש גנרטורים מונעים בדלקים נוזליים, אולם גם הם הסתמכו על אספקה חיצונית קבועה ויציבה של דלק לשם ייצור ושימוש בחשמל. לכן, שימוש בחשמל באזורים שכאלו היה נדיר, או שמור לאזורים נידחים במדינות מפותחות.

אולם, מחירי פאנלים סולאריים יורדים באופן עקבי בעשורים האחרונים עם הבשלת הטכנולוגיה והגדלת כושר הייצור שלהם. כך, הם השלימו בעשור האחרון ירידה של 90% ממחירם בתחילת העשור הקודם (ראו איור 8) וכעת עלותם מאפשרת ייצור חשמל זול, ללא תלות באספקת דלק חיצונית יציבה, בכל מקום בו זורחת שמש. במקביל גם מחירי סוללות לאגירת חשמל ירדו בכ-90% בעשור האחרון ^{454 455}.

מחקר ישראלי מצא כי בין 2012-2019, צמח סקטור החשמל הפוטו-וולטאי ברצועת עזה מאפס באופן אקספוננציאלי, ל-8,760 אתרים, או 200,000 מ"ר של פאנלים, 25% מכלל ייצור החשמל ברצועת עזה. קצב הגידול במספר האתרים הפוטו-וולטאים גדל ב-250% בין 2018-2019 ובאותו סדר גודל גדל גם היקף הייצור היומי הממוצע בחשמל פוטו-וולטאי (ראו איור 8) ⁴⁵⁶. לשם השוואה, ישראל ייצרה רק 5.8% מהחשמל שלה מאנרגיות מתחדשות בסוף 2019 ⁴⁵⁷.

באיור 8 ניתן לראות כי התקנות הפאנלים הסולאריים מתחילות בין 2012-2014 רק לאחר הירידה הדרסטית במחיר הפאנלים הסולאריים בין 2010-2012 ולאחר התדרדרות באספקת החשמל מהרשת המרכזית, אשר מקושרת לתדירות העימותים בין ישראל לחמאס. התקנת הפאנלים מתעצמת עם המשך ירידת המחיר שלהם, עם המשך האירועים הביטחוניים והעדר האמינות של רשת החשמל המרכזית (2015-2019).

⁴⁵¹ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁵² <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁵³ https://web.archive.org/web/20170322142754/https://www.ochaopt.org/documents/ocha_opt_electricity_factsheet_march_2014_english.pdf

⁴⁵⁴ <https://www.sp-interface.com/2021-ng-economy>

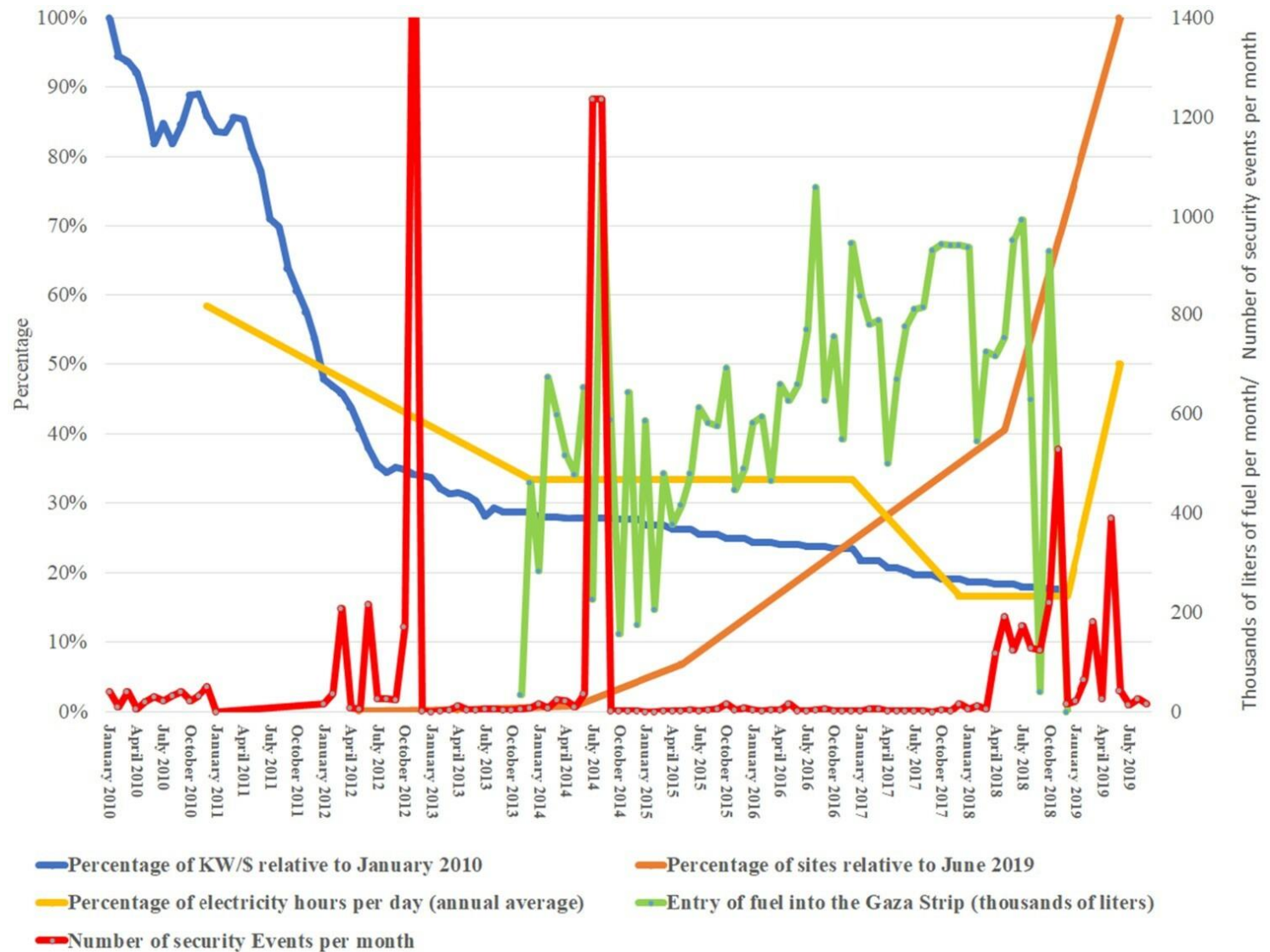
⁴⁵⁵ <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁵⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁵⁷ https://www.gov.il/BlobFolder/generalpage/dochmeshek/he/Files_Netunei_hashmal_doch_reshut_hasmal_2020_malle_n.xlsx.pdf

איור 8: השפעת מחירי פאנלים סולאריים, מצב בטחוני וגישה לחשמל על מספר מתקנים פוטו-וולטאיים ברצועת עזה 2010-2019. ציר X- חודש ושנה. ציר Y שמאלי- אחוזים. ציר Y ימני- אלפי ליטרים דלק בחודש; וגם מספר אירועים ביטחוניים בחודש. כחול- מחיר פאנלים סולאריים (\$/kW) יחסית למחיר בינואר 2010 (ציר Y שמאלי); צהוב- ממוצע שנתי של אחוז שעות ביממה עם אספקת חשמל מרכזית (ציר Y שמאלי); כתום- מספר אתרים פוטו-וולטאיים יחסית ליוני 2019 (ציר Y שמאלי); אדום- מספר אירועים ביטחוניים חודשי בגבול ישראל-עזה (ציר Y ימני); ירוק- אלפי ליטרים של דלק שנכנסו לרצועת עזה בחודש (ציר Y ימני).

מקור: Itay Fischhendler, Lior Herman & Lioz David (2022) *Light at the End of the Panel: The Gaza Strip and the Interplay Between Geopolitical Conflict and Renewable Energy Transition*, *New Political Economy*, 27:1, 1-18, DOI: [10.1080/13563467.2021.1903850](https://doi.org/10.1080/13563467.2021.1903850)



יש לשים לב כי ב-2019, רוב המערכות הפוטו-וולטאיות בעזה היו מנותקות מרשת החשמל הראשית (off-grid), 96% מהן היו על גגות, רובן היו פרטיות והן היו מוקמות בעיקר בערים, בפרברים ובמחנות הפליטים. זאת, בניגוד למצב ברוב העולם, בו עשרות אחוזים ואפילו רוב החשמל הפוטו-וולטאי המיוצר מקורו בשדות סולאריים קרקעיים גדולים. נתונים אלו תומכים בסברה שהסיבות העיקריות לצמיחה בחשמל פוטו-וולטאי ברצועת עזה הן העדר החוסן האנרגטי והצניחה במחירי פאנלים סולאריים, ולא שיקולים אחרים (סביבתיים, השקעות יזמיות). אם כי, כרגע לא ניתן לשלול השפעה של העדר שטחים פתוחים ברצועת עזה המגבילה הקמת שדות סולאריים קרקעיים⁴⁵⁸.

כך, במציאות של העדר חוסן אנרגטי, מתפתחת לה ברצועת עזה באופן אורגני וללא תכנון מרכזי, רשת חשמל מבוזרת וחסונה המפוזרת בכל הרצועה (ראו איור 9), המבוססת חשמל פוטו-וולטאי וסוללות, שמחפה על העדר חוסן אנרגטי של רשת החשמל הריכוזית. זאת, למרות כוחות שבולמים הקמת פרויקטים של אנרגיות מתחדשות באזורי עימות, כמו מחסור בהשקעות, אינפלציה, צמיחה שלילית או נמוכה, דיכוי מסחר, דיכוי בהקמת תשתיות, פגיעה במטבע המקומי ולכן עלייה בעלויות יבוא, העדר רגולציה, חוסר בטחון בהחזר ההשקעה, משטר חלש ועוני שמגבירים גניבה⁴⁵⁹.

בעוד ישראל מקשה על מעבר מוצרים וחומרי גלם לרצועת עזה שעלולים לשמש לטרור, היא מנסה לתמוך בדרכים להקלת המשבר ההומניטרי בעזה, לא רואה בפאנלים סולאריים איום ולכן מאפשרת העברתם לרצועה. כמעט כל הפרויקטים הסולאריים ברצועת עזה נתמכים בדרך זו או אחרת ע"י תורמים חיצוניים, לעיתים עד 50% מעלות המערכות⁴⁶⁰. נציין גם כי כמו בישראל, גם ברצועת עזה נפוץ חימום מים סולארי מבוזר בבתים באמצעות דודי שמש

.⁴⁶¹

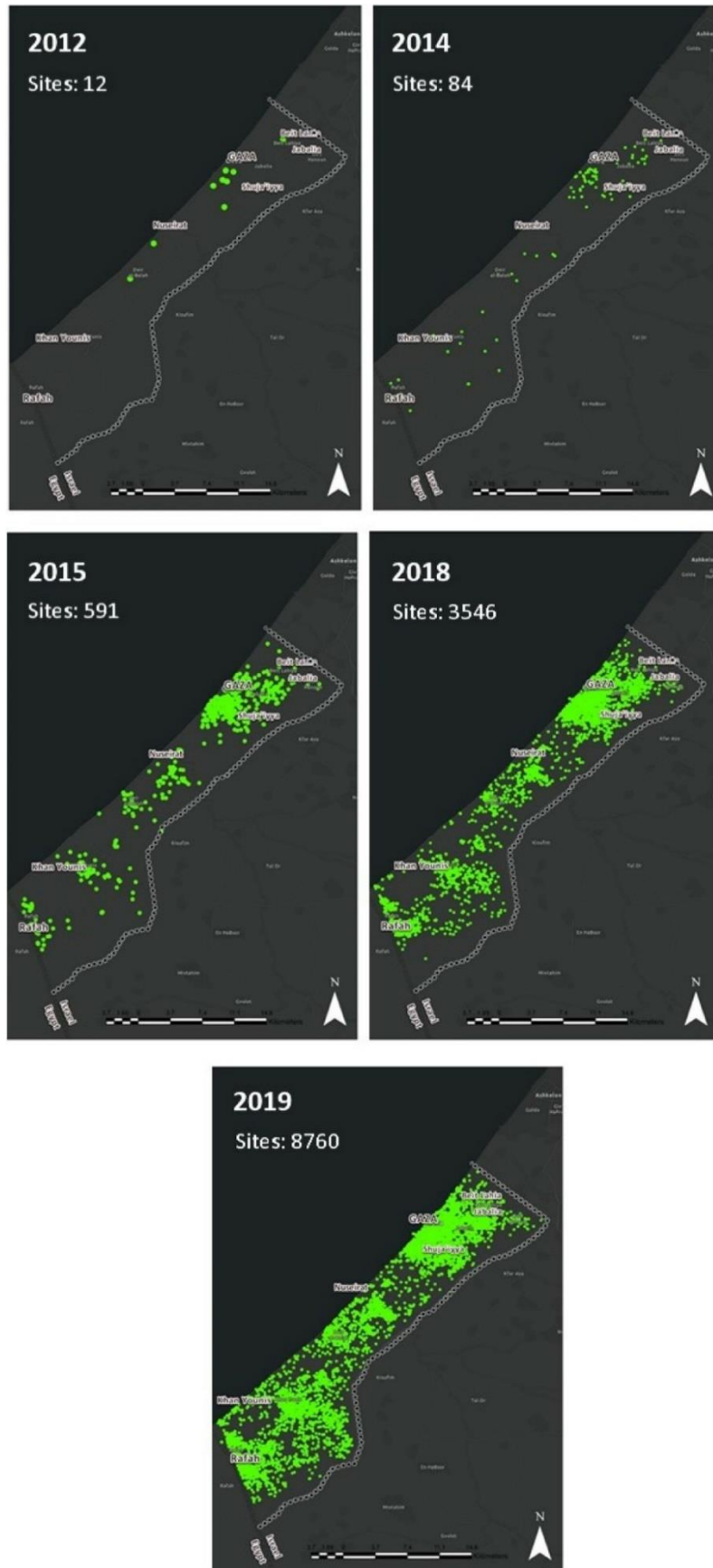
⁴⁵⁸ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁵⁹ <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁶⁰ <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/13563467.2021.1903850>

⁴⁶¹ <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-022-00343-7>

סולאריות ברצועת עזה
2019. כל נקודה ירוקה
במרחב רצועת עזה.



איור 9: הקמת מערכות
בין השנים 2012-
מייצגת מתקן סולארי
מקור: 462

⁴⁶² <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563467.2021.1903850>

אוסטרליה היא מדינה פדרלית, עם 8 מדינות וטריטוריות, בה חיים 26 מיליון איש (פי 3 מאשר ישראל) על שטח של 7.7 מיליון קמ"ר (פי 385 משטח ישראל)⁴⁶³. במשך העשור האחרון, ממשלה פדרלית אוסטרלית שמרנית התנגדה באופן אקטיבי ליישום אנרגיות מתחדשות וטכנולוגיות נלוות (רכבים חשמליים) בתקופת שלטונה בין 2013-2022, מתוך רצון להגן על סקטור דלקי המאובנים הגדול באוסטרליה (פחם, גז טבעי), שמהווה מרכיב חשוב בסקטור האנרגיה של המדינה וכן בייצוא⁴⁶⁴. למרות זאת, מספר מדינות באוסטרליה הצליחו לקדם אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה באופן מרשים אפילו בפרספקטיבה עולמית. פעולות אלו ברמה המדינתית והלא פדרלית, הצליחו אפילו להביא את אוסטרליה כולה להישגים עולמיים.

לדוגמה, ב-2022 אוסטרליה יצרה בקיץ האוסטרלי האחרון (שנגמר בפברואר 2023), 14% מכל החשמל האוסטרלי יוצר ע"י מערכות סולאריות על גגות, יותר מאשר סקטור הפחם וסקטורים אחרים של אנרגיות מתחדשות (רוח, סולארי קרקעי, הידרואלקטרי, ביומסה). באוסטרליה מעל 3.4 מיליון מערכות סולאריות על מבני מגורים בהספק כולל של מעל 20 GW, והיא מובילה את העולם מבחינת הספק מותקן של פאנלים סולאריים על מבני מגורים פר תושב^{465 466}.

דוח מ-2021 חזה כי היקף הספק אגירת האנרגיה בסוללות באוסטרליה יעלה מ-0.5 GW ל-13 GW עד 2030⁴⁶⁷. בינתיים נראה כי התחזית הזאת מתממשת. ב-2022 הותקנו באוסטרליה מעל ל-47,000 סוללות לאגירת אנרגיה ביתית, עליה של 55% לעומת 2021. בסך הכל היו בסוף השנה מעל 180,000 בתים עם סוללות לאגירת אנרגיה באוסטרליה, עם קיבולת כוללת של 2 GWh. קיבולת זו גבוהה ממה שיש בארה"ב (~1.8 GWh), בה חיים פי 13 יותר תושבים⁴⁶⁸. 7% מהמערכות הסולאריות שהותקנו על מבנים למגורים באוסטרליה ב-2022 הותקנו כבר עם סוללות לאגירת חשמל, וכן מאז 2020 עלה ממוצע קיבולת הסוללות המותקנות מ~8.5 KWh ל~12.5 KWh⁴⁶⁹.

באוסטרליה, כמו במדינות רבות אחרות, חלק ניכר מהמבנים מחוברים לצנרת של גז טבעי לשם חימום, בישול ותעשייה. למעשה, במדינת ויקטוריה שבאוסטרליה, עד לא מזמן הייתה **חובה** לחבר כל בית מגורים לרשת הגז הטבעי, אשר השימוש המוביל בו היה לחימום מבנים בחורף הקר במדינה⁴⁷⁰.

אולם ב-2022 בוטלה חובה זו, באופן שמשקף את הטרנספורמציה האנרגטית בעולם ובאוסטרליה - כבר לא משתלם כלכלית (ובטוח לא סביבתית) להשתמש בגז טבעי, למרות שהמדינה מפיקה המון גז טבעי. פשוט כי הכי זול לייצר ולצרוך חשמל מתחדש. חקיקה חדשה זו סוללת את הדרך לחישמול מלא של בתים בוויקטוריה⁴⁷¹. באופן דומה,

⁴⁶³ <https://www.britannica.com/facts/Australia>

⁴⁶⁴ <https://www.britannica.com/place/Australia/Power-and-resources>

⁴⁶⁵ <https://www.pv-tech.org/australian-rooftop-solar-exceeded-all-other-renewable-energy-sources-in-record-summer/>

⁴⁶⁶ <https://www.pv-tech.org/australian-rooftop-pv-passes-20gw-of-capacity-utility-scale-forecast-less-sunny-sunwiz/>

⁴⁶⁷ <https://www.pv-magazine.com/2021/05/31/australias-energy-storage-installed-base-to-grow-more-than-five-times-by-2030/>

⁴⁶⁸ https://storage.pardot.com/131501/1678799258s8JG50DV/US_ESM_Q12023_executivesummary.pdf

⁴⁶⁹ <https://onestepoffthegrid.com.au/home-battery-boom-the-who-what-where-and-why-behind-record-storage-numbers/>

⁴⁷⁰ <https://reneweconomy.com.au/victoria-starts-momentous-shift-from-dirty-and-expensive-gas-but-is-it-quick-enough/>

⁴⁷¹ <https://reneweconomy.com.au/victoria-starts-momentous-shift-from-dirty-and-expensive-gas-but-is-it-quick-enough/>

המועצה האוסטרלית הלאומית לאנרגיה נקייה קבעה ב-2021 כי אין רציונל כלכלי לבנות תחנות גז פיקריות, כאשר קיימת חלופה כלכלית וסביבתית יותר כמו סוללות לאגירת אנרגיה ⁴⁷².

הממשלה הפדרלית החדשה שנבחרה לפני כשנה, פועלת במרץ לצמצום פליטות גזי חממה, לקידום אנרגיות מתחדשות, אגירת אנרגיה, חישמול, פעילות לאדפטציה לשינוי אקלים, וחדשנות אקלים בכל המדינה ^{473 474 475}.

6.6.1 דרום אוסטרליה

דרום אוסטרליה היא מדינה באוסטרליה, עם כ-2 מיליון תושבים (פי 4.5 פחות מאשר בישראל) ושטח של כמיליון קמ"ר (פי 50 לעומת ישראל). האקלים בה דומה לישראל, אם כי צחיח בשיעור נרחב יותר משטח המדינה. היא מובילה את העולם ביישום של אנרגיות מתחדשות מודרניות, כאשר עברה מ-1% אנרגיות מתחדשות מודרניות (שמש ורוח) ברשת החשמל שלה לפני 16 שנה, ליותר מ-70% ב-2022, ואפילו כ-1% מהחשמל סופק מסוללות לאגירת אנרגיה. המדינה סגרה את תחנת הכוח הפחמית האחרונה שלה ב-2016, רוב שאר החשמל שלה מסופק באמצעות גז טבעי, ויש קצת יבוא ויצוא חשמל לפי הצורך למדינת ויקטוריה השכנה. בחצי מהימים ב-2021, 100% מצריכת החשמל נענתה באמצעות אנרגיות מתחדשות- זאת הודות לתמהיל כמעט מושלם של ייצור אנרגיה סולארית ביום ואנרגיית רוח בלילה (ראו

⁴⁷² https://www.energy-storage.news/no-longer-economically-rational-to-build-gas-peakers-in-australia/?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

⁴⁷³ <https://www.energy.gov.au/news-media/news/australia-leads-world-rooftop-solar-share-renewables-jumps-35>

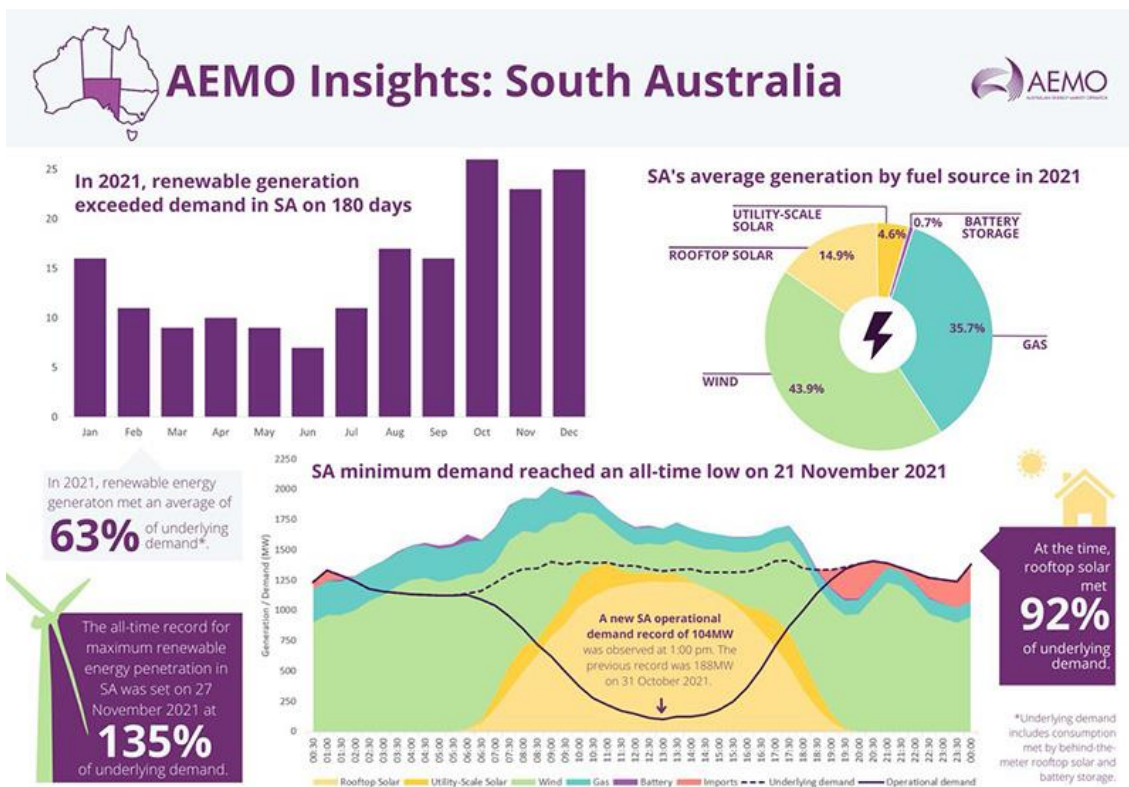
⁴⁷⁴ <https://www.globalaustralia.gov.au/industries/net-zero>

⁴⁷⁵ <https://www.energy-storage.news/major-breakthrough-australias-support-for-energy-storage-tackles-key-electricity-policy-issue/>

המדינה מתכננת להגיע ל-85% ו-100% נטו חשמל מתחדש ב-2025 וב-2030 בהתאמה. יותר מכך, היא מתכננת לייצר פי 5 חשמל מתחדש ב-2050 לעומת כושר הייצור כולו כיום, ואת החשמל העודף לייצא בצורת חשמל (כמו התוכנית לייצא חשמל מתחדש לסינגפור באמצעות כבל תת ימי), מימן ירוק וסחורות (למשל, לייצא פלדה מוכנה במקום עפרת ברזל) ⁴⁷⁸.

בכך, דרום אוסטרליה תיישם מדיניות וחזון של מעצמת אנרגיה מתחדשת שתאפשר לה לייצר חשמל זול ואפילו כמעט בחינם, תוך יצירת מקומות עבודה ורווחה לתושביה, ותפתח אפשרויות שלא קיימות כיום. תחשבו על מעצמות דלקי מאובנים כמו נסיכויות המפרץ, רק בלי הזיהום. כמו כן, כאשר רוב המדינות בעולם יסתמכו על אנרגיות מתחדשות ויפסיקו להיות תלויות ביבוא דלקי מאובנים, יבוטל גם הכוח הגיאופוליטי המשחית של מדינות או חברות דלקי מאובנים. מכיוון שניתן להפיק אנרגיות מתחדשות בכל מדינה, הכוח הגיאופוליטי המשחית של אנרגיה יצטמצם ואף יעלם ⁴⁷⁹.

480



איור 10: ייצור חשמל בדרום אוסטרליה ב-2021. ציר X- השעה ביממה. מקורות החשמל: ירוק- רוח, צהוב בהיר- גגות סולאריים, צהוב כהה- סולארי קרקעי, תורכיז- גז טבעי, סגול- סוללות. מקור: (AEMO) Australian Energy Market Operator ⁴⁸¹.

⁴⁷⁶ <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/modern-energy/leading-the-green-economy>

⁴⁷⁷ <https://reneweconomy.com.au/south-australias-stunning-renewable-energy-transition-and-what-comes-next-79597/>

⁴⁷⁸ <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/modern-energy/leading-the-green-economy>

⁴⁷⁹ <https://www.rethinkx.com/energy-reports>

⁴⁸⁰ <https://www.rethinkx.com/humanity>

⁴⁸¹ <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/modern-energy/leading-the-green-economy>

דרום-אוסטרליה מובילה את העולם ביישום פאנלים סולאריים דו-שימושי לנפש בכלל, ועל גגות בפרט, כאשר על 45% מגגות הבתים באוסטרליה יש פאנלים סולאריים ⁴⁸². במשך שעות הצהרים של ה-21.11.2021 פאנלים סולאריים סיפקו מעל 90% מצריכת החשמל במדינה (ראו

איור 10). המדינה מובילה בהתקנת סוללות לאגירה ביתית ⁴⁸³, ואף עמלה על הקמת תחנת הכוח הווירטואלית הגדולה בעולם באמצעות חיבור באמצעות תוכנה של 50,000 בתים עם מערכות פאנלים סולאריים ו/או סוללות ⁴⁸⁴.

יש לציין, כי המהפך האנרגטי בדרום אוסטרליה מרשת ריכוזית אשר הסתמכה באופן בלעדי על דלקי מאובנים אל רשת מבוזרת מבוססת מתחדשות, אינו חף מאתגרים. הרשת נמצאת כיום במצב בו יש הרבה יצור אנרגיות מתחדש מבוזר, אבל אין עדיין מספיק יכולת בקרה של החברה המנהלת את הרשת על אמצעי יצור מבוזרים אלו. המשמעות היא שכאשר יש עודף יצור לעומת הצריכה, אי אפשר להורות לאותם אמצעי יצור מבוזרים להפסיק להזרים חשמל לרשת, כמו שניתן להורות למתקני יצור גדולים (קונבנציונליים או מתחדשים), ורכיבים ברשת עשויים להיפגע ⁴⁸⁵.

⁴⁸² <https://www.pv-magazine.com/2023/03/01/australian-rooftop-solar-capacity-hits-20-gw/>

⁴⁸³ <https://onestepoffthegrid.com.au/home-battery-boom-the-who-what-where-and-why-behind-record-storage-numbers/>

⁴⁸⁴ <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/modern-energy/leading-the-green-economy>

⁴⁸⁵ <https://reneweconomy.com.au/give-us-more-load-why-south-australia-is-trying-to-switch-off-everyones-rooftop-solar/>

המדינה צפתה את הבעייתיות הזאת והכניסה לאחרונה דרישה כי כל הממירים החדשים של מערכות סולאריות לגגות יהיו ניתנים לשליטה מרחוק ע"י החברה המנהלת את הרשת, ויש שקוראים לפתח מערכות משלימות שיותקנו על מערכות קיימות של פאנלים סולאריים על גגות ויאפשרו שליטה שכזו⁴⁸⁶. אולם, במצב שכזה עשוי להגרם בזבוז גדול של חשמל. פתרון מוצלח יותר לבעיה זו, שגם יהפוך את רשת החשמל לחסינה כמעט לחלוטין, הוא הגדלת המתקנים לאגירת אנרגיה במדינה, שיוכלו לאגור חשמל עודף שמוצר ולשחרר אותו לרשת לפי הצורך מאוחר יותר.

אמנם, כפי שכבר הוזכר, דרום אוסטרליה מובילה את העולם בשילוב מתקני אגירת אנרגיה ואף ביצירת תחנות כוח וירטואליות, אבל עדיין אין לה מספיק מהם, והרשת עדיין נשענת על מאפיינים של רשת ריכוזית שמונעים ממנה מלהפוך לחסינה באמת.

הרשת של דרום אוסטרליה מחוברת בקו הולכה אחד במתח עליון אל הרשת של מדינת ויקטוריה השכנה. קו זה מאפשר יצוא חשמל לוויקטוריה במקרים של יצור חשמל עודף (עודף יצור חשמל סולארי בצהרים או רוח בלילה), ומאפשר יבוא חשמל במידה וכושר הייצור בדרום אוסטרליה נמוך מהדרוש. זהו מאפיין של רשת ריכוזית, שמשפר את הגמישות בהפעלת הרשת בדרום אוסטרליה ומונע ממנה מלהיות אי אנרגטי, אבל עדיין מדובר על קו אחד בלבד שמקטין את פגיעות רשת החשמל במידה מוגבלת בלבד⁴⁸⁷.

ואכן, בנובמבר 2022 קרס קו המתח העליון המחבר בין דרום-אוסטרליה לוויקטוריה במהלך סופה, כהמחשה לשבריריותה של רשת ריכוזית^{488 489}. לא היה ניתן לייצא את עודף החשמל הסולארי שיוצר בשעות היום במדינה, והייתה סכנה שרשת החשמל תיפגע. החברה המנהלת את הרשת כיבתה כ-300 MW של גגות סולאריים המצוידים בממירים החדשים שמאפשרים שליטה מרחוק, כיבתה מתקני אנרגיות מתחדשות גדולים וקראה לכל הצרכנים להשתמש בכמה שיותר חשמל. בסופו של דבר נמנע נזק לרשת, אבל המקרה המחיש כי עוד יש כברת דרך להפיכת הרשת לכזו שיכולה להכיל אנרגיות מתחדשות מודרניות ללא חשש⁴⁹⁰.

בשביל לצמצם את נקודת התורפה הזו, המדינה החלה כבר קודם לכן לעבוד על חיבור שני של רשת החשמל שלה לזו של מדינת ניו-סאות' וויילס הסמוכה, בנוסף לחיבור למדינת ויקטוריה; על הגדלת יכולת אגירת האנרגיה שלה; על יכולתה לשלוט מרחוק בגגות סולאריים; והנהגת תעריף דינמי למכירת חשמל מיצרנים (ראו 2.2.2.3) לרשת (יעודד אגירת חשמל בצהרים ומכירה שלו לרשת בערב או בבוקר, כמו שמקודם כיום גם בישראל)^{491 492 493 494 495}.

⁴⁸⁶ <https://reneweconomy.com.au/give-us-more-load-why-south-australia-is-trying-to-switch-off-everyones-rooftop-solar/>

⁴⁸⁷ <https://reneweconomy.com.au/give-us-more-load-why-south-australia-is-trying-to-switch-off-everyones-rooftop-solar/>

⁴⁸⁸ <https://www.abc.net.au/news/2022-11-15/renewables-switch-off-on-the-cards-as-sa-remains-cut-off/101653744>

⁴⁸⁹ <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/solar/rooftop-solar-in-south-australia-causes-grid-issues/>

⁴⁹⁰ <https://reneweconomy.com.au/give-us-more-load-why-south-australia-is-trying-to-switch-off-everyones-rooftop-solar/>

⁴⁹¹ <https://reneweconomy.com.au/give-us-more-load-why-south-australia-is-trying-to-switch-off-everyones-rooftop-solar/>

⁴⁹² <https://www.aemo.com.au/-/media/files/learn/fact-sheets/minimum-operational-demand-factsheet.pdf?la=en>

⁴⁹³ <https://www.pv-magazine-australia.com/2023/03/13/sapn-project-targets-legacy-rooftop-solar-to-help-stabilise-grid/>

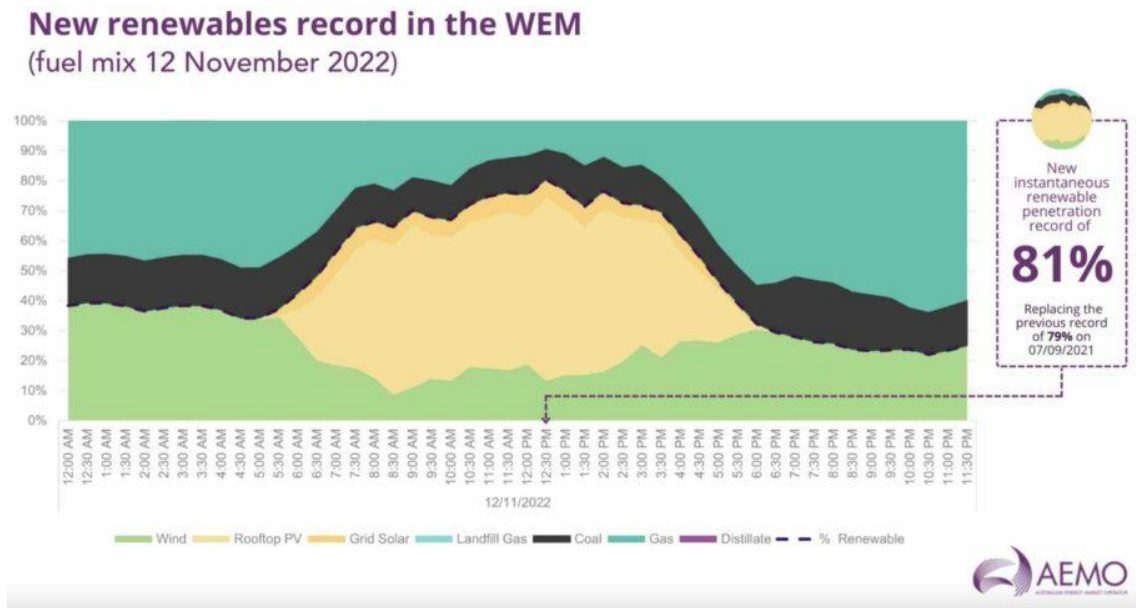
⁴⁹⁴ <https://theconversation.com/4-ways-to-stop-australias-surge-in-rooftop-solar-from-destabilising-electricity-prices-173592>

⁴⁹⁵ <https://reglobal.co/the-solution-to-us-grid-reliability-go-bigger-and-bolder-on-renewables-and-energy-storage/>

6.6.2 מערב אוסטרליה

מערב אוסטרליה היא המדינה הגדולה באוסטרליה, עם שטח של 2.5 מיליון קמ"ר (פי 125 מישראל) וכ-3 מיליון תושבים (פי 3 פחות מאשר ישראל)⁴⁹⁶. למדינה רשת חשמל שמנותקת לחלוטין משאר אוסטרליה והעולם (רשת מבודדת כמו בישראל), בשל המדבר העצום ומיעוט האוכלוסייה שבמרכז היבשת, וברוב שטחי מערב אוסטרליה למעט דרום-מערב המדינה.

אמנם, כבר נקבעו שיאי יצור חשמל מתחדש מודרני בעולם של מעל 100% מצריכת החשמל של אותה מדינה במדינות אשר **מחוברות** לרשת החשמל של שכנותיהן (כמו בדנמרק למשל), כך שהחשמל העודף יכול להיות מיוצא לחו"ל. אולם, לאחרונה קבעה מערב אוסטרליה שיא חדש בשיעור חשמל ממקורות מתחדשים מודרניים ברשת חשמל **מבודדת**, של 81% ב-12.11.2022, כאשר בנוסף במשך 5 שעות באותו יום היקף החשמל המתחדש סיפק למעלה מ-70% מהחשמל במדינה, ולמעלה מ-20% במשך כל היממה (ראו איור 11). כל זאת הושג ללא שבמדינה יש מתקנים לאגירת אנרגיה או חשמל הידרואלקטרי בקנה מידה גדול⁴⁹⁷.



איור 11: ייצור חשמל במערב אוסטרליה ב-12.11.2022. ציר Y- שיעור הספק חשמל, ציר X- השעה ביממה מקורות החשמל: ירוק- רוח, צהוב בהיר- גאות סולאריים, צהוב כהה- סולארי קרקעי, תורכז בהיר- גז מטמנות (ביוגז), שחור- פחם, תורכז כהה- גז טבעי, סגול- תזקיקים נוזליים של נפט וגז. מקור: ⁴⁹⁸ Australian Energy Market Operator (AEMO).

⁴⁹⁶ <https://www.britannica.com/place/Western-Australia>

⁴⁹⁷ <https://reneweconomy.com.au/western-australia-sets-new-renewables-record-of-81-in-worlds-biggest-isolated-grid/>

⁴⁹⁸ <https://reneweconomy.com.au/western-australia-sets-new-renewables-record-of-81-in-worlds-biggest-isolated-grid/>

המדינה מתכננת להקים את מתקן אגירת האנרגיה הגדול הראשון שלה ב-2024, וכבר יש בה למעלה מ-12,000 בתים עם סוללות לאגירת אנרגיה^{500 499}. המדינה החלה בתהליך של ניתוק קהילות מבודדות מרשת החשמל הריכוזית, ויצירת מיקרוגרידים עבורן. זאת בשל חוסר האמינות של הרשת הריכוזית המספקת חשמל לקהילות אלו (שכיחות שריפות שפוגעות ברשת הולכת ועולה עם שינוי האקלים), העלות הגבוהה של תחזוקת הרשת הריכוזית, העלות הנמוכה יותר של הקמת מיקרוגרידים והחוסן האנרגטי המעולה שהם מספקים⁵⁰¹.

בתוכנית, ניתוק מהרשת המרכזית אלפי אתרים אשר כוללים חוות, כפרים, עיירות ומכרות- והקמת כ-6,000 מיקרוגרידים מבוססים בעיקר אנרגיה סולארית, אנרגיית רוח, אגירה בסוללות וגיבוי עם גנרטור זג טבעי/סולר. זהו פרויקט המיקרוגריד הגדול ביותר בעולם, ועד אוקטובר 2022 הושלמו הקמת כ-100 מיקרוגרידים. קדם לפרויקט מחקר שכלל הקמת מיקרוגרידים ב-6 חוות, והושלם ב-2019 לאחר שהראה תועלת גם כלכלית וגם מבחינת אמינות אספקת החשמל לחוות לעומת הרשת הריכוזית⁵⁰².

ב-2021 היכה באזור ציקלון Seroja, וגרם לנזקים כבדים בשטח באורך 700 ק"מ וברוחב 150 ק"מ. 70% מהבתים בעיירות קלבארי ונורת'המפטון נהרסו או ניזוקו באופן כבד, ונתק החשמל ל-30,000 תושבים. 6 החוות שחוברו למיקרוגרידים במסגרת הניסוי ונמצאות באותו אזור, לא איבדו את החשמל אפילו לשנייה. ביטול קווי המתח הארוכים הכלול בפרויקט לא רק במזיל את העלויות לרשת החשמל, אלא גם מצמצם את ההתכנות להצתת שריפות שמקורן ברשת החשמל. הצלחת הפרויקט, בשילוב עליה באירועי קיצון, מעודדת את חברות החשמל במדינות ניו-סאות' וויילס וקווינסלנד לקדם פרויקטים דומים⁵⁰³.

המיקרוגרידים הגדולים שהוקמו בינתיים במערב אוסטרליה כוללים מספר עיירות שהגדולה בהם היא העיירה קלבארי עם מיקרוגריד מתחדש בלבד עם הספק מקסימלי של 5 MW^{504 505 506 507}. המיקרוגריד הגדול ביותר הוא מכרה הזהב אגניו עם הספק מקסימלי של 51 MW (אבל עם הספק ממוצע של 15-20 MW), שיוכל לעבוד עם עד 85% אנרגיות מתחדשות (רוח, שמש וסוללות) ובממוצע 50-60% מתחדשות, והשאר באמצעות גנרטור גז טבעי^{508 509}.

⁴⁹⁹ <https://reneweconomy.com.au/western-australia-sets-new-renewables-record-of-81-in-worlds-biggest-isolated-grid/>

⁵⁰⁰ <https://onestepoffthegrid.com.au/home-battery-boom-the-who-what-where-and-why-behind-record-storage-numbers/>

⁵⁰¹ <https://www.westernpower.com.au/our-energy-evolution/grid-technology/microgrid-technology/>

⁵⁰² <https://www.abc.net.au/news/2022-10-02/thousands-of-renewable-standalone-power-systems-to-be-rolled-out/101479136>

⁵⁰³ <https://www.abc.net.au/news/2022-10-02/thousands-of-renewable-standalone-power-systems-to-be-rolled-out/101479136>

⁵⁰⁴ <https://www.westernpower.com.au/our-energy-evolution/projects-and-trials/kalbarri-microgrid/>

⁵⁰⁵ <https://www.pv-magazine.com/2022/02/04/australias-largest-microgrid-goes-online/>

⁵⁰⁶ <https://www.canarymedia.com/articles/clean-energy/a-renewable-and-battery-only-microgrid-the-holy-grail-of-clean-energy>

⁵⁰⁷ <https://www.westernpower.com.au/our-energy-evolution/projects-and-trials/perenjori-network-battery/>

⁵⁰⁸ <https://reneweconomy.com.au/australias-biggest-renewable-microgrid-powers-gold-mine-up-to-85/>

⁵⁰⁹ <https://arena.gov.au/projects/agnew-renewable-energy-microgrid/>

במערב אוסטרליה מתוכנן להתחיל לפעול ב-2023 הפיילוט הראשון של מיקרוגרید מבוסס מימן ירוק שיוצר מחשמל סולארי ורוח ^{510 511 512 513}, אולם כיום נראה שמיקרוגרید שכזה נחות לעומת מיקרוגרید מבוסס מתחדשות וסוללות. זאת בשל היעילות האנרגטית הנמוכה של יצור ושימוש במימן, הקושי והעלות הכרוכה באחסנו, והסיכון בשימוש במימן. למימן יתרון על פני סוללות ליתיום כי ניתן לאחסן אותו למשך זמן רב בעוד סוללות ליתיום פורקות את החשמל האצור בהן עם הזמן. אולם, יש מגוון של פתרונות אגירה אחרים שלא מאבדים אנרגיה לאורך זמן כמו סוללות אבץ-ברום, סוללות ברזל אוויר, ועוד.

בהמשך למגמה של התנתקות מגז טבעי אשר הוזכרה קודם לכן לגבי מדינת ויקטוריה, עיירה שלמה במערב אוסטרליה מתנתקת לחלוטין מאספקת גז טבעי- לא בגלל שיקולים סביבתיים, אלא בגלל שיקולים כלכליים בלבד. חברת הגז ששרתת את העיירה אספרנס הודיעה כבר ב-2021 כי היא לא יכולה יותר להרוויח מאספקת גז טבעי לעיירה, והרשויות החלו בתמיכה כספית בתושבים ובעסקים למעבר לחלופות לשימוש בגז טבעי. רוב התושבים והעסקים שעוד השתמשו בגז, עוברים לחישמול מלא, וניתוק סופי של העיירה מגז צפוי ב-2023. ישובים וחברות אנרגיה נוספים באוסטרליה מתכננים ניתוקים נוספים ⁵¹⁴.

כמו במקרים אחרים בעולם, הצלחות אלו של דרום אוסטרליה ומערב אוסטרליה מוכיחות כי טענות של מומחים בתחום החשמל כי רשת חשמל (כולל כזו מבודדת כמו בישראל) לא יכולה להישאר יציבה עם יותר מ-30% חשמל מתחדש מודרני, פשוט שגויות. כמו כן, ראוי לציין שלמרות שבשתי המדינות הללו אין כלל מגבלות של שטחים פתוחים (כמו שיש בישראל), מעל 80% מהחשמל הסולארי שלהם מקורו במערכות סולאריות קטנות ומבזרות על גגות ורק מיעוטו ממתקנים סולאריים קרקעיים בינוניים וגדולים.

7 חוסן אנרגטי ויציאה למכרז רביעי של חיפוש גז טבעי בים התיכון

על פי הידע המדעי, ההנדסי, הגיאופוליטי והבטחוני אשר נותח בפרקים הקודמים, ניכר כי תוספת של מספר מתקני אנרגיה אסטרטגיים בודדים, או אפילו עשרות מהם, עשויה להעלות את החוסן האנרגטי ה**בסיסי** של רשת חשמל ריכוזית בהיקף מצומצם. היקף זה מאפשר להקנות חוסן אנרגטי **בסיסי** בשגרה. זאת אומרת, תוספת כזו מסוגלת לספק גיבוי במציאות 'נורמלית', שבישראל כוללת מזג אוויר נוח ולא קיצוני במיוחד, או של שגרת עימותים בין ישראל והחמאס הכוללת מטחי רקטות לא מדויקות פעם ב-3 שנים, או של מתקפות סייבר פשוטות.

אולם, תוספת של מספר קטן של מתקנים אסטרטגיים לרשת חשמל ריכוזית לא מסוגלת לספק חוסן אנרגטי **מתקדם** לתרחישים סבירים וצפויים של אסונות טבע גדולים כמו רעידת אדמה ו/או צונאמי. הם גם לא מסוגלים לספק חוסן

⁵¹⁰ <https://www.energymagazine.com.au/wa-to-house-australias-first-renewable-hydrogen-microgrid/>

⁵¹¹ <https://research.csiro.au/hyresource/denham-hydrogen-demonstration-plant/>

⁵¹² <https://www.abc.net.au/news/2022-11-14/green-hydrogen-to-help-power-wa-town-in-renewable-energy-trial/101648728>

⁵¹³ <https://renewtheregions.com.au/projects/denham-hydrogen-demonstration-plant/>

⁵¹⁴ <https://onestepoffthegrid.com.au/energy-transition-first-as-entire-town-goes-gas-free-embraces-electrification/>

אנרגטי **מתקדם** במצב של תקיפה נרחבת של איראן ו/או חיזבאללה הכוללת רקטות וטילים מדויקים, כטב"מים, אמצעי תקיפה ימיים, ו/או התארגנות חבלה יבשתית מקומית- כנגד מתקני רשת חשמל ריכוזית בישראל.

לכן, טיעון המדינה כי יציאה למכרז רביעי של חיפוש גז טבעי בים התיכון ישפר את החוסן האנרגטי בישראל הינו שגוי, עלול לטעת תחושת ביטחון מזויפת, עלול למנוע קידום רשת חשמל מבוזרת בעלת חוסן אנרגטי **מתקדם**, ולכן בעקיפין עלול לגרום לפגיעה בחוסן האנרגטי הישראלי.

בנוסף, לאור מלחמת רוסיה- אוקראינה, מדינות רבות (בראש ובראשונה מדינות אירופה) סוף סוף הפנימו כי רשת חשמל ריכוזית מבוססת דלקי מאובנים מיובאים לא רק שאינה חסינה- אלא היא מסוכנת ליציבות של מדינות. לכן הן פועלות בטווח הבינוני והארוך לצמצם את התלות שלהן בדלקי מאובנים מיובאים. המשמעות היא כי בקרוב צפוי כי העולם יגיע לשיא השימוש בגז טבעי, ולאחר מכן יקטן שוק הגז העולמי. במקביל, מדינות מפותחות מצמצמות את השימוש בגז טבעי גם מסיבות אקלימיות (שימוש בגז טבעי אינו מצמצם את פליטות גזי החממה לעומת שימוש בדלקי מאובנים אחרים, עקב פליטות המתאן מסקטור זה), וגם מסיבות כלכליות. אפילו ישראל עצמה צפויה לצמצם את השימוש בגז טבעי מסיבות אלו.

מדינות עולם שלישי מגלות כי הן אינן חייבות לעבור במסלול סקטור החשמל הלינארי של רשת חשמל ריכוזית מבוססת נפט -> מבוססת פחם -> מבוססת גז טבעי -> מבוססת מתחדשות מודרניות ואגירה, כפי שהיה במדינות העולם הראשון במאה שעברה. אלא, הן יכולות לדלג ישר לרשת חשמל מבוזרת מבוססת אנרגיות מתחדשות מודרניות (PV, רוח, הידרואלקטרי קטן, ביוגז...) ואגירת אנרגיה, שהינה זולה יותר, גמישה יותר ובעלת חוסן אנרגטי **מתקדם**.

לכן, צפוי גם כי לגז הישראלי צפויים פחות ופחות קונים בעתיד הבינוני והרחוק, וכל השקעה נוספת בסקטור זה צפויה להפוך לנכס תקוע (stranded asset) שאינו משיא תשואה או אינו מסוגל להחזיר את ההשקעה. לכן, השקעות וסבסוד נוספים של מדינת ישראל בסקטור זה צפויות לפגוע בחוסן הכלכלי של המדינה.

8 מסקנות

1. ישנם גורמים טבעיים וגורמים אנושיים אשר עשויים להשפיע ו/או לפגוע בסקטור החשמל.
2. רשתות חשמל ריכוזיות הן פגיעות בשל:
 - (א) מבנה קווי שאינו מאפשר מעבר חשמל לפעמים כאשר יש ניתוק אחד ברשת.
 - (ב) מבנה מורכב של הרשת בין היצרנים לצרכנים.
 - (ג) מספר רב של שלבים בין מקור האנרגיה, היצרן והצרכן.
 - (ד) מרחק גדול בין מקור האנרגיה, היצרן והצרכן (עד מאות ק"מ).
 - (ה) מספר קטן של רכיבים קריטיים שפגיעה בהם משביתה את המערכת.
 - (ו) הספק גדול של חלקים קריטיים במערכת (פגיעה בתפקוד רכיב גדול יכולה לגרום לנזק לכל המערכת).
3. כל שנה אנו עדים לפגיעות רשתות חשמל ריכוזיות בארץ ובעולם, עקב המבנה הריכוזי שלהן.
4. ניתן להגביר חוסן אנרגטי **בסיסי** של רשתות חשמל ריכוזיות באופן מוגבל באמצעות הגברת יתירות של חלקים ברשת (למשל, הגדלת מספר אסדות הגז מ-3 ל-6, או הגדלת מספר תחנות הכוח מ-15 ל-16), באופן שמאפשר חוסן אל מול סיכונים מתונים, מקומיים ו/או חולפיים.
5. כיום לא ניתן ליצור רשת חשמל ריכוזית בעלת חוסן אנרגטי **מתקדם**, אשר עמיד בפני סיכונים גדולים, נרחבים ו/או מתמשכים.
6. לא ניתן להגן באופן מוחלט על רשת חשמל ריכוזית מפני פגיעה.
7. העדר חוסן **מתקדם** של מערכות ריכוזיות מאפיין גם מערכות אחרות, כמו סקטור האנרגיה הריכוזי כולו (נמלי נפט ותזקיקיו, בתי זיקוק...), וסקטור המים (6 מתקני התפלה אשר מספקים 70% ממי השתייה בישראל).
8. רשת החשמל הריכוזית בישראל נמצאת בסיכון הגבוה ביותר בעולם המפותח לפגיעה חמורה מגורמים אנושיים, בעיקר במצב של התקפות נרחבות ומדויקות ע"י איראן והחיזבאללה.
9. פגיעות קריטיות ברשת החשמל הריכוזית הישראלית יפגעו קשות בכלכלה, בביטחון, וביציבות מדינת ישראל.
10. הנזק הגדול ביותר כתוצאה מהעדר אספקת חשמל הוא לתשתיות חיוניות (ביטחון, בריאות, אנרגיה, מים, מזון, תחבורה), לאחר מכן לעסקים, ולבסוף לדירות.
11. רשת חשמל מבוצרת מבוססת אנרגיות מתחדשות מודרניות, אגירת אנרגיה, מיקרוגרید ורשת חכמה- יכולה להיות חסינה יותר מרשת חשמל ריכוזית, ויכולה להיות בעלת חוסן אנרגטי **מתקדם** אל מול סיכונים גדולים, נרחבים ו/או מתמשכים בשל:
 - (א) מבנה של 'רשת דיג' בו חשמל יכול לעבור בין מספר יצרנים למספר צרכנים בשלל דרכים, גם אם חלק מהנתיבים פגועים.
 - (ב) מבנה רשת פשוט בין היצרנים לצרכנים.
 - (ג) מספר קטן של שלבים בין מקור האנרגיה, היצרנים והצרכנים (למשל, שמש -> גג סולארי -> בניין)

- (ד) מרחק קטן מאוד בין מקור האנרגיה, היצרנים והצרכנים (לעיתים מטרים ספורים בבניין עם PV או אגירת אנרגיה).
- (ה) מספר גדול מאוד של רכיבים שיכולים לגבות פעילות אחד של השני.
- (ו) הספקים קטנים של החלקים במערכת- פגיעה ברכיב אחד (או אפילו באלף) לא תגרום לנזק במערכת.
12. מדינות בעולם מבינות את העדר החוסן האנרגטי של רשתות חשמל ריכוזיות, ופועלות לביזור רשתות החשמל שלהן לשם הגברת החוסן האנרגטי **המתקדם** שלהן.
13. קיימות בעולם דוגמאות רבות של רשתות חשמל מבוזרות, מבוססות אנרגיות מתחדשות, אגירת אנרגיה, מיקרוגרید ורשת חכמה- אשר מקנות חוסן אנרגטי **מתקדם** אל מול גורמים טבעיים ואנושיים אשר פוגעים ברשתות חשמל ריכוזיות באופן שגרתי.
14. היקף ביזור רשתות החשמל תופס תאוצה בעולם.
15. כיום, טכנולוגיות שמאפשרות הקמת רשתות חשמל מבוזרות מבוססות אנרגיות מתחדשות, אגירת אנרגיה, מיקרוגרید ורשת חכמה- הינן בשלות, ועלות ההטמעה שלהן משתלמת וזולה יותר מאשר המשך פיתוח ותחזוקת רשת חשמל ריכוזית.
16. רשת חשמל מבוזרת מוזילה את תשתית ייצור החשמל, ההולכה, החלוקה, התחזוקה ואף את הוצאות הביטחון- תוך יצירת יותר מקומות עבודה.
17. בשל האופי המודולרי של רשתות חשמל מבוזרות, ניתן להוסיף אותן בהדרגה לרשת חשמל ריכוזית, וניתן להרחיב אותן בהדרגה.
18. רשתות חשמל מבוזרות מאפשרות דמוקרטיזציה של סקטור האנרגיה, הוזלת השימוש באנרגיה, צדק חלוקתי, הגדלת מספר התושבים שיכולים להשתתף ביצור ובאגירת אנרגיה.
19. רשתות חשמל מבוזרות מבוססות חשמל סולארי אינן חסינות בפני אירועים **נדירים מאוד** כגון חורף גרעיני/ געשי, התפרצות סולארית חריפה ומתקפת פולס אלקטרו-מגנטי.

9 המלצות

1. פיתוח תוכנית ארצית להקניית חוסן אנרגטי **מתקדם** לרשת החשמל בישראל (ובכלל למערכות אסטרטגיות כמו אנרגיה בכלל ומים).
2. לפעול לקידום מאפייני רשת חשמל מבוזרת (אנרגיות מתחדשות מודרניות, אגירת אנרגיה, מיקרוגרید, רשת חכמה) בישראל בכל התחומים:
 - (א) מחקר, פיתוח ופיילוטים.
 - (ב) חקיקה, רגולציה, תקינה, הסרת חסמים.
 - (ג) תקציבים.
 - (ד) ביזור בפועל ברמת הבית/ דירה, מתקן, מפעל, שכונה, רובע ויישוב.
3. לבצע מחקר לכימות החוסן האנרגטי ה**מתקדם** של רשת החשמל הריכוזית הישראלית אל מול חלופות של רשת מבוזרת.
4. לחקור מהו התמהיל האופטימלי לשילוב של רשת חשמל ריכוזית ורשתות חשמל מבוזרות ברשת החשמל הישראלית, בהתאם לטכנולוגיות הבשלות הקיימות ולעלויות הכרוכות בכך, מנקודת מבט של חוסן אנרגטי **מתקדם**.
5. קידום בפועל של תוכניות לביזור רשת החשמל כמו פרויקט העצמאות האנרגטית של אילת-אילות, מיקרוגרידים של ישובים קטנים, בסיסי צה"ל, תשתיות חיוניות (בתי חולים, משטרה, מכבי אש, מים, אנרגיה...), מפעלים, אזורי תעסקה, וכו'.
6. מבחינת סדרי עדיפות לאומיים, מומלץ לקדם ביזור רשת לתשתיות חיוניות (ביטחון, בריאות, אנרגיה, מים, מזון, תחבורה), לאחר מכן לעסקים, ולבסוף לדירות. אולם, יש לשים לב כי יתכן ותהייה עדיפות לקדם דירות של אוכלוסיות בסיכון לפני או במקביל לעסקים. פתרון מהיר ליישום הוא ביזור אנרגטי למרכזי חירום עירוניים או שכונתיים אליהם יכולים להגיע תושבים במקרי חירום.
7. מומלץ לקדם רשת חשמל מבוזרת ככל הניתן, הנסמכת על פאנלים סולאריים, אגירת אנרגיה, רשת חכמה ומיקרוגריד; תוך שמירת יכולת גיבוי באמצעות גז טבעי למצבי קיצון נדירים (חורף גרעיני/ געשי).
8. יש לפתח בטווח הבינוני והארוך חלופות חסיונות ובנות קיימא לגיבוי באמצעות גז טבעי, כדוגמת אגירה לטווח ארוך מאוד (חודשים ושנים), אנרגיה גיאותרמית, רוח בגובה רב או בים, ואנרגיית גלים.
9. לטווח הבינוני והארוך, מומלץ לפתח הגנות בפני אירועי שיתוק רחבים של רשת החשמל, כגון התפרצות סולארית חריפה ומתקפת פולס אלקטרו-מגנטי.