

מדינת ישראל
משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
לשכת המדען הראשי

מערכות מיקרוגריד בישראל: תועלות משקיות, סוגיות
חברתיות ומתווה מדיניות ליישום

דו"ח מסכם

דרי יעל פרג

דרי נדב לוי

האיגוד הישראלי לאנרגיה חכמה

ביה"ס לקיימות
ביה"ס טיומקין לכלכלה
המרכז הבינתחומי הרצליה

ספטמבר 2018

תשרי תשע"ט

המחקר מומן ע"י משרד האנרגיה על-פי חוזה מס' 215-11-038

תקציר

דו"ח זה מסכם מחקר אשר נערך במרכז הבינתחומי בהרצליה ובחן את סוגיית המיקרוגריד ויישומותו של המודל המבוזר בישראל. ביזור מערכת החשמל באמצעות הקמת מערכות מיקרוגריד הוא נושא המעורר עניין רב במשקי אנרגיה בעולם, בשל יתרונותיו הטכניים, הכלכליים, הסביבתיים ואף החברתיים. ואולם, לצד היתרונות הרבים, ניצבים לא מעט חסמים ואתגרים ליישום נרחב של מערכות אלו. המחקר כלל סקירת ספרות, סדנאות בהשתתפות בעלי עניין וניתוחים כלכליים על בסיס מתודולוגיות שונות. בין היתר, בחן המחקר את התפתחות תחום המיקרוגריד ברשתות חשמל במדינות מפותחות, תוך הערכת היתרונות אל מול האתגרים והחסמים. בנוסף, בחן המחקר את יישומות המיקרוגריד בישראל, תוך בחינת השיקולים הכלכליים, פיתוח תחום האנרגיה המתחדשת וסוגיות רגולציה. מסקנות המחקר הן כי ליישום מערכות מיקרוגריד במשק החשמל בישראל עשויות להיות תועלות רבות, וכי יש לקדם ביצוע פרויקטי פיילוט באזורים שונים בארץ על מנת לאפשר ניתוחי עלות-תועלת מעמיקים, ולהתאים את הרגולציה הקיימת למיקרוגרידים, על מנת לתמוך ולעודד את הקמתם.

Abstract

This report surveys current trends in integrating microgrids into electricity systems in developed countries, and the potential for microgrid integration in Israel. In addition to the technological advances affecting microgrids' viability, changes in regulation and markets present both challenges and opportunities for microgrids. This report summarizes the societal costs and benefits of microgrid integration, focusing on incremental environmental, socioeconomic, and electricity system benefits and costs. Approaches to quantifying these costs and benefits, as well as the advantages and limitations of each approach, are described in some detail. The report concludes with recommendations for actions necessary in order to advance microgrids beyond their current niche focus on specific institutional sites to a resource to be included for electricity system planning at a national level in Israel.

תוכן הענינים

7	רשימת הטבלאות
8	רשימת הגרפים
9	מבוא
10	מטרות ושאלות המחקר
10	שיטת המחקר
11	מבנה הדו"ח
12	סקירת רקע
12	מהו מיקרוגריד?
12	מרכיבי המיקרוגריד
13	תועלות המיקרוגריד
14	אתגרים בפיתוח מיקרוגריד
15	תועלות (ועלויות) של מיקרוגריד
15	איכות החשמל ואמינות מערכות המיקרוגריד
18	חסכון בהשקעות הון, חסכון בדלקים ובאיבודי אנרגיה, ויתרונות תפעוליים אחרים
23	יתרונות המיקרוגריד בשילוב אנרגיה מתחדשת
25	אספקת שירותים נלווים
29	תועלות חברתיות
33	גישה מוצעת לחישוב עלויות ותועלות המיקרוגריד
34	המצב הרגולטורי המקומי
34	מיקרוגריד בישראל: רגולציה קיימת ונדרשת
34	ייצור מבוזר
34	ניהול הביקוש
34	התייעלות אנרגטית
35	מה עוד נדרש?
37	סקר מיקרוגרידים בעולם
37	מצב רגולטורי ותחרותי
38	כניסת מתחרים לחברות החשמל ושינויים רגולטורים נדרשים
40	דוגמאות מעשיות
40	דוגמאות - רגולציה

41.....	דוגמאות - תקנים לחיבור, תעריפים תומכים ומנגנון רגולציה תומך
42.....	החלטות רגולטוריות לגבי ניהול ביקוש
42.....	דוגמאות - יישומי מיקרוגרידים
44.....	דוגמאות – יישומי מיקרוגרידים לצמצום אי-שיוויון באיכות אספקת החשמל ולמטרות חברתיות נוספות
47.....	אתגרים עיקריים בפיתוח מיקרוגריד: גורמים ופתרונות אפשריים
47.....	אתגר 1: חוסר מדיניות ורגולציה תומכת לעידוד מיקרוגרידים
47.....	אתגר 2: התנגדות מצד חברות החשמל
47.....	אתגר 3: חוסר תיאום בין בעל המיקרוגריד למשלם חשבונות החשמל
47.....	אתגר 4: מי משלם ומי מרוויח?
48.....	סיכום והמלצות כלליות
48.....	המלצות מדיניות
51.....	נספח 1: הגדלת האמינות המשקית (ליאור אבן-חן)
51.....	הגדלת האמינות המשקית
51.....	מדדים לרמת האמינות ברשת
54.....	עלות אי אספקה בישראל:
54.....	השפעות מזג האוויר
55.....	תועלות מערכת המיקרוגריד
60.....	סקירת ספרות
61.....	כימות התועלת
62.....	המצב הרגולטורי בישראל כיום
63.....	אמת מידה פיצוי בגין נזקים למכשירי החשמל
64.....	נספח 2: הגדלת הייצור המשקי באנרגיות מתחדשות
64.....	יתרונות השימוש באנרגיות מתחדשות
71.....	כימות התועלות המערכתיות של המיקרו-גריד בהטמעת אנרגיות מתחדשות
76.....	נספח 3: חיסכון בהשקעות תשתית ברשת ההולכה והחלוקה (ליאור אבן-חן)
85.....	כימות התועלות
88.....	נספח 4: תועלת המיקרוגריד ברמת הפרט (ליאור אבן-חן)
115	נספח 5: שירותים נלווים
125	נספח 6: MICROGRID LESSONS LEARNED (אלעד שביב)
139	נספח 7: רגולציה (אילן סולימן)

נספח 8: ניתוח כמותי/איכותי של השלכות סביבתיות וחברתיות מפריסת מיקרוגריד (מלקולם איינספן)	144
נספח 9: Microgrid Review (אדם הירש)	162

רשימת הטבלאות

טבלה 1 :	אומדני עלויות פליטת מזהמים במהלך ייצור קוט"ש קונבנציונאלי בשנת 2009	22
טבלה 2 :	מכסות ייצור באנרגיה מתחדשת עפ"י החלטת ממשלה 3484 והסדרות הרשות	22
טבלה 3 :	פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות באגורות לקוט"ש	23
טבלה 4 :	תוצאות של אמידת מכפילים כלכליים קשורים למרכיבי מיקרוגריד	32
טבלה 5 :	השוואת דקות אי-אספקה בממוצע ללקוח, 2003-2015	52
טבלה 6 :	מדד אי אספקה לשנת 2013 בחלוקה למחוזות חח"י	52
טבלה 7 :	השוואת תדירות אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל	53
טבלה 8 :	השוואת משך שיקום אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל	53
טבלה 9 :	שקלול עלות אי-אספקה לקוט"ש לא מסופק לפי הצרכנים השונים	54
טבלה 10 :	תחזית הייצור בתחום האנרגיות המתחדשות	66
טבלה 11 :	עלות זיהום בדולר לטון מזהם	72
טבלה 12 :	פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות	72
טבלה 13 :	סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות	73
טבלה 14 :	פליטות נמנעות הקשורות למרכיבי מיקרו-גריד	74
טבלה 15 :	עלויות מוכרות במקטעי ההולכה והחלוקה	79
טבלה 16 :	גיל רשת חשמל עילית ותת קרקעית בישראל	80
טבלה 17 :	עלויות עבודות תשתית רשת	80
טבלה 18 :	עלות אי אספקה משוקללת	98
טבלה 19 :	גיל רשת חשמל עילית ותת קרקעית	102
טבלה 20 :	נתונים על איכות החשמל בישראל שנת 2012 (ערכים מקסימליים שנצפו)	107
טבלה 21 :	עלויות חזוניות של זיהום אוויר מייצור חשמל	107
טבלה 22 :	פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות	108
טבלה 23 :	תעריפי ניהול המערכת ושירותים נלווים (אג"קוט"ש)	123
טבלה 24 :	עלות זיהום לטון מזהם	146
טבלה 25 :	פרמיות ליצרנים פרטיים	146
טבלה 26 :	השוואת סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות	148
טבלה 27 :	הערכת כמות הפליטות למרכיבי המיקרו-גריד	149
טבלה 28 :	עלויות מרכיבי המיקרו-גריד	157
טבלה 29 :	אמידת מכפילים כלכליים קשורים למרכיבי מיקרו-גריד	158
טבלה 30 :	הגדרת מיקרו-גריד יציג לצורך כימות העלויות והתועלות	159

רשימת הגרפים

גרף 1 : דוגמא לחלוקת הרווחים של המיקרוגריד משירותים נלווים	29
גרף 2 : התפלגות שנתית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מתח עליון	58
גרף 3 : התפלגות ערכים מרביים של אי איזון מתח לצרכני מתח עליון	59
גרף 4 : התפלגות ערכים מרביים של עוצמת הבהוב לצרכני מתח עליון	59
גרף 5 : שילוב אנרגיה מתחדשת מסך הייצור המשקי	65
גרף 6 : השוואה עונתית של ייצור סולארי ממוצע	67
גרף 7 : צפי אפקט הגידול בייצור באנרגיה סולארית (עפ"י נתוני מפעיל רשת החשמל בקליפורניה)	70
גרף 8 : השקעות חח"י במקטעי רשת, מתוך דו"ח מצב משק החשמל לשנת 2016	77
גרף 9 : נתוני תקציב מול ביצוע השקעות במקטעי התשתית לשנים 2000-2015	78
גרף 10 : נתחי שוק בייצור חשמל בטכנולוגיית קוגנרציה	93
גרף 11 : מימוש כמות תעריפית ליצרני קוגנרציה : (ניתנו רישיונות מותנים וקבועים בהספק מצטבר של 1,458 MW)	94
גרף 12 : הפוטנציאל של CHP במדינות שונות בעולם בשנים 2015 ו-2030	94
גרף 13 : דקות אי-אספקה	99
גרף 14 : תדירות הפסקות חשמל	100
גרף 15 : ממוצע תדירות ומשך הפסקות החשמל עבור צרכנים מסוגים שונים בארצות הברית	101
גרף 16 : אירועים הקשורים למזג האוויר שגרמו להפסקות חשמל בעולם ב-2013	102
גרף 17 : התפלגות שנתית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מ"ע	104
גרף 18 : התפלגות חודשית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מ"ע	105
גרף 19 : ערכים ממוצעים של מתח הרמוני	105
גרף 20 : ערכים ממוצעים של אי איזון מתחים	106
גרף 21 : ערכים ממוצעים של הבהוב	106
גרף 22 : פליטת CO2 ממערכות מיקרוגריד לעומת מערכות רגילות	109
גרף 23 : מה מקור הערך במיקרוגריד באונטריו, קנדה?	111
גרף 24 : דוגמא לחלוקת הרווחים של המיקרוגריד משירותים נלווים	119

מבוא

דו"ח זה מסכם מחקר שנערך במרכז הבינתחומי בהרצליה, ואשר בחן את סוגיית ביזור מערכת האנרגיה בישראל באמצעות מערכות מיקרוגרید. אף שאין הסכמה מלאה לגבי ההגדרה מהו "מיקרוגרید", ואף שחלק מפיתוחי המיקרוגרید עדיין אינם זמינים מסחרית, הרי שבשנים האחרונות התפתחה טכנולוגיה זו בצורה משמעותית, כחלק מפיתוח תפיסת הרשת החכמה. המיקרוגרید הוא רשת חשמל מבוססת הפועלת באזור גיאוגרפי מוגדר ומצומצם וכוללת לפחות שלושה מרכיבים: מערכת ליצור אנרגיה (חשמל ו/או אנרגיה תרמית), מערכת לאחסון אנרגיה וצרכני אנרגיה. המיקרוגרید יכול לפעול בחיבור לרשת החשמל הארצית, או כרשת עצמאית סגורה ("אי") בהתאם לצורך. מערכות מיקרוגרید מתקדמות משתמשות בטכנולוגיית מידע ותקשורת דו-כוונית לאיסוף מידע על ההתנהגויות של צרכנים וספקי אנרגיה, ופועלות ומגיבות על בסיס מידע זה באורח אוטומטי כדי לשפר את היעילות, האמינות, הכלכליות, והקיימות של ייצור ושימוש בחשמל וחלוקתו. רשתות מיקרוגרید אידאליות מתאפיינות בעלויות נמוכות יחסית, וביזור המערכת מייצר גמישות ויעילות המגבירים את שרידות המערכת המקומית והארצית תוך התיעלות אנרגטית, והורדת עלות האנרגיה לצרכנים.

כשילוב של מערכות אנרגיה קטנות, מבוססות וחכמות, מיקרוגרید הוא אחד התחומים מעוררי העניין בעולם האנרגיה, בישראל ובמדינות מפותחות, בשל התועלות הגלומות בו: מערכות מיקרוגרید עשויות לתת מענה לחלק גדול מאתגרי ביטחון האנרגיה בישראל, ובכללם הגברת העצמאות אנרגטית, שיפור שרידות מערכת החשמל והפחתת פליטות גזי חממה באמצעות הטמעה של מערכות ליצור אנרגיה ממקורות מתחדשים, טכנולוגיות לאחסון אנרגיה, הולכה יעילה ומבוססת, ומערכת חכמה לניהול ביקושים. העניין במיקרוגריד גבר בשנים האחרונות בעקבות שורת אירועים חריגים וקיצוניים שפגעו באספקת החשמל במדינות מפותחות. לדוגמה, רעידת האדמה ביפן בשנת 2011, אשר הוציאה מכלל שימוש את תחנת הכוח הגרעינית בפוקהשימה והפחיתה דרמטית את כושר ייצור החשמל ביפן למשך פרק זמן ממושך או סופת ההוריקן סנדי, שפגעה בחוף המזרחי של ארה"ב בשנת 2012 והשביתה את מערכת ייצור החשמל בניו-יורק. מדינות רבות, בהן סין, יפן, דרום קוריאה, סינגפור, ארה"ב, קנדה, גרמניה ואחרות רואות במערכות מיקרוגריד הזדמנות לשפר את מדדי ביטחון האנרגיה שלהן בד בבד עם שילוב אנרגיה מתחדשת והפחתת פליטות גזי חממה ולכן עורכות בחינות היתכנות שונות לביזור מערכת האנרגיה ויישום מיקרוגרידים. בעולם פועלים בהצלחה מספר משמעותי של מיקרוגרידים והמעבר מחזון למציאות של ריבוי רשתות מיקרוגריד תופס תאוצה לאור התפתחויות טכנולוגיות ומסחריות דוגמת הוזלת עלויות ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים (מערכות סולאריות), פיתוחים בתחום אגירת ואחסון אנרגיה (סוללות), ושלל טכנולוגיות לניטור, בקרה, ושלטה אוטומטיים של צריכת האנרגיה ברמת הצרכן וברמת רשתות אנרגיה.

אולם לצד יתרונות אלו ותועלות פוטנציאליות נוספות הגלומות בביזור מערכת האנרגיה, יישום מערכות מיקרוגריד מציב בפני מקבלי ההחלטות ובעלי עניין אחרים בארץ ובעולם שאלות, בעיות ואתגרים חדשים. בהיבט הטכני, ישנם חסמים שונים הנוגעים לרכיבים טכנולוגיים במיקרוגריד, סוגיות של אבטחת מידע וכן יצירת הממשק שבין תפקוד המיקרוגריד כרשת עצמאית מנותקת ('אי') למצב של חיבור לרשת. בין החסמים הכלכליים ישנן עלויות תכנון, התקנה, וניהול גבוהות של מיקרוגרידים ואתגרים ביצירת שוק אשר יעביר את התועלות לצרכנים, למערכת החשמל ולחברה. חסמים קיימים גם במישור המוסדי ובראשם הקושי הפרקטי להתמודד עם סוג חדש של שחקנים לא מוכרים במשק אנרגיה מסורתי ושמרן ולפקח עליהם. שאלות נוספות נוגעות להשפעת של ביזור המערכת על היבטים רחבים יותר של ניהול משק האנרגיה ברמה הלאומית. נדמה כי הצורך במודלים עסקיים חדשים הוא אחת מסוגיות הליבה בקידום תחום המיקרוגריד. המודלים העסקיים הנפוצים היום העולם מותאמים לרשת מסורתית וריכוזית בה פועלים מספר קטן יחסית של יצרנים גדולים ורשת הולכה וחלוקה ענפה (מאקרוגריד). אולם משק מבוסס יהיה שונה מאוד מזה המוכר היום ולכן הרגולציה על השוק, כמו גם המודלים העסקיים הרווחים כיום אינם מתאימים עבורו. על מנת למקסם את התועלות יש צורך במבנה שוק ובמודלים עסקיים חדשים הן ליצרניות האנרגיה המסורתיות, הן לחברות האנרגיה, הן לשחקנים החדשים שיכנסו לשוק והן לשילוב שירותים הניתנים מצד היצרנים-צרכנים (פרוסיומרים).

מחקר זה עוסק לראשונה באופן יסודי ומקיף בסוגיית המיקרוגריד בישראל, בהיבט מערכתי ומשקי. תוצריו יאפשרו למקבלי ההחלטות ולמעצבי המדיניות להבין טוב יותר את האתגרים וההזדמנויות שבהקמת מיקרוגרידים וביזור מערכת האנרגיה בישראל, תוך הצבעה על החסמים וההזדמנויות הקשורים בשינוי כזה. יישום המלצות המחקר יאפשרו בעתיד תכנון מיטבי ומבוסס נתונים (evidence based) של משק האנרגיה, ובכלל זה פיתוח מסגרת רגולטורית ומודלים כלכליים ועסקיים שיאפשרו מיקסום של התועלות המשקיות.

מטרות ושאלות המחקר

מטרתו המרכזית של המחקר היא לבחון את מערכות המיקרוגריד בפרספקטיבה בינלאומית, תוך התמקדות במאפיינים הגיאוגרפיים-פוליטיים הייחודיים לישראל. זאת, בסיוע להעריך את התועלות המשקיות מיישום מיקרוגריד, בכלל זה המשמעות הסוציו-טכנו-כלכליות, וכן את המסגרת הרגולטורית לביזור המערכת בישראל. על בסיס ניתוח זה מציג המחקר עקרונות מדיניות אפשריים להחדרה של מיקרוגריד לישראל.

שאלות המחקר העיקריות הן: מהן ההשלכות של ביזור מערכת החשמל, באמצעות מיקרוגריד, על מדדים של ביטחון אנרגיה (זמינות, אמינות, מחיר סביר, קיימות), ומהי התרומה הפוטנציאלית של יישום מערכות מיקרוגריד להשגת יעדי ביטחון האנרגיה עבור מדינת ישראל? מהי התרומה הסביבתית של יישום מערכות מיקרוגריד מבחינת פוטנציאל הפחתת הזיהום וכיצד משפיעים מיקרוגרידים על העמידה ביעדי הפחתת פליטות גזי החממה? מהן ההשלכות של יישום מיקרוגריד על אוכלוסיות בעלות מאפיינים סוציו-כלכליים שונים ועל השוויון והרווחה? מהן הסוגיות הרגולטוריות הכרוכות בביזור המערכת ובהקמת מיקרוגריד? מהם התנאים הרגולטורים הנדרשים ומבנה המשק שיאפשרו יישום מיטבי של מערכות מיקרוגריד בישראל? וכן מהו המודל הכלכלי והעסקי שיאפשר מיקסום התועלות המשקיות של מיקרוגריד בישראל?

את המחקר הובילו ד"ר יעל פרג מבית הספר לקיימות וד"ר נדב לוי מבית הספר לכלכלה, שניהם במרכז הבינתחומי בהרצליה, בשיתוף האיגוד הישראלי לאנרגיה חכמה. בביצועו לקחו שורת מומחים מתחומי התמחות שונים במשק האנרגיה: מר מלקולם איינספן, מר ליאור אבן-חן, מר אלעד שביב, ד"ר אילן סולימאן וד"ר אדם הירש. מקצת מתוצרי המחקר זכו במהלך השנה לפרסום במאמר בכתב העת *Renewable and Sustainable Energy Reviews*¹.

שיטת המחקר

המחקר התבסס על ארבעה נדבכים עיקריים:

- א. סקירת ספרות מקצועית מקיפה בנושא המיקרוגריד, המגמות וההתפתחויות הטכנולוגיות והכלכליות בתחום, הבוחנת וממפה גם את הרגולציה והמדיניות הנקוטה בעולם ובישראל, זיהוי הגופים הרלוונטיים, פרויקטים קיימים, שחקנים עיקריים, תכנונים למיקרוגריד, מגבלות ועוד;
- ב. ראיונות עם בעלי עניין בארץ ובעולם, בכלל זה רגולטורים, מעצבי מדיניות, חברות אנרגיה מסורתיות וחברות אנרגיה חדשות וחדשניות;
- ג. סדנאות עם בעלי עניין בישראל שנערכו במרכז הבינתחומי בהרצליה במטרה לבחון סוגיות שונות שעלו בתקופת המחקר;

¹ Hirsch, Adam; Parag, Yael; Guerrero, Josep (2018) *Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol 90 pg. 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>

ד. בחינה וניתוח של מודלים רגולטורים וכלכליים שונים ליישום מיקרוגרידים בישראל.

מבנה הדו"ח

בדו"ח זה שני חלקים עיקריים: חלקו הראשון כולל סקירה ספרותית מקיפה של התפתחות תחום המיקרוגריד בעולם בשנים האחרונות, תוך התמקדות בדוגמאות ומקרי מבחן הממחישים סוגיות יישומיות של רגולציה ומודלים כלכליים, בעיקר מארה"ב. חלקו השני של הדו"ח כולל תשעה נספחים, אשר נכתבו בידי מומחים שונים, ואשר מנתחים ומרחיבים את הסוגיות העולות מסקירת הספרות ומתמקדים בשאלות ספציפיות ויישומיות הנוגעות לקידום הקמת מיקרוגרידים בישראל:

- נספח 1 - מפרט את תוצרי המחקר הנוגעים להגדלת אמינות אספקת החשמל במשק ושרידותו באמצעות יישום מיקרוגרידים. זאת, על בסיס סקירת ספרות מהעולם ולאור מדדים שונים לאמינות הרשת, עלויות אי-אספקה וגורמים בלתי תלויים (מזג האוויר). נספח זה כולל מתודולוגיות לכימות התועלת מיישום מיקרוגריד ומספר תחשיבים רלוונטים לישראל.
- נספח 2, סוקר את התפתחות תחום האנרגיה המתחדשת בישראל, ומציג נוסחה להגדלת הייצור המשקי המגדילה את חלקה של האנרגיה המתחדשת, בכלל זה כימות התועלות המערכתיות של המיקרוגריד בהטמעת אנרגיה מתחדשת.
- נספח 3 עוסק בהערכת החיסכון בהשקעות תשתית ברשת ההולכה והחלוקה כתוצאה מביזור והקמת מיקרוגרידים. זאת, על בסיס סקירת הספרות בתחום וניתוח ההשקעות של חברת החשמל ברשתות ההולכה והחלוקה, כמו גם מצב הרשת והשקעות עתידיות נדרשות על בסיס סימולציות.
- נספח 4 מנתח את התועלות שבהקמת מיקרוגריד ברמת הפרט, בכלל זה יתרונות ושיקולי צרכנות, שיפור בפרמטרים של אספקת אנרגיה, חסכון כלכלי והנסיון שנצבר בעולם בתחום זה ואף תועלות סביבתיות.
- נספח 5 מנתח את השירותים הנלווים אותם יכול לספק המיקרוגריד לרשת, דוגמת ויסות, התנעה, אגירה, השלת תדר וזרובה סובבת, וזאת בהתייחס למצב בישראל.
- נספח 6 מציג לקחים מיישום מיקרוגרידים בעולם.
- נספח 7 בוחן את סוגית הרגולציה של מיקרוגריד בעולם ובישראל.
- נספח 8 מכיל ניתוחים כמותיים ואיכותיים על השלכות סביבתיות וחברתיות מפריסת מיקרוגרידים.
- נספח 9 מביא סקירה משווה (review) של תחום המיקרוגריד בעולם, כפי שפורסמה על ידי עורכי מחקר זה בכתב העת Renewable and Sustainable Energy Reviews.

סקירת רקע

בחלק זה של הדו"ח, מובאת סקירת ספרות מעמיקה וניתוח של התפתחות תחום המיקרוגריד בעולם, עם השלכות אפשריות לישראל. חלקו הראשון עוסק בהגדרת המיקרוגריד ומרכיביו וכן במיפוי תועלתיו בשיפור איכות החשמל ואמינות מערכת החלוקה וההולכה, בין היתר באמצעות אספקת שירותים נלווים, הגברת השימוש באנרגיה מתחדשת, וכן תועלות חברתיות וסביבתיות. בחלק זה מוצגת גם גישה לחישוב עלות/תועלת של מיקרוגריד. בהמשך, מובא ניתוח של האתגרים שבפיתוח מיקרוגריד, ובפרט סוגיות הרגולציה וכיצד עשוי מיקרוגריד להשתלב ברגולציה הקיימת בישראל. החלק שלאחריו סוקר את מצב המיקרוגרידים בעולם, תוך הצגה נרחבת של דוגמאות מעשיות של יישום מיקרוגרידים. החלק האחרון והמסכם של סקירה זו בוחן פתרונות אפשריים לחסמים שבפיתוח מיקרוגרידים בישראל ומציג מספר המלצות מדיניות.

מהו מיקרוגריד?

ניתן להגדיר מיקרוגריד (micro-grid) כמערכת לניהול ואופטימיזציה של האמצעים המשמשים ליצור, אגירה, וצריכת אנרגיה בגבולות גיאוגרפיים ו/או רגולטוריים נתונים (דוגמת שכונת מגורים, מחנה צבאי, בית חולים, קמפוס, אזור תעשייה, קניון, צרכן עם נקודות צריכה). מיקרוגריד יכול לפעול כמערכת סגורה ("אי חשמלי") במנותק מרשת אספקת החשמל המרכזית, או תוך ממשק לרשת למטרות גיבוי, שרידות ומכירת עודפי יצור. קבוצת MICROGRID EXCHANGE GROUP (קבוצה אד-הוק של מומחים בעולם העוסקים במחקר וביישום מיקרו-גרידים) מגדירה את המיקרוגריד כ"קבוצת צרכנים ומשאבי אנרגיה מבוזרים (להלן, DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES או "DER") התחומים בין גבולות מוגדרים היטב ופועלים כישות אחת הניתנת לשליטה ברשת". על פי הגדרה זו "ניתן לחבר או לנתק את המיקרוגריד מהרשת כדי לאפשר תפעול גם כמשאב מחובר לרשת וגם כאי-חשמלי". ה-CIGRE (המועצה הבינלאומית של מערכות חשמל גדולות) מוסיפה להגדרה זו מונחים נוספים בהם תחנת ייצור, מתקני אגירה וביקושים בשליטת מנהל המערכת.

הלכה למעשה, מיקרוגריד היא משק חשמל בקנה מידה קטן הכולל את כל המרכיבים של מערכת חשמלית כלל ארצית. התקנת מערכות מיקרוגריד נועדה לאפשר ניהול מערך אנרגיה עצמאי בקנה מידה קטן, על בסיס כלכלי, תוך הבטחת יתירות ושרידות של המערכת בממשק עם רשת החשמל הארצית. מערכות מיקרוגריד בתצורתן האופטימלית, קרי מערכות הכוללות את מלוא המרכיבים האמורים טרם הפכו לנפוצות בעולם, אך קיימות דוגמאות יישומיות למערכות הכוללות מרכיבים מסוימים של המערכת, ומכונות מיקרוגריד. ניתן לאפיין שתי תצורות עיקריות של מיקרוגריד: כזה הממוקם כולו באזור גיאוגרפי מסוים ומנוהל על ידי צרכן פרטי; ומיקרוגריד אשר נוצר כחלק מהרשת הכללית ומשלב מספר טכנולוגיות הממוקמות באזורים שונים.²

מרכיבי המיקרוגריד

מערכות מיקרוגריד כוללות לרוב את שלושת המרכיבים הבאים:

1. **ייצור מקומי** – מגוון המקורות הזמינים לייצור אנרגיה. מקורות אלו מתחלקים לשלושה סוגים עיקריים: מקורות אנרגיה קונבנציונליים (דוגמת גז טבעי או סולר), מערכות קוגנרציה, ומקורות אנרגיה מתחדשת (כמו טורבינות רוח ואנרגיה סולארית).

² <http://interestingengineering.com/7-benefits-of-microgrids/>

2. **צריכה** – מרכיב זה מתייחס לצד הביקוש, קרי צרכני חשמל דוגמת התקני תאורה ומערכות אקלים במבנים ובמרכזים מסחריים. בשעות העומס, ניתן לווסת את הצרכנים בהתאם לביקוש הכולל ברשת המיקרוגרید.
3. **אחסון אנרגיה** – מתקני האחסון ברשת המיקרוגריד נדרשים להבטיח את איכות החשמל, להעניק גיבוי ולצמצם את עלויות האופטימיזציה של המערכת (לדוגמה ביחס לזמינות של מקורות מתחדשים). מתקני אחסון כוללים טכנולוגיות חשמליות, מערכות המטפלות בלחץ וכבידה ואחסון תרמי.³

תועלות המיקרוגריד

התועלות מן השימוש במיקרוגריד עשויות להיות ברמת הפרט או כלל משקיות, כאשר לעיתים יש זהות בין התועלות (למשל בכל הנוגע לאמינות וליעילות הכלכלית). עם זאת, בעוד שהתועלות ברמת הפרט נוגעות בעיקר ליעול צריכת האנרגיה (חסכון או רווח כלכלי) הרי שהתועלות המשקיות מיישום מערכות מיקרוגריד נוגעות בהיבטים רחבים יותר של פיתוח תעשייתי, צמצום זיהום הסביבה במשק האנרגיה והפחתת פליטות גזי חממה, וכן בניהול משק החשמל (הפחתת עלויות הולכת החשמל והגדלת אמינות המערכת מנקודת מבט כלל משקית). גם ברמת הפרט ניתן להפריד בין תועלות של צרכן הקצה/יצרן הקצה לבין יזמי ומפעילי המיקרוגריד. עם זאת, לצורך הניתוח הכלכלי, דו"ח זה מתייחס לתועלות ברמת הפרט כמשותפות לכלל המשתמשים במערכת המיקרוגריד, בגבולות הגיאוגרפיים או הרגולטוריים הנתונים.

מיקרוגריד יכול להציע לצרכן את התועלות הבאות:⁴

- **מערכת חשמל אמינה ובטוחה** – בתי חולים, אוניברסיטאות, בתי זיקוק, מפעלים לייצור תרופות, מרכזי נתונים, בסיסים צבאיים ומתקני תעשייה ותשתית רבים נוספים תלויים באספקת אנרגיה רציפה וללא הפרעות. במתקנים אלו מותקנים גנרטורים פרטיים (לרוב מונעים על דיזל) המשמשים לאספקת חשמל במקרי חירום. זאת, משום שאפילו ההפרעה הקטנה ביותר באספקת החשמל עלולה לגרום לנזקים כלכליים ואחרים. לעומת זאת, במיקרוגריד, יודעת מערכת הבקרה האוטומטית לאזן בצורה טובה יותר את הביקושים אל מול הייצור ומערכות הגיבוי, וכן מול רשת החשמל הארצית ואתרי אחסון מקומיים. זאת, במטרה להבטיח את יציבות האספקה.
- **ביטחון בתחום הפיזי ובתחום הסייבר** – עבור גורמי צבא ובטחון, יש חשיבות רבה לאבטחה פיזית של מתקנים וכן להגנה בתחום הסייבר. מאחר ופריצות מבחוח למערכות מחשב מעלות את רמת הסיכון, יש לרשויות אלו צורך במקור אספקת חשמל מתקדם, אמין ומאובטח.
- **שינויים ותוספות בינוי** – מערכת מיקרוגריד יכולה לשמש גם אירגונים הנמצאים בתהליכי התרחבות וגידול בשימוש באנרגיה. לדוגמה, הרחבה פיזית של מבני אוניברסיטה או בסיס צבאי, בנייה מחדש של מבנה וכדומה הם מקרים בהם למערכת מיקרוגריד עשויות להיות תועלות רבות, וניתן להשתמש בתזמון של תהליך הבינוי על מנת להחליף את המערכת הקיימת במערכת מיקרוגריד המותאמת לצרכי המקום.
- **תמריצים מקומיים** – הקמת מערכת מיקרוגריד עשויה לתרום למימוש יעדי מדינות והחלטות רגולטוריות ברמה המקומית, הארצית או האזורית. לדוגמה, לצורך ניצול תמריצים מקומיים לעידוד ההתייעלות האנרגטית והשימוש באנרגיה מתחדשת, או לצורך עמידה ביעדים לאומיים לשימוש במקורות מתחדשים. כמו כן, למיקרוגריד יש תועלת רבה באזורים בהם ניתנת לצרכנים האפשרות הכלכלית למכור חשמל לרשת הארצית, או

³ : <https://en.wikipedia.org/wiki/Microgrid>

⁴ : https://w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/microgrid/Documents/The%20business%20case%20for%20microgrids_Siemens%20white%20paper.pdf

במקומות בהם יש מגבלות על שימוש בגנרטורים הפועלים על דיזל, לדוגמה משיקולי סביבה, וניתן לשלב תחתם מקורות מתחדשים.

- **שיקולים חברתיים** – עבור אירגונים או מוסדות עם מחויבות לשימוש באנרגיה נקיה, או מוסדות המבינים את האתגרים ליציבות הרשת הארצית לאור הגידול בשימוש באנרגיות מתחדשות ואשר עשויים לשאוף ולהפחית את התלות שלהם ברשת הארצית.
- **מניעים כלכליים** – המיקרוגריד טומן בחובו הזדמנות כלכלית להפחית את סך עלויות צריכת החשמל וכן למכור אנרגיה ושירותים נלווים לחברות ניהול המערכת ולחברות חשמל מאוגדות אנכית.

אתגרים בפיתוח מיקרוגריד

האתגרים המרכזיים לקידום רשתות מיקרוגריד בישראל ובחור"ל נובעים מרובם מקשיי רגולציה ומדיניות. לדוגמה:

- העדר הגדרה מוסכמת ל"מיקרוגריד";
- העדר שיטות בחינה מקובלות להשוואת כדאיות ההקמה של מיקרוגריד ביחס לפתרונות "פשוטים יותר", דוגמת מערכות לניהול אנרגיה במבנים (BEMS);
- סוגיית המימון, מאחר ועלויות ההון והתפעול הראשוני (והסיכון) מוטלות על ידי היזם, בעוד שצרכני החשמל נדרשים להחזיר את ההשקעה בחשבון החשמל החודשי, הרי שללא תמיכה ממסדית (מעורבות ממשלתית) עשוי להגרם עיכוב ניכר בפיתוח רשתות מיקרוגריד. בפרט, יש צורך במעורבות ממשלתית בטווח הקצר לעידוד מיקרוגרידים, על מנת להוכיח את המודל הכלכלי ולצורך יצירת שוק מסחרי;
- העדר מתודולוגיה מוסכמת לחישוב התשואה הצפויה ממערכות מיקרוגריד, וכתוצאה מכך, גידול בעלויות המימון. אתגר זה עלול להחריף עם התפתחות סוגים שונים של מיקרוגרידים ומודלים עסקיים ליישום;
- מעורבות של מספר גדול של גורמי רישוי, רגולציה, וסטטוטוריקה, כאשר לכל גוף עשויים להיות קריטריונים שונים ולפעמים אף מנוגדים;
- הצורך בגורמי מקצוע בהתמחויות שונות, ומחסור בגופים המאגדים את המומחיות המקצועית הנדרשת תחת קורת-גג אחת. זמן ההתקשרות עם מומחים חיצוניים כמו גם עלויות השכר (בהעסקה פנימית או במיקור חוץ) שהן מעבר ליכולות הפיננסיות של חברות ומוסדות המעוניינים להקים מיקרוגריד (למשל בקמפוסים של אוניברסיטאות), הוא גורם מעכב בהקמת מיקרוגרידים;
- קושי בתיאום, אינטגרציה, תפעול, וניהול הרשת מספקים שונים, כאשר מערכות ניהול אחידות, שאינן מיועדות לחברות חשמל אנכיות, עדיין אינן זמינות מסחרית;
- מחסור בכוח אדם מיומן בתחומים הרלבנטיים למיקרוגריד;
- מחסור בתשתיות אספקה ומסירה מספקות המאפשרות ניצול יתרונות המיקרו-גריד, כולל חיסכון בדלקים (בעיקר במתקני מיקרו-CHP), הפחתת פליטות מזהמים, והגברת האמינות. קיים סינדרום של "ביצה ותרנגולת", כאשר זכייני הגז מוכנים לפרוש תשתית תמורת מחויבות לשימוש מצד הצרכנים, ואילו הצרכנים מוכנים להתחייב לשימוש רק אם ידעו שזה משתלם להם.

אף שלמיקרוגריד יש תועלות רבות שהודגמו הן בניסויי מעבדה והן בשטח, על ידי המטמיעים הראשונים, הרי שיישום מערכות מיקרוגריד בהיקף נרחב עלול להיות איטי:

- המסגרת הרגולטורית והמשפטית במשק החשמל מותאמת זה כ-100 שנים למערכת מרכזית המשלבת ייצור, הולכה, וחלוקה של חשמל הזורם בכיוון אחד: מהיצרן לצרכן. שינוי מסגרת זו למודל של מיקרוגריד המשלב מקורות מבזרים מצריך השקעה בפיתוח רגולציה חדשה, שתאפשר רישוי ואישור פרויקטי מיקרוגריד וחיבורם לרשת;

- התועלות הכלכליות של מיקרוגרידים מפוזרות על פני גורמים רבים, ואינן ניתנות לכימות ומדידה פשוטה ;
- מרבית הטכנולוגיות המיועדות לשימוש כמערכות משולבות במיקרוגריד הן חדשות ולא-מוכרות בשוק. בשל כך, העלויות והסיכונים בפרויקטי מיקרוגריד גדלים, ומציבים אתגר לכללי החיבור וההפעלה (INTEROPERABILITY) מצד חברות חשמל הקיימות ;
- נכונות ורציה של הצרכנים, שהם לרוב שמרנים ומחוסרי מוטיבציה של ממש לאמץ מודל חלופי לאספקת חשמל, ובפרט שהסיכונים שבו אינם ידועים די הצורך. יצוין כי תופעה זו מוכרת לרגולטורים בעולם, אשר צברו ניסיון בהתמודדות עמה.

מספר גורמים ממשלתיים וחצי-ממשלתיים, בעיקר בארה"ב, פועלים למצוא פתרונות לאתגרים אלו ולקדם מיזמים של מיקרוגריד. אלו כוללים בין היתר את משרד האנרגיה (USDOE), המעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת (NREL), והרשות למחקר ופיתוח אנרגי בניו-יורק (NYSERDA). ברמה הבינ"ל, מערכת ה-PEER לדירוג מרכיבי המיקרוגריד מאפשרת לבנות תכנית הערכה לפרויקטי מיקרוגריד המבוססת על מדדים שקופים, בהתאם ליעדים מוסכמים של אספקת חשמל אמין וידידותי לסביבה. על אף חסמים אלו, טכנולוגיות המיקרוגריד כבר בשלות, והסביבה הרגולטורית בעולם הופכת לגמישה יותר בכל האמור במעבר מפרויקטי פיילוט לפריסה רחבה של מיקרוגריד. קצב היישום של פריסת רשתות מיקרוגריד בעתיד תלוי בהגדרות ברורות (למשל, האם המיקרוגריד הוא "חברת חשמל" או לא), הבהרת זכויות השימוש בתשתיות ציבוריות (דוגמת משאב הקרקע), וקביעת תעריפים לאנרגיה ולשירותים נלווים במיקרוגריד.

פירוט נרחב בנוגע לאתגרים אלו וכן דוגמאות לפתרונות מוצלחים מופיעים בנספח 6 לדו"ח זה.

תועלות (ועלויות) של מיקרוגריד

כאמור, ליישום מערכות מיקרוגריד תועלות משקיות ותועלות ברמת הפרט. ברמה הכלל-משקית, ניתן להצביע על מספר כשלי שוק שאינם מאפשרים מימוש תועלות אלו בחלקן או במלואן ללא מעורבות ממשלתית. לדוגמה, העדר גישה שווה (סימטרית) למידע קריטי משפיעה על רמת הסיכון שבהקמת המיקרוגריד, וכפועל יוצא גם על תנאי המימון של מרכיביו. כשל שוק נוסף אשר בא לידי ביטוי במשק הישראלי נובע מאי-הפנמה של התועלות החיצוניות שבהקמת מתקנים לייצור אנרגיה מתחדשת, וכפועל יוצא מכך, יצירת פער בין ההספק הנדרש לבין הספק המותקן (של אנרגיה מתחדשת). אף כי מנגנון המדיניות של תעריפי הזנה (feed-in tariff) נועד לצמצם פער זה, הרי שהפער בין תעריף ההזנה לבין מחיר החשמל במשק מגולם בתעריפים המערכתיים.

איכות החשמל ואמינות מערכות המיקרוגריד

עבור צרכני הקצה ישנה חשיבות רבה לאספקה מתמדת, רציפה ואיכותית של חשמל. בעידן הטכנולוגי בו אנו נמצאים, כל הפרעה באספקת החשמל עלולה לפגוע במשק. ערכה הכלכלי של יציבות הרשת בא לידי ביטוי הן בעלות של אי-אספקת החשמל ועצירת הפעילות הכלכלית, והן בהשקעות הגבוהות הנדרשות להשגת אמינות. לכן, אחד היעדים המרכזיים בתכנון ובתפעול משק החשמל הוא שאספקת האנרגיה תהיה אמינה. אמינות (Reliability) מתבטאת בזמינות וברציפות באספקת החשמל לצרכן הקצה, והיא באה לידי ביטוי בשרשרת זרימת החשמל, שתחילתה במערך הייצור, דרך רשת הולכת החשמל בקווי מתח על ועליון, קווי מתח גבוה וקווי מתח נמוך, וסיומה בנקודת החיבור אל המתקן הפרטי של הצרכן/יצרן לרשת. אספקת חשמל אמינה מתבטאת בשני אספקטים מרכזיים:

א. אספקת חשמל רציפה תוך צמצום ההפרעות ברשת למינימום האפשרי ;

ב. אספקת חשמל איכותית תוך שמירה על יציבות התדר, איזון המתח ועוד.

הפרעות באספקת חשמל נחלקות לשני סוגים עיקריים, הפרעות חולפות והפרעות ממושכות :

א. הפרעות חולפות מוגדרות כהפרעות אשר סילוקן מתבצע באופן אוטומטי, באמצעות מערכות שליטה ובקרה המותקנות ברשת החשמל;

ב. הפרעות ממושכות הדורשות מעורבות של בקרה אנושית בפתרון. סילוק הפרעה ממושכת לאספקת החשמל כרוך בדרך כלל באיתור מקום ההפרעה באמצעות פעולות מיתוג חוזרות ונשנות ברשת, עד לאיתור הקטע בו קיימת הפרעה. לאחר שאותר הקטע בו קיימת ההפרעה נשלחים צוותי עבודה לשטח לצורך סילוק ההפרעה.

אמינות רשת החשמל נגזרת מפרמטרים רבים כגון: גיל קו הולכת החשמל, אורך הקו, סוג הקו (עילי, תת קרקעי או מעורב) סוג הציוד המותקן בקו, מספר המפסקים המותקנים בקו, מזג האוויר בסביבת הקו וכד'. אורך הקו וסוג הקו הם הפרמטרים המשפיעים ביותר על רמת אמינותו. אמינות האספקת לצרכנים המחוברים לקווים ארוכים או קווים עיליים נמוכה יותר באופן אינהרנטי מאמינות האספקה לצרכנים המחוברים לקווים קצרים או תת קרקעיים.

פגיעה באמינות אספקת החשמל, לדוגמה במקרה של הפסקות בלתי מתוכננות באספקת החשמל, מסבה כאמור נזקים כלכליים ואחרים לצרכנים. מערכות מיקרוגריד משפרות את רמת האמינות של צרכן הקצה, ומקטינות את מספר ומשך ההפרעות (הפסקות החשמל). מדידת התועלת הכלכלית שבהגדלת האמינות ואיכות החשמל כוללת בתוכה הערכה של תועלת כספית ולא כספית שהן פונקציה של הפחתת ההסתברות לארוע של הפרעות החשמל ומשך ההפרעה. המתודולוגיה המקובלת לחישוב התועלת של מיקרוגריד להגברת אמינות האספקה מבוססת על עלויות והכנסות ישירות כמו גם סקרים אקונומטריים של עלות החשמל הלא-מסופק.

עם זאת, קיימת שונות רבה באמידת עלות אי-האספקה הנובעת מהבדלים מהותיים בסוגי הצרכנים. בחלק מהאזורים זקוקים צרכני החשמל לרמת אמינות גבוהה ברזולוציה של שניות (למשל מרכזים רפואיים ומרכזי מידע) בעוד שבאזורים אחרים (למשל במגזר הביתי) לא נדרשת אותה רמה של אמינות. מכאן, שיש גם שונות רבה בעלות אי-האספקה בין סוגי הצרכנות (ביתי, תעשייתי וכיוב') ובין אזורים גיאוגרפיים, ויש להתאים את מתודולוגיית החישוב לאור פרופיל הצרכן במיקרוגריד. לדוגמה, עלות אי-האספקה ("VOLL") במשקי חשמל בצפון-אמריקה, נעה בין 3,500 ל-12,000 דולר למווט"ש (כלומר כ-40-17 ש"ל לקווט"ש), בעוד שעלות אי-האספקה בישראל נאמד בכ-110 ש"ל לקווט"ש⁵.

התרומה העיקרית של רשתות מיקרוגריד לרכיב האמינות במערכת החשמל הוא במקטע ההולכה והחלוקה, ואילו במקטע הייצור, תרומתה נמוכה יותר. זאת מאחר וקיימים פתרונות מרכזיים (לא-מבוזרים) וזולים יותר לאתגרי האמינות במקטע זה. המניע העיקרי להקמת מיקרוגרידים בארה"ב הוא השילוב בין VOLL גבוה ומצב תחזוקה ירוד של רשתות החשמל. צמצום ההשקעות בפיתוח הרשת בארה"ב ובמדינות שונות באירופה לאורך שנים, בשל שינויים מבניים במשקי החשמל ואי-וודאות רגולטורית, גרם לכך שתדירות ומשכי הזמן של הפסקות באספקת החשמל נמצאים במגמת עליה. ירידה זו באמינות מערכות ההולכה והחלוקה מאיימת על תעשיות בעלות ערך מוסף גבוה ומוסדות שירותים חיוניים. לפיכך, באזורים בהם קיים ריכוז גבוה של צרכני חשמל הרגישים להפרעות (בעלי VOLL גבוה מה-VOLL של הצרכן הממוצע), יש תועלת כלכלית משמעותית לכל שיפור באמינות הרשת תודות להקמת מיקרוגרידים.

⁵ <https://sites.hks.harvard.edu/hepg/Papers/2010/VOLL%20Final%20Report%20to%20MISO%20042806.pdf>. ראה גם סקרים של חברות ניהול המערכת בארה"ב כמו MISO <https://sites.hks.harvard.edu/hepg/Papers/2010/VOLL%20Final%20Report%20to%20MISO%20042806.pdf>

כימות תועלת הגדלת האמינות

במסגרת מחקר זה, זוהו שתי מתודולוגיות עיקריות לחישוב התועלת מהגברת אמינות האספקה:

- א. ניתוח כלכלי של תועלות המיקרוגריד, ובפרט התועלת של הגדלת אמינות האספקה⁶;
- ב. כימות עלויות אי-אספקת חשמל והצגת נתונים ונוסחאות לחישוב.

זיהוי העלויות הרלוונטיות של הקמת מיקרוגריד לצד התועלות הנובעות משיפור אמינות האספקה, מאפשרות לבנות מודל קבלת החלטות בנוגע לכדאיות הכלכלית של הקמתו. התועלת הכלכלית שבהגדלת האמינות מחושבת באמצעות שקלול תפקודו של המיקרוגריד והחיסכון המתקבל מצמצום ההפרעות באספקת חשמל. תועלת זו תלויה בפרמטרים הבאים:

- מספר ומשך הפסקות החשמל;
- היחס בין ההספק הפנימי לייצור הפנימי של המיקרוגריד לאחר הפסקת חשמל;
- שווי האנרגיה שלא סופקה לצרכנים בתוך המיקרוגריד (תלויה גם בסוג הצרכן: ביתי/ מסחרי/ תעשייתי/ שירותי);
- האנרגיה המסופקת במצבי גירעון אנרגיה.

נוסחה מוצעת לחישוב התועלות שבהגברת רכיב האמינות באמצעות הקמת מיקרוגריד מופיעה בנספח 1 לדו"ח זה.

שרידות רשת החשמל

שרידות (RESILIENCE) רשת החשמל מוגדרת כיכולת להתמודד עם נזקים פתאומיים כתוצאה מאירועים קשים וחריגים. בעבר, רכיב השרידות לא היה חלק מהותי בשיקולי הבנייה והעיצוב של מערכת החשמל, אך היום ניכר הצורך להתאים את המערכות הקיימות על בסיס שיקול זה. לאור ההתפתחות הטכנולוגית, משבר האקלים ושינויים בסביבה הפוליטית, גברה ההסתברות להתרחשותם של אירועים קשים ובלתי צפויים שיפגעו במערכת אספקת החשמל. החשיבות של רכיב השרידות גדלה בשנים האחרונות בצורה משמעותית מאחר ונפילה של הרשת כתוצאה מאירוע בלתי צפוי עלולה לפגוע באופן משמעותי באורח החיים ובכלכלה. על מנת להעריך את השרידות הקיימת במערכת הנוכחית, את יעילותה, ואת ההשפעה של תופעות הלוואי מאירועים של פגיעה ברשת יש לעשות שימוש בחישובים מתמטיים שונים המשקללים את המרכיבי המשפיעים על השרידות, בהם רכיבי המערכת, סוג הרכיבים ודרכי החיבור ביניהם.⁷

בהקשר של מחקר זה, יש לבחון את תרומתו של המיקרוגריד להגברת רכיב השרידות. ניתן לקחת דוגמה מארה"ב, שם דורש בשנים האחרונות הרגולטור הפדרלי (FERC) מחברות ניהול המערכת להגדיר את רכיב השרידות של המערכות אותן הם מנהלים, ולפרט את הצעדים שהן מתכננות על מנת להגביר את החוסן לרמה הנדרשת. עם זאת, הערך הכלכלי של רכיב השרידות טרם כומת כספית, מעבר לעלות רכיב האמינות (אי-אספקה). תמחור שכזה יסייע להערכת התועלות של המיקרוגריד לרכיב השרידות אך גם לצורך תמחור שירותי חוסן, במידה שה-FERC יחליט לתמחר אותם. עד כה, אין אינדיקציה ברורה מהרגולטורים בישראל או במדינות נוספות בכל הנוגע למדיניות הטמעת רכיב השרידות במערכת בכלל, ולתרומת המיקרוגריד לשרידות המערכת בפרט.

⁶ ieeexplore.ieee.org/document/4202248

⁷ <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1205/1205.0768.pdf>

חסכון בהשקעות הון, חסכון בדלקים ובאיבודי אנרגיה, ויתרונות תפעוליים אחרים

צמצום עלויות רכישת חשמל בייצור עצמי

לאורך שעות היממה ועונות השנה, ישנם זמנים בהם עלות ייצור חשמל עצמי זולה יותר מאשר רכישת החשמל מהרשת, ולהיפך. חיסכון זה נובע מעלות ייצור עצמי נמוכה יותר, שכן בנוסף לעלות הייצור המשקית רכישת חשמל מהרשת כוללת גם עלות נוספת של הולכת החשמל לצרכנים ושל ההשנאה. לפיכך, הקמת מיקרוגרید מאפשרת חסכון כלכלי תודות לאופטימיזציה של רכישת החשמל הזול ביותר בכל זמן נתון. לדוגמא, בשל ירידת מחירי הפאנלים הסולאריים, עלות הייצור של קוט"ש חשמל סולארי המותקן על גג המבנה של הצרכן זולה יותר מאשר רכישת אותו הקוט"ש מחברת החשמל. על פני 20 שנה, החיסכון הממוצע של תושבי ארה"ב אשר הותקנה בביתם מערכת סולארית בשנת 2011, צפוי להיות כ-20,000 דולר.⁸ לחילופין, ייצור חשמל במתקני קוגנרציה עשוי להיות זול יותר מרכישת חשמל מהרשת, במקרה בו לצרכנים במיקרוגרید נדרש שימוש באנרגיה תרמית (קיסור).

חסכון בדלקים (כולל איבודים)

הקמת מיקרוגרید עשויה להביא לחסכון משמעותי ולהתייעלות במשק החשמל תודות לצמצום האיבודים ברשת, הנאמדים ב-10%-5 מסך ייצור החשמל. חסכון נוסף עשוי להתקבל משימוש במיקרוגרید המשלב קוגנרציה מבוצרת בנצילות גבוהה, כאשר השימוש בחום השירי מגדיל את הכדאיות הכלכלית של מיקרוגרید ביחס למחז"מים מרכזיים.⁹ אם הקוגנרציה המבוצרת מחליפה טכנולוגיות ייצור מיושנות, החיסכון עשוי להיות אף יותר גבוה, משום שתחנות כוח ישנות פועלות בנצילות של 30%-40% בלבד. השימוש בחום השירי בקוגנרציה מבוצרת לצורך קירור, צפוי להפחית את שיא הביקוש של צרכני המיקרוגרید ולצמצם את הצורך בהפעלת תחנות יקרות בשעות ביקושי השיא המערכתיות.

רכיב נוסף של חסכון כלכלי עשוי להתקבל ממיקרוגרید הפועל על זרם ישר "DC", תודות לצמצום אובדן החשמל בעת ההמרה של הזרמים (AC ל-DC) המוערך בכ-15%-5 מסך הייצור. זאת מאחר ומרבית ה-DC (כולל תאי דלק, סוללות, ו-PV) ממילא מספקים או מקבלים חשמל DC, וכמו כן מכשירי חשמלי שונים יכולים לפעול על DC (Asmus & Lawrence, 2016a). מיקרו-גרידים מבוססים על זרם ישר בלבד מונעים את האיבודים הנובעים מהמרה בין DC ל-AC. הדבר מתאפשר מאחר שרוב המשאבים המבוצרים (כולל תאי-דלק, פוטו-וולטאי, וסוללות) מספקים או מקבלים זרם ישר, ומרבית הצרכנים, קרי מכשירי החשמל (תאורה, חימום, וקירור) מסוגלים לפעול על זרם ישר. יתר על כן, עלות הדלקים של אנרגיות מתחדשות שהן בטבען זרם ישר (למשל, פוטו-וולטאי) אפסית, ולכן הן יוצרות גידור בפני תנודתיות במחירי הדלקים. רשת מבוססת על זרם ישר המחוברת לרשת הארצית ללא סנכרון עשויה לפשט חיבורים עם רשת ה-AC. כך, יוכל המיקרו-גריד להכיל מרכיבים נוספים ללא השקעה הנדסית מהותית.

חסכון בהשקעות הון בהולכה, חלוקה, והשנאה

הקמת מערכת מיקרוגריד יכולה לסייע בדחייה של השקעות הון בשדרוג מקטעי ההולכה והחלוקה. זאת, תודות למרכיבים הבאים במיקרוגריד:

א. הטמעת ייצור עצמי – מאפשרת ייצור מקומי עבור צרכנים בסביבה גיאוגרפית מצומצמת, תוך הפחתת הצורך בהשקעות חדשות במקטעי ההולכה וחלוקה ארוכים;

⁸ מתוך: <https://cleantechnica.com/2013/10/08/advantages-disadvantages-solar-power/>

⁹ Barker et al., 2001; Lovins & Rocky Mountain Institute, 2002).

¹⁰ (Barker et al. 2001; U.S. Department of Energy & U.S. Environmental Protection Agency, 2012).

- ב. הטמעת משאבי צד-ביקוש וניהולם – אספקת חשמל מיצרנים לצרכנים בשילוב תקשורת מהירה ודו-כיוונית (רשת חכמה) המאפשרת התאמה של הצריכה לכושר הייצור והפעלה של תוכניות לניהול צריכה (Demand Side Management). כך, ניתן להשיג ייעול, חיסכון, צמצום עלויות, שרידות, שיתופיות והגברת אמינות. הרשת החכמה מצטיינת ביכולת לנתב את אספקת החשמל בדרך אופטימלית על מנת להגיב למגוון רחב של מצבים, לעודד את המשתמשים לשנות את אופן הצריכה (למשל, עידוד השימוש בשעות השפל) או לחילופין, גביית פרמיה על שימוש באנרגיה בשעות שיא הביקוש ואף כיבוי מכשירים נבחרים (בתאום עם הצרכן) על מנת להפחית את הביקוש.¹¹ מערכת הניהול החכם של המיקרוגרید יכולה לתפעל את החיבורים לרשת החלוקה. במצב בו מתרחש חוסר איזון במקטע החלוקה, מערכת הבקרה מסוגלת לנתק את המיקרוגרید מרשת החלוקה בצורה חלקה ובטוחה וללא הפרעה לחלוקת החשמל לצרכנים.¹² צמצום הגידול בביקושי השיא מפחית את הצורך בשרדוג מקטעי ההולכה והחלוקה ומאפשר לדחות השקעות הון במקטעים אלה.¹³
- ג. הטמעת מתקני אגירת אנרגיה חשמלית – מאפשרים לטפל בתנודתיות הרשת. האגירה מסייעת להתגבר על מגוון בעיות במקטע הייצור, דוגמת שיאי ביקוש, ייצוב תדר, רזרבה סובבת ברשת, ואמינות אספקה. במקטע ההולכה, תורמת האגירה לייצוב רמות עומסי הביקוש, הקלה על עומסים בקווי הולכה ועוד. במקטע החלוקה, מסייעת האגירה להקטנת ביקושים, ביזור, התמודדות עם תעריפים משתנים בשעות שונות והגברת אמינות האספקה.¹⁴ הניסיון בעולם מלמד כי אגירה היא כלי מוכח לשיפור יעילות שוק החשמל ותפעול מערכת החשמל. השימוש הבולט של מתקני אגירה הוא הסטת עומסים על ידי אגירת אנרגיה בשעות השפל ופריקה לרשת בשעות העומס, אשר יכולה לספק מקור זול יחסית בשעות הביקוש היקרות ולהגדיל את הכלכליות של המערכת. לדוגמא, מערכת המיקרוגרید מאפשרת אינטראקציה בין הגנראטורים באופן אוטומטי בזמן אמת וכן שליטה על מתקנים צורכי חשמל והסטת הצריכה שלהם לשעות בהן ייצור החשמל זול יותר. כמו כן, ניתן להחליט על הטענת מערכת אגירה (סוללות) ממקור סולארי. מאחר והמערכת מוזנת גם מהרשת הארצית, הרי שכאשר עוברים לשעות פסגה (בצהריים), המערכת הסולארית (הזולה יותר) תשמש לצריכה עצמית ואילו בשיא הביקוש (אחר הצהריים), יספק החשמל האגור בסוללות את הביקוש.
- ד. צמצום מגמת הגידול בשיא הביקוש בצריכה מהרשת - בטווח הקצר והבינוני, שיא הביקוש לחשמל אינו קטן אלא רק שיא הביקוש בצריכה מהרשת. אי לכך, קטן הצורך בביצוע השקעות חדשות ובכך ניתן לדחות השקעות הון במקטעי ההולכה והחלוקה. במצב הנוכחי, לאור הפחתת ההשקעות ברשת ההולכה והחלוקה, יש צורך בכלים לניתוח כמותי של דחיית השקעות.

פירוט נוסף מופיע בנספח 3 לדו"ח זה (חיסכון בהשקעות תשתית ברשת ההולכה והחלוקה).

דחיית השקעות ברשת ההולכה

הייצור המבוזר עשוי להאריך את משך השימוש במתקני הולכה קיימים, ולדחות השקעות נדרשות ברשת ההולכה:¹⁵

¹¹ : <https://www.google.co.il/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0ahUKEwiE1ZPUtbDVAhUJCMAKHU2xDz0QFqhQMAc&url=http%3A%2F%2Fwww.neaman.org.il%2FNeaman2011%2Fuserdata%2FSendFile.asp%3FDBID%3D1%26LNGID%3D2%26GID%3D6427&usq=AFQjCNF2p3fiQWnppJhBMFBws0XXUiPBOA>

¹² : <http://www.theenergytimes.com/derms/self-generation-microgrid-world>

¹³ : http://assets.fiercemarkets.net/public/smartgridnews/mckinsey_demand_side_mgtm.pdf

¹⁴ : <http://www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1&LNGID=2&GID=4204>

¹⁵ : http://www.ontarioenergyboard.ca/oeb/ Documents/EB-2007-0630/report_Power_Advisory_20080922.pdf

- א. גישת שיווי המשקל בטווח הארוך – בה התועלות מוערכות בהתבסס על השינויים בעלויות הגלומות בהשקעות ברשת ההולכה: לכל עלייה בהספק של הייצור המבוזר פוטנציאל לצמצום עלויות בהספק רשתות ההולכה. יתרונותיו של הייצור המבוזר על פי גישה זו נמדדים בהתבסס על השינויים בעלויות ההשקעה, כאשר הגידול בעלויות לאורך תקופה של מספר שנים יכול להיות מחולק בעלייה בהספק ההולכה על פני אותה תקופת זמן. ההשקעה המתקבלת בהולכה תמדד ביחידות \$/kVa. כאשר מדובר בדחיית השקעות, יש להכפיל את החסכון בזמן הדחייה.
- ב. גישת תועלות מיקום - היתרונות מפרויקטים של ייצור מבוזר מונעים בעיקר ע"י מיקומם, מאפייני הרשת עליה הם מותקנים ותפעולם של המקורות. לכן, פרויקטים מסוימים יכולים לחסוך בהשקעות הולכה יותר מאשר פרויקטים אחרים, וזאת כתלות במקומם. אם למשל השקעות הולכה אשר ניתנות לדחייה על ידי ייצור מבוזר מושפעות מגידול בעומסים, ניתן להניח כי יתרונות אלו לא יתקבלו באזורים אשר אינם מאופיינים בגידול בעומסים.

דחיית השקעות ברשת החלוקה

הקושי בפיתוח מתודולוגיה להערכת הערך הכלכלי מדחייתו של הייצור המבוזר, מושפע מההיזון החוזר שבין מודל אידאלי של רשת חלוקה לבין הרצון להשפיע על רמת התועלות מהייצור המבוזר. על מנת ליצור שיווי משקל צריך לקחת בחשבון את העקרונות הבאים:

- חישוב תועלת דחיית ההשקעות ברשת החלוקה צריך לשקף את תכנון ומבנה רשת ההולכה וההשקעות החדשות אשר יידרשו בעתיד;
- תועלות הייצור המבוזר הן מקומיות ותלויות בתנאים האזוריים כגון: ביקושי הצרכנים, מבנה קווי החלוקה באזור, הציוד באזור וכמות מערכות הייצור המבוזר המחוברות באזור;
- החישוב צריך לשקף את כל ההשפעות שיש לטכנולוגיית הייצור המבוזר על הצורך בהקמת מבנים חדשים;
- ערכו של הייצור המבוזר בתהליך תכנון רשת החלוקה יכול לעלות בשל התחייבויות חוזיות, דוגמת מפעיל בלעדי קיים למערכות ולציוד המותקנים באזור;
- דחיית השקעות ברשת החלוקה בעזרת הייצור המבוזר צריכות להתאים להעדפות התקציביות של הצרכנים באותו אזור;
- ערך דחיית ההשקעות תלוי בכמות הייצור המבוזר ביחס להספק.

במסגרת חישוב יתרונות אלו, מוצע לקחת בחשבון ערך נוסף של "אופציונליות" הטמונה במרכיבי המיקרוגריד. ההשקעות העיקריות ברשת החלוקה אינן גמישות לשינויים ולהתאמות לאורך זמן, במכלול הפרמטרים שעל בסיסם התקבלה החלטת ההשקעה הראשונית. השוואות בין השקעות במיקרוגריד לבין השקעות בתשתית הולכה וחלוקה קונבנציונליות, המבוססות ברובן על חישוב ערך נוכחי מהוון, אינן לוקחות בחשבון את ערך האופציונליות המגולמת במיקרוגריד. אף ששיטות לחישוב הערך של אופציונליות כבר מקובלות בתחומים אחרים במשק האנרגיה^{16,17}, רגולטורים וקובעי מדיניות במשק האנרגיה אינם מחשבים ערך זה במהלך בדיקת הכדאיות הכלכלית של חלופות להשקעות בתשתית ההולכה והחלוקה.

¹⁶ Electric Power Research Institute (1995). *Option Pricing for Project Evaluation an Introduction*.

¹⁷ Dixit, A.K. and Pindyck, R.S. (1994) *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press

שיטה מוצעת לכימות התועלות הללו מופיעה בנספח 3 לדו"ח זה.

אנרגיות מתחדשות ותרומה לסביבה

מקורות אנרגיה טבעיים ומתחדשים אינם פוגעים כלל או פוגעים פגיעה מוגבלת בסביבה ביחס למתקנים המפיקים אנרגיה ממקורות שאינם מתחדשים. מקורות אלו אינם משחררים גזים רעילים או פחמן דו חמצני שנובעים משריפת דלקים, וכך מופחת זיהום האוויר ופליטת גזי החממה. השימוש באנרגיה המתחדשת מביא עימו לפיכך תועלות כלכליות וסביבתיות: חסכון בהוצאות המערכת וצמצום ההשפעות הסביבתיות - תועלות אותן ניתן לקבל גם ממתקן המיקרוגריד. מיקרוגרידים נחשבים כאמצעי בולט לאינטגרציה של אנרגיה ממקורות מתחדשים בהיקפים שונים במשק החשמל.

כללי משק החשמל מגדירים¹⁸ "מתקן אנרגיה מתחדשת" כ-:

- א. מיתקן ממקור אנרגיה מתחדשת שלצורך הפעלתו לא נדרש שימוש בדלק פוסילי;
- ב. מיתקן ממקור אנרגיה מתחדש שהמקור ליצירתה הוא שמש או פסולת, שלשם ייעול ותמיכה בהמרת אנרגיה ממקור האנרגיה לחשמל, רשאי להסתייע בדלק פוסילי בהיקף שאינו עולה על 15% מהייצור השנתי של החשמל, ובהיקף שלא יעלה על 25%, אם קבע המנהל כי קיימת תרומה מיוחדת לזמינות והפעלה יעילה יותר של מערכת החשמל הארצית, בכפוף למגבלות שיקבע המנהל לפי סוג טכנולוגיה, והיקף שעות הייצור בדלק פוסילי;
- ג. מקורה הבלעדי הוא אחד מאלה: שמש, רוח, מים, פסולת אורגנית, שפכים או תופעות טבע אחרות;¹⁹
- ד. מיתקן אחר, בהספק שאינו עולה על 20 מגוואט, שהמנהל אישר כי מבחינת הפעלתו יש לראותו כמיתקן אנרגיה מתחדשת, לרבות ייצור חשמל נקי מחום או לחץ שיורי לאחר הליך ניצול דלק פוסילי עיקרי.

התמודדות עם העלייה במחירי הדלקים

ככל שמקורות האנרגיה הנפוצים והמתכלים (נפט, פחם, גז טבעי) מצטמצמים, כך עולה מחירם בשוק, וביחס ישר גם מחירם של מוצרי תעשייה, מזון וכדומה.²⁰ מחקרים שנעשו בניו יורק מלמדים כי השימוש באנרגיות מתחדשות מצמצם את הוצאות המערכת בסעיף רכישת דלקים, וצמצום השימוש בתחנות כוח העושות שימוש בדלקים מחצביים יקרים. הרגולטור המקומי New York Independent System Operator (NY ISO) הראה כי הוספת 8,000 מגהוואט של אנרגיית רוח בניו יורק עד שנת 2018 תוביל לחיסכון של 1.3 מיליארד דולר לשנה בעלויות תפעול המתקן המהוות 65 דולר לכל צרכן. המחקר הצביע על הצורך בהשקעה בתשתיות החשמל על מנת להתמודד עם הייצור הנוסף ממקורות מתחדשים. עם זאת, השקעה זאת היא נמוכה יותר ממחירי החשמל הנמכר - ולכן נותרת רווחית.²¹

השפעות סביבתיות

על פי נתוני המשרד להגנת הסביבה, משק החשמל בישראל הוא מבין התורמים המרכזיים לזיהום האוויר. בתהליך ייצור החשמל באמצעות שריפת דלקים מחצביים נפלטות לאטמוספירה מזהמים רבים בהם גופרית דו-חמצנית (SO_2), תחמוצות חנקן (NO_x), חומר חלקיקי (PM) ופחמן דו-חמצני (CO_2). תחנות הכוח בישראל תורמות כ-65% מסך הפליטות השנתיות של תחמוצות גופרית, 45% תחמוצות חנקן, 38% חלקיקים, ו-60% פחמן דו חמצני. ייצור חשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות, מונע זיהום זה וחוסך את העלויות הנלוות לו (טבלה 1).

¹⁸ : https://www.nevo.co.il/law_html/Law01/159_027.htm

¹⁹ : <https://pua.gov.il/Standards/Documents/1.pdf>

²⁰ מתוך : <http://www.ecowave.org.il/אנרגיה-מתחדשת/>

²¹ מתוך : <http://www.wri.org/blog/2014/06/shifting-renewable-energy-can-save-us-consumers-money>

סוג הפליטה	כמות ממוצעת הנפלטת במהלך ייצור (גרם לקוט"ש)	עלות חיצונית לטון פליטה (\$/טון)	עלות חיצונית לטון פליטה (\$/טון)
SO2	1.7	7,420	7,420
NOX	1.8	4,297	4,297
PM	0.06	10,590	10,590
CO2	741	22	22
סה"כ	0.0375		

טבלה 1: אומדני עלויות פליטת מזהמים במהלך ייצור קוט"ש קונבנציונאלי בשנת 2009.

מנתוני רשות החשמל עולה כי תרומתם של מקורות מתחדשים לייצור החשמל בישראל עמדה בשנת 2016 על כ-2.6% מסך הייצור בפועל. בשנים האחרונות התווספו למשק כ-900 מגוואט ממקורות אנרגיה מתחדשים. רשות החשמל ומשרד האנרגיה העריכו כי צפוי פער בין הייצור המוגבל בפועל ממקורות אלו לבין יעדי הממשלה לפיהם 10% מצריכת החשמל בשנת 2020 תסופק ממקורות מתחדשים. כתוצאה מכך, בשנים 2017-2018 נוספו מכסות נוספות לייצור אנרגיה סולארית כדי להבטיח עמידה ביעד (טבלה 2). מבין המכסות שהגדירה הממשלה בתחום האנרגיה המתחדשת ניכר קושי במימוש אנרגית הרוח (בעיקר כתוצאה ממגבלות ביטחוניות וסביבתיות המעכבות את התכנון הסטטוטורי) וכן במימוש אנרגית ביוגז (כתוצאה מפוטנציאל נמוך למימוש תחום זה בישראל). מכאן, שיש לשאול האם קידום המיקרו-גריד יעזור להשגת היעדים האלה בעלות נמוכה יותר.

מכסה (מגוואט)	טכנולוגיה
1870	אנרגיה סולארית
830	אנרגיית רוח (קטן+גדול)
160	ביוגז
50	ביומסה
2910	סה"כ

טבלה 2: מכסות ייצור באנרגיה מתחדשת עפ"י החלטת ממשלה 3484 והסדרות הרשות²²

רשות החשמל תמחרה את עלות הזיהום הנחסך בפרמיות המוענקות ליצרני חשמל באנרגיה מתחדשת (הפרמיה ניתנת בעבור ייצור חשמל נקי אשר מפחית את פליטת המזהמים). בטבלה 3 להלן ניתן לראות כי הפרמיה נעה בין כ-6 אג' ל-10 אג' לכל קוט"ש מיוצר. פרמיות אלו נועדו לעודד את צמצום פליטת המזהמים והן משקפות חלוקה למקבצי שעות,

²²E :

<https://pua.gov.il/RenewableEnergy/Documents/%D7%94%D7%A1%D7%93%D7%A8%D7%95%D7%AA%20%D7%94%D7%A8%D7%A9%D7%95%D7%AA%20%D7%9C%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%95%D7%AA%20%D7%9E%D7%AA%D7%97%D7%93%D7%A9%D7%95%D7%AA.pdf>

כפונקציה של תמהיל הדלרים בייצור החשמל בכל מקבץ שעה נתון ('מש"ב'). לדוגמה, הפרמיה גבוהה יותר בשעות השפל, מכיוון שרוב החשמל בשנה בה נקבעו הפרמיות הופק מפחם.

נספח 2 לדו"ח זה כולל מידע נוסף על חישוב עלויות סביבתיות המגולמות בתעריפי החשמל ומדיניות משרד האנרגיה ורשות החשמל לעידוד אנרגיה מתחדשת.

ניתן להחשיב פרמיה זו כחיסכון המתקבל בשימוש במערכת מיקרוגרید מבוססת באנרגיה מתחדשת, המפחיתה את פליטת המזהמים. עם זאת, פרמיות אלו משקפות בעיקר את עלויות הנזקים הבריאותיים בהתאם לחישובים של EXTERNE (ארגון של האיחוד האירופי) למדינות בדרום-מזרח אירופה, נתונים הנחשבים כמיושנים. סט נתונים חלופי, דוגמת נתוני ה-NEEDS PROJECT, משקף בנוסף גם את השפעת הנזקים הללו על רמת אי-השוויון במדינה. לפיכך, כשמשווים את התוצאות של אקסטרן-אי לתוצאות של הנידס פרויקט וסקרים בקליפורניה, מתברר שנתוני אקסטרן-אי נותנים תוצאות נמוכות יותר, ולכאורה נזק סביבתי מצומצם יותר.

פרמיה (אגורות לקוט"ש)							
עונה	מש"ב	חלקיקים	תחמוצות חנקן	תחמוצות גופרית	פחמן דו חמצני (למעט carbon neutral)	סה"כ (100% מהפרמיה)	
חורף	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
מעבר	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
קיץ	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	

$$\begin{aligned}
 P_p &= \text{רמת פליטת חלקיקים ביחידות גרם/קוט"ש} \\
 P_N &= \text{רמת פליטת תחמוצות חנקן ביחידות גרם/קוט"ש} \\
 P_S &= \text{רמת פליטת תחמוצות גופרית ביחידות גרם/קוט"ש} \\
 P_C &= \text{רמת פחמן דו חמצני למעט פחמן נייטרלי ("carbon neutral") ביחידות גרם/קוט"ש}
 \end{aligned}$$

טבלה 3: פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות באגורות לקוט"ש²³

יתרונות המיקרוגרید בשילוב אנרגיה מתחדשת

האתגר העיקרי בשימוש באנרגיה מתחדשת כמקור עיקרי להפקת חשמל הוא זמינותה. זאת, בשל תנאים טבעיים שאינם בשליטתו של מפעיל המערכת, לדוגמה מזג האוויר, שעות היממה או עונות השנה. משום כך, נפגעת אמינות אספקת החשמל. מערכת המיקרוגרید יכולה להציע פתרון לבעיה זו תודות לניהול החכם שלה והשליטה על הביקושים, אפשרות האגירה ותפעול המערכת באופן יעיל יותר. מיצוי הפוטנציאל המלא של אנרגיה מתחדשת בישראל יתאפשר רק אם ישולב

²³ מתוך: <https://pua.gov.il/rates/documents/110102.pdf>

בה רכיב משמעותי של אנרגיה בת-שיגור (DISPATCH) או אגירה, אשר יאפשרו ניהול מושכל של היצע האנרגיה המתחדשת המיוצרת בהתאם לביקושים.²⁴

בשל רגישותה לביקושים, להספק המיוצר ולאפשרות האגירה, יכולה מערכת המיקרוגרید לתת פתרון לסוגיית אי הוודאות ולשינויים בתדירויות של האנרגיות המתחדשות. התועלות הסביבתיות של השימוש במערכת מיקרוגרید כוללות כאמור הפחתה וצמצום של פליטת מזהמים לסביבה, תודות לשימוש באנרגיה מתחדשת (כגון רוח, סולארי) אך גם תודות לשימוש יעיל יותר בדלקים פוסיליים במערכות קוגרנציה (CHP), שילוב אמצעים להתייעלות אנרגטית והפחתת צריכת החשמל באמצעות אופטימיזציה של אמצעי הייצור. להלן פירוט יתרונות המיקרוגרید בשילוב של אנרגיה מתחדשת ברשת החשמל:

א. ניהול חכם - שילוב אנרגיה מתחדשת באמצעות שימוש ברשת חכמה מחייב מעבר מתפיסת ניהול הרשת המבוססת על הצורך להבטיח עומס בסיס (baseload) לתפיסת ניהול רשת המבוססת על תמהיל גמיש ובר-שיגור (DISPATCHABLE) של תחנות כוח מאנרגיה מתחדשת. במיקרוגרید, כסוג של רשת חכמה, יכולים מספר ספקי אנרגיה גמישים לשלוט בניהול העומס במשך היום והלילה (לדוגמה, שילוב של אנרגיה סולארית וגז טבעי, או אנרגיה גיאותרמית ורוח עם כלים של ניהול ביקוש) ללא הפסקות חשמל.

ב. איזון - רשתות חכמות מאזנות את הביקוש באזור. רשת חשמל חכמה מחברת בין אנרגיה מתחדשת מבוצרת לקוגרנציה, ומפיצה את החשמל בעילות גבוהה. טכנולוגיות מתקדמות לניהול ובקרה של רשת החשמל עשויות אף הן לתרום לשיפור יעילותה. לדוגמה, מוני חשמל חכמים המציגים את השימוש בחשמל ואת העלויות בזמן אמת ובכך מסייעים לצרכני אנרגיה גדולים לצמצם ואף להפסיק את צריכת החשמל לפרק זמן נתון, על פי אות-קשר ממפעיל הרשת, ולהימנע מתשלום מחירי חשמל גבוהים.²⁵

ג. שילוב מקורות - ניהול חכם של המיקרוגרید מאפשר את מיקומם של אמצעי הייצור באתרים שונים, וכן שימוש במגוון מקורות במיקרוגרید, דוגמת: אנרגיה סולארית, אנרגיית רוח, אנרגיית הידרו ועוד. זאת, כתלות במיקומו של המיקרוגרید ופרופיל הצרכנים באותו אזור. בנוסף, ניהול חכם של מתקני אגירה הפרוסים במגוון מיקומים פיזיים, מאפשר ניהול יעיל יותר של חיי סוללות, שיפור ביעילות מתקני אגירה מבוססי flywheels, מתקני שאיבת מים ואחסון. הניהול החכם משפר את יעילות הייצור והאחסון ומאפשר אופטימיזציה של גנרטורים ומתקני אגירה.²⁶

דוגמה ספציפית לניהול חכם של מערכת החשמל היא השיפור במערך הכלים של מנהל המערכת לשילוב אנרגיה מתחדשת בכלל, ואנרגיה סולארית בפרט. לצד הגידול בחדירת אנרגיה סולארית לרשת, מנהל המערכת מתמודד היום עם מגבלת הזמינות של אנרגיה זו לשעות היום בלבד, ועם התנודתיות הגבוהה שלה. הגבלות אלו מגדילות את הדרישות ל-LOAD FOLLOWING ו-RAMPING. עד כה, נאלצו חברות ניהול מערכת בעולם שאין להן משאבים הידרו-אלקטריים או ניהול ביקושים מפותח ובכמויות הנדרשות, להקדים את הפעלת תחנות ה-BASELOAD – צעד לא-יעיל מבחינה תפעולית וכלכלית. אף שניתן לצמצם את השימוש באנרגיה המתחדשת לצורך איזון הרשת, הרי שצמצום זה מביא לבזבז ומפחית את הסיכוי לעמוד ביעדים הלאומיים לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים. המיקרוגרید, הפועל באזור גיאוגרפי נתון, יכול לתת מענה גם לסוגיית ה-RAMPING וגם לתנודתיות הספציפית של מקורות האנרגיה המתחדשת באזור זה.

²⁴ <http://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2013/07/%D7%93%D7%95%D7%97-%D7%95%D7%A2%D7%93%D7%AA-%D7%A7%D7%A0%D7%93%D7%9C.pdf>

²⁵ : http://www.greenpeace.org/israel/Global/israel/image/2013/03/energy%20revolution_isr.pdf

²⁶ : http://docs.circutor.com/docs/Cat_Renovables_EN.pdf

המיקרוגרید יכול לכלול את משאבי ייצור (כולל רוח ושמש), אגירה, ניהול ביקוש, וייצור קונבנציונלי בהיקפים האופטימאליים לאזור – כל זאת בעלות נמוכה יותר מהמשך השימוש בכללי תפעול מבוססי "עסקים כרגיל".

טעינה מנוהלת של רכבים חשמליים

רשת חכמה למערכת תחבורה מבוססת רכב חשמלי מאפשרת טעינת רכבים חשמליים בשיטה מנוהלת (הגישה הוצגה בעבר ע"י חברת בטר-פלייס). ניתן לטעון רכבים חשמליים בצורה בלתי-מנוהלת (unmanaged), כאשר טעינת הרכב מתבצעת ללא קשר למחיר/תעריף החשמל או אילוצי התשתית המקומית והארצית; או בצורה מנוהלת (managed), לשביעות רצון הלקוח אך על בסיס שיקולים של עומס על הרשת, ניצול אנרגיות מתחדשות (כפונקציה של זמינות) וכדומה. על פי הערכה, אסטרטגיית טעינה מנוהלת יכולה לחסוך חלק מהותי מעלות החשמל (יותר מ-10%) וכפועל יוצא, להתחשב באילוצי תשתית ובזמינות של אנרגיות מתחדשות.²⁷

מיקרוגרید ככלי להטמעת אנרגיה מתחדשת: כימות התועלת

לשילוב יעיל של אנרגיה מתחדשת ברשת ושימוש במיקרוגרید ככלי להטמעה יעילה של מקורות אלו יש עלויות ותועלות כספיות:

- עלויות התקנה עבור אנרגיה מתחדשת ומתקני אגירה;
- עלויות דלקים וחשמל (אבטחת אספקה);
- עלויות הנובעות כתוצאה מהפסקות חשמל;
- משך חיי הפרויקט ועלות ההון הדרוש;
- הזדמנויות לדחיית הוצאות על הולכה וחלוקה;²⁸
- תועלות ישירות למשק החשמל ע"י צמצום צריכת דלקים ושימוש בהון לבניית מתקני ייצור קונבנציונליים;
- הפחתת הנזקים לסביבה מייצור חשמל, ובראשם צמצום פליטות מזהמים כתוצאה מצמצום שריפת דלקים מחצביים;
- מתקני אגירה וניהול ביקושים הכלולים במיקרוגרید ותורמים לייעול מערכת עם אנרגיה מתחדשת, ובכך יוצרים חיסכון. החיסכון נובע מהחלפת כלים קונבנציונליים באספקת ייצוב תדר, רזרבות וכוח ריאקטיבי על ידי מכלול משאבים שיכולים לתת מענה ביעילות תפעולית וכלכלית גבוהה.

קיימת מעגליות מסויימת בין מחיר הפחם לבין ההשקעה במיקרוגרید. במילים אחרות, תוספת של כל מגהוואט למיקרוגרید (בהינתן עלות פחם מסוימת) חייבת לקחת בחשבון שההספק האופטימלי של המיקרוגרید אמור להשתנות כפונקציה של מחירי הדלקים המאובנים, בעיקר פחם.²⁹

אספקת שירותים נלווים

שירותים נלווים הם שם כולל לפעילויות המסייעות למנהלי רשתות הולכה וחלוקת חשמל לשמור על אמינות המערכת. השירותים הנלווים שומרים על זרימת חשמל בתדר ובכיוון הנכון, מאזנים בין הביקוש להיצע ומסייעים למערכת להתאושש מאירועי הפסקות חשמל. אם מערכת החשמל כוללת מקורות אנרגיה מתחדשת, נדרשים שירותים נלווים

²⁷ : <http://www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1&LNGID=2&GID=2765>

²⁸ <http://www.sustainablepowersystems.com/wp-content/uploads/2016/03/GTM-Whitepaper-Integrating-High-Levels-of-Renewables-into-Microgrids.pdf>

²⁹ <http://escholarship.org/uc/item/8rc8k33w>

נוספים על מנת לאפשר יותר אמינות וודאות תפעולית.³⁰ שירותים נלווים מסופקים על ידי מפעיל המערכת, שירות ההפצה המקומי ו/או משתמשי מערכת החשמל.³¹

מיקרוגרید יכול לספק שירותים נלווים במקטעי ההולכה והחלוקה, כתלות במבנה המערכת הארצית, בגודל המיקרוגרید ובגודל נקודת החיבור. במקטע ההולכה, שירותים אלו כוללים ויסות, תמיכה בהספקים, ייצוב תדר ושירותי התנעה שחורה. במקטע החלוקה, השירותים הנלווים כוללים בעיקר שירותי עזר בניהול ביקושים אזורי. כניסת האנרגיה המתחדשת למשק החשמל וחלקה ההולך וגדל כאחוז מייצור החשמל המשקי, הפכו אותה למשתנה משמעותי אשר מגדיל את הצורך בשירותים נלווים, וזאת בשלושה היבטים מרכזיים:

1. שינויים תכופים ואי הוודאות בייצור, דוגמת אי-רציפות (הרוח והשמש), מצריכים מגוון רחב של שירותים נלווים אשר משפיעים על תימחורם;
2. התרומה של מקורות האנרגיה המתחדשת משתנה בהתאם לתנאי חיצוניים כגון מזג האוויר באזור, שעות היום ועוד. אלמנט זה מחייב שירותים נלווים מורכבים יותר, שייצרו התאמה לזמנים שונים ומערכות שונות;
3. ברמה התיאורטית, השירותים הנלווים אמורים לאפשר לאנרגיה המתחדשת לספק יותר חשמל למערכת. בפועל, כמות החשמל המסופקת היא פונקציה של התכונות השונות המאפיינות כל סוג של מקור אנרגיה. המיקרוגרید יכול לשלב בתוכו מקורות אנרגיה מתחדשים, מקורות קונבנציונאליים, מתקן אגירה וניהול עומסים, כך שיוכל לתת מענה כיצרון מקומי המספק גם אנרגיה מתחדשת וגם שירותים נלווים לתמיכה ברשת. וזאת, אל מול האתגרים הכרוכים בפריסת אנרגיה מתחדשת.³²

סוגי שירותים נלווים

א. השלת תדר (Frequency control) – מערכת החשמל נדרשת לשמור בכל רגע נתון על איזון בין הביקוש להיצע, וזאת על מנת לשמור על תפקוד תקין. כאשר יחידות הייצור בתחנות הכוח פועלות כסדרן, נשמר איזון בין הביקוש וההיצע במשק, ומערכת החשמל שומרת על יציבות התדר (תדר החשמל בישראל הינו כ-50 הרץ). בעת תקלה ביחידת ייצור גדולה, התדר במערכת יורד ועלול לסכן את יציבות מערכת החשמל כולה. במצב כזה, מתבצע ניתוק מהיר של צרכנים באופן אוטומטי, ללא הודעה מראש או בזמן תגובה מינימאליים, על מנת לייצב מיידית את המערכת. זאת, עד להגעה לאיזון והחזרת התדר לטווח התקין.³³

מפעילי המיקרוגרید יכולים לספק ייצוב תדר עבור הרשת הארצית, כאלטרנטיבה לשימוש בתחנת כוח קונבנציונאלית ובמתקני אחסון. לשם כך, המיקרוגרید נדרש "לשמור בצד" כמות מסוימת של רזרבות (בין אם במתקן אגירה ובין אם בגנרטור) אשר תהיה זמינה עבור הרשת הארצית בעת הצורך. עלויות המיקרוגרید כוללות את עלות שמירת הרזרבות ואת עלויות הדלקים והתפעול הנוספות. התוצאות מלמדות על יכולת ניהולן ותפעולן של תדירות המערכות וההספקים במיקרוגרید מבודד במקביל לצמצום כמות ההספק הדרוש על מנת לשמור על התדירות בטווח הרצוי.³⁴

³⁰ מתוך: <http://greeningthegrid.org/integration-in-depth/ancillary-services>

³¹ מתוך: <https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/report-lbnl-4981e.pdf>

³² מתוך: [http://www.jweet.science-line.com/attachments/article/26/J.%20World.%20Elect.%20Eng.%20Tech.%204\(1\)%2036-41.%202015.pdf](http://www.jweet.science-line.com/attachments/article/26/J.%20World.%20Elect.%20Eng.%20Tech.%204(1)%2036-41.%202015.pdf)

³³ מתוך: <https://pua.gov.il/DomesticConsumers/Pages/Handasa3.aspx>

³⁴ מתוך: https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/value_streams_in_microgrids_a_literature.pdf

ב. רזרבה סובבת (Spinning Reserve) - רזרבת אנרגיה שניתן לחבר לרשת החשמל בהתראה של 10 דקות ולהפעיל במשך שעותיים לפחות מרגע החיבור. מטרת הרזרבה הסובבת היא לפצות באופן מהיר על אי התאמות ברשת בין ביקוש להיצע. תרחיש הייחוס לאירוע כזה הוא נפילת תחנת הכוח הגדולה ביותר הקיימת במשק, ולפיכך, על מנת לשמור על מרווח ביטחון מספק, יש להחזיק רזרבה סובבת בהספק השווה בגודלו לאותה התחנה. בישראל נקבע שיעור הרזרבה הסובבת על 600 MW. ניתן להשאיר את הטורבינות של הגנרטור הרזרבי במצב מסתובב גם כאשר אינן מייצרות אנרגיה, על מנת לצמצם את פרק הזמן הנדרש לחיבורן לרשת. לחלופין, ניתן לייצר אנרגיה בתחנת הכוח בהספק לא מקסימלי (לדוג' 85%) כאשר ההספק הלא מנוצל (15%) משמש כרזרבה סובבת למערכת. ניתן להגיע לסך ההספק הרצוי על ידי צבירת מספר תחנות בהספק לא מקסימלי המחוברות למערכת.³⁵ מערכת המיקרוגריד אינה מכילה בשגרה רזרבה סובבת כמו הרשת הארצית. המיקרוגריד מתוכנן כך שיתן מענה לביקוש הקיים תוך העמדת יכולת תגובה מהירה לביקושים והתאמה לרמות זרם החשמל. לרוב המיקרוגרידים ישנה תגובה מאוחרת לייצוב תדר ובקרת מתח, אך מיקרוגרידים בעלי יחידות אחסון נותנים מענה של רזרבה הסובבת בזמן אמת.³⁶

ג. רזרבות איטיות/תפעוליות (Operating Reserve) - אמצעי ייצור או ביקוש גמישים שיכולים להשתלב ולייצר (או להוריד ביקוש) תוך כ-30 דקות, כאשר ההפרעות מתמשכות. עתודה איטית מיועדת לגיבוי תקלות שממשיכות עד כשעותיים. בחו"ל, הצרכן (או המספק מטעמו) חייב לשלם בעד רכש עתודה איטית. בישראל, אין חובה לרכוש את השרות הזה. כמות העתודה הסובבת הנדרשת היא פונקציה של CONTINGENCY מסוים במערכת (תחנת כוח או קו הולכה).

ד. אנרגיה ריאקטיבית וייצוב מתחים (Reactive Power and Voltage Control), ופיצוי או השלמת ירידות במתח. שירות משלים זה יש לספק קרוב למוקדי העומס, מכיוון שכוח ריאקטיבי סובל מאיבודים ניכרים בהולכה. השרות הזה מסופק לרוב על-ידי השנאים באזור, אבל קיימים מכשירים אחרים המיועדים לאיזון מתחים, כולל קפיטורים ומתקני ייצור מבוזרים^{37,38}. ייצוב המתחים מגביר את איכות החשמל ויציבותו בתוך הרשת. עבור המיקרוגריד, עלותה של תמיכה זו נובעת בעיקר מצמצום תפוקת החשמל הריאלי (REAL POWER). במשקים בחו"ל שירות זה מסופק בהתאם לתעריפים מפותחים ולפעמים באמצעות הוצאת מכרזי RFO על-ידי מנהל המערכת או חברות החשמל האנכית המפוקחת.

ה. ייצוב מתחים – בדומה לתמיכה באספקת החשמל בזמן אמת, המיקרוגריד, כסוג של משאב אנרגיה מבוזר הקרוב לעומסים, יכול לספק תמיכה במתחים עבור הרשת הארצית.

ו. התנעה שחורה (Black Start) – יכולת התנעת יחידת ייצור חשמל באתר במצב עלטה³⁹ ואספקת חשמל עבור הפעלה מחדש ושחזור המערכת, וזאת, במקרים חריגים של הפסקות חשמל בכלל הרשת. התנעה שחורה היא פעולה מסובכת ויקרה אשר עשויה לארוך זמן רב בהתאם לסוג הטכנולוגיה החל ממספר דקות בטורבינות גז גמישות ועד ליותר מ-24 שעות בתחנות פחמיות. המיקרוגריד יכול להפחית את השפעותיהן של הפסקות החשמל

35 מתוך: http://ceic.tepper.cmu.edu/-/media/files/tepper/centers/ceic/publications/phd%20dissertations/2006/doug_king_phd_thesis_2006%20pdf.pdf?la=en

36 מתוך: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5429547>

37 <https://ieeexplore.ieee.org/document/6749901/>

38 <https://www.iec.co.il/ElectricityProfessionals/DocLib4/shipur%20mekadem.pdf>

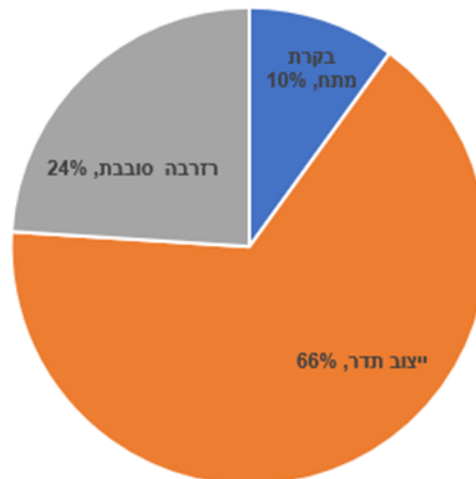
39 מתוך: רשות החשמל, החלטה 460 (3) קביעת תעריף בגין שירותי התנעה שחורה, 20.4.2015 https://pua.gov.il/decisions/documents/965_460_3_20042015.pdf

על ידי אספקת התנעה שחורה בזמני עומס קריטי ועומסים על מערכות נוספות, בכלל זה אספקת חשמל עבור עומסים מסוימים בזמן שהרשת הארצית עוברת תהליך של התנעה שחורה על מנת להפעיל מחדש את המערכת. בהינתן הפסקות חשמל בתדירות נמוכה, עלויות התפעול המשתנות הקשורות לפעולת ההתנעה השחורה במיקרוגרید זניחות. לעומת זאת, עלויות אחרות (דוגמת הכשרה, טכנולוגיה מתאימה ואחסון דלקים) יכולות להיות משמעותיות יותר.

התועלת המשקית שבאספקת שירותים נלווים על-ידי מיקרוגרידים

במדינות שונות בעולם בהן מתאפשרת מכירת שירותים נלווים למנהל המערכת, היכולת של בעל המיקרוגרید להיות שותף בשוק השירותים הנלווים נותנת פוטנציאל לייצר זרם הכנסות נוסף. תזרים זה יתרום לשיפור מצבו הכלכלי של המיקרוגרید, וגם להוזיל את אספקת השירותים הנלווים הללו. לדוגמא, אוניברסיטת פרינסטון מבצעת מעקב אחר מחירי השירותים הנלווים בשוק של פנסילבניה, ניו ג'רזי ומרילנד (PJM), ומספקת שירותים נלווים כאשר היא רואה שהמצב התפעולי של המיקרוגרید בקמפוס מאפשר לספק שירותים אלה ברווח עבור האוניברסיטה. מכיוון שפלח השוק של מיקרו-גרידים עדיין זניח, PJM טרם ביצעה ניתוחים על השפעת המיקרוגריד על עלות ואיכות אספקת שירותים נלווים. ניתוחים כאלה – אפילו כהערכות ראשונות – יהיו חיוניים לצורך קבלת החלטות על פריסה ואיתור אופטימליים של מיקרו-גרידים עתידיים.

גרף 1 להלן, מציג את מקורות ההכנסה של מיקרו-גריד לדוגמה באזור השירות של חברת חשמל BC HYDRO שבקנדה. כחברה מאוגדת אנכית, היא רוכשת שירותים נלווים ממספר ספקים ומשלמת להם בהתאם לתעריף מפוקח או בהתאם לתנאי מכרז שמאושר על-ידי הרגולטור. המיקרוגריד שבגרף נהנה מתשלומים בהתאם לתעריפים המפוקחים לכל שירות נלווה שהוא מספק. ניתן לראות כי כאשר המיקרוגריד מספק שירותים נלווים ל-BC HYDRO, מרבית רווחיו מגיעים משירות ייצוב תדר (66%) מכאן ניתן להסיק שזהו השירות בעל הערך הגבוה יותר, ולאחריו זרבה סובבת (24%) ובקרת מתח (10%). אחוזים אלו עשויים להשתנות כפונקציה של מנגנוני התשלומים הנהוגים ולאור מכלול הטכנולוגיות במיקרוגריד עצמו. למשל, אחוז ייצוב תדר עשוי לגדול במיקרוגריד שבו מקורות אגירה ו/או משאבי צד-ביקוש בעלי תגובה מהירה מספקים אחוז גדול מההספק המותקן של המיקרוגריד.



גרף 1: דוגמא לחלוקת הרווחים של המיקרוגרید משירותים נלווים⁴⁰

תועלות חברתיות

להטמעת מיקרוגרید עשויות להיות תועלות חברתיות. עם זאת, חלק מתועלות אלו אינן ישירות וחלקן לא ניתן כלל לכימות⁴¹. בין התועלות החברתיות ניתן למנות:

- נגישות שוויונית לחשמל איכותי ואמין;
- השפעת הבעלות והשליטה בניהול המיקרוגרید על קיימות חברתית;
- הרחבת ההזדמנויות הכלכליות לציבור הרחב⁴²;
- שימוש בתוכנה ובמערכות בקרה מתקדמות לצורך ניהול יעיל של משאבי הייצור וניהול הביקושים, כך שעלות החשמל יורדת;
- האזור בו מותקן המיקרוגרید נותן יתרון מובנה במשיכת חברות וייצור מקומות עבודה נוספים⁴³.

אין היום בעולם ניסיון משמעותי בכימות תועלות אלו, אשר יכול לשמש כבסיס לבניית מתודולוגיה. הניסיון הישומי שכן נצבר בכימות התועלות החברתיות של מיקרוגריד כולל מיזמים דוגמת COMMUNITY SOLAR⁴³. בדו"ח שפרסמה חברת LADWP, חברת השירותים הציבוריים המוניציפלית הגדולה בארה"ב תחת הכותרת EQUITY METRICS DATA INITIATIVE, מפורטות תכניות מדידה, ניטור ודיווח הנוגעים לכלל הצרכנים והתושבים בעיר לוס-אנג'לס. ה-EMDI מהווה את המאמץ הראשון של ה-LADWP להשתמש בנתונים כדי לתכנן בפועל מערכת אנרגיה עתידית השומרת על עקרונות של שוויון חברתי ומזעור סיכונים כלכליים וסביבתיים לכל תושב, ביחס לבייסליין מוגדר. זאת, לאור תכניות

⁴⁰ מתוך: Quantification of Ancillary Service Provision by Microgrid

http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1525684381677-886

⁴¹<http://drpwg.org/wp-content/uploads/2016/07/CSFWG-Sub-Team-2a.-Summary-Conclusions-and-Recommendations.pdf>

⁴² <https://microgridknowledge.com/white-paper/guide-to-community-microgrids/>

⁴³ http://base.socioeco.org/docs/1851_social_acceptance_and_social_innovation_in_wind_power_technology.pdf

החברה לעבור לתמהיל אנרגיה מבוזרת ונקייה יותר⁴⁴. ה-EMDI כולל מדדים של אמינות החשמל (SAIFI, SAIDI, וכדומה), משרות פניות ב-LADWP, ושוויון זכויות לעובדי קבלן, יחד עם גישה שוויונית לאנרגיה מתחדשת ושיפור באמינות ובאיכות החשמל אשר אמורים להיות תוצאה של יישום המיקרוגריד⁴⁵. בדיקה מעמיקה של מדדים אלו ואמינותם, או שכפול גישה זה בחברות חשמל נוספות או במדינות אחרות טרם בוצע⁴⁶.

סקרים שבוצעו בקליפורניה מלמדים כי אחד המדדים של תועלות חברתיות הוא מידת הקרבת הפיזית של אוכלוסייה מעוטת הכנסה לתחנות הכוח המזהמות ביותר. בשנת 2016 למשל, היו 84% מתחנות הכוח לשעות השיא (פיקריות) בקליפורניה ממוקמות ליד שכונות של עוני ומיעוטים⁴⁷. התחנות הפיקריות פולטות כ-30% יותר CO₂ למגהוואט שעה וכ-400% יותר NO_x לעומת תחנות מחז"ם⁴⁸. מערכות מיקרוגריד המבוססות על שילוב של מחז"מים ומקורות מתחדשים עשויות להביא לשיפור במדדי בריאות האוכלוסייה מעוטת היכולת ואיכות חייה, וכך גם לצמצם את ההוצאה הציבורית על שירותי בריאות עבור אוכלוסייה זו.

מאידך, הקמת ותפעול מערכות מיקרוגריד שתומכות במיזמים מסוג זה מצריכות ניהול המעודד שיתופיות בין המשתמשים. כמשאב משותף (COMMON POOL RESOURCE) מיקרוגריד סובל מחוסר יכולת למנוע שימוש במשאב המשותף במצב בו אחד המשתמשים עלול לפגוע בשל כך בזמינות המשאב למשתמש אחר (SUBTRACTABILITY). אף שנצבר נסיון רב בטיפול יעיל בבעיית המשאבים המשותפים, העלויות הנוספות הנלוות לכך גבוהות ביותר^{49,50}. יצוין שאתגר זה מתקיים גם בעצם קביעת תעריפי החשמל, שהרי מערכות ההולכה והחלוקה אף הן משאבים משותפים, והרגולטור צריך לבחון איך לחלק את העלויות בין סוגי הצרכנים. עם זאת, בעוד שחברות החשמל מתכננות ומקימות תשתיות עם מרווח רווח מסוים כדי לתת מענה להסתברות של אי-יעילות בשימוש במשאבים המשותפים – ולקבל הכרה בעלויות הנלוות לכך בתעריף – הרי שבעלי המיקרוגריד אינם יכולים להסתמך על העברת הסיכון לכלל הצרכנים.

במסגרת כימות התועלות החברתיות, אפשר לכלול גם השפעות סביבתיות. למשל, כתוצאה ממזג אוויר קיצוני כמו הוריקן סנדי⁵¹, התברר כי רוב הנזקים הסביבתיים התרחשו באזורים בהם מוקמו תחנות כוח ומתקני טיפול בפסולת מוצקה, אשר בהם גם ריכוזים של משקי בית בעלי הכנסה נמוכה. אי-הוודאות הכלכלית בתקופת שיקום האזורים האלה עלולה לגרום למשפחות מעוטות הכנסה להתמודד עם קושי כלכלי, בעיקר בגלל הריכוז המשמעותי של משרות בענפי השירותים באזור, שעלויות להיעלם במהלך תקופת השיקום. הגידול במספר משקי הבית במצב כלכלי זה תרם לעליה החדה במענקים שניתנו על ידי ה-FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, וכן לגידול בתקציבי הרווחה ובמסים. אלו גרמו להאטה נוספת בשיקום הכלכלה האזורית אחרי המשבר. לפיכך, בניית השלכות יישום המיקרוגריד בישראל, מוצע לקחת בחשבון את ההדדיות בין התועלות הסביבתיות והתועלות החברתיות.

תועלות חברתיות של מיקרוגריד ניתנות כאמור לכימות במספר דרכים. שיטה נוספת שפותחה בקליפורניה על-ידי מחלקת האנרגיה של הרגולטור (CALIFORNIA PUBLIC UTILITIES COMMISSION). שיטה זו, המכונה "מבחן העלות

⁴⁴https://www.ladwp.com/ladwp/faces/ladwp/aboutus/a-financesandreports/au-fr-corporateperformance/au-fr-corporateperformance-emdi?_afrctrl-state=1d603y3ruv_4&_afrcLoop=129740653661000

⁴⁵http://www.myladwp.com/ladwp_makes_fairness_and_equality_in_services_and_operations_a_top_priority

⁴⁶<http://microgridknowledge.com/microgrids-for-social-justice/>

⁴⁷<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516302798>

⁴⁸<http://www.cleanegroup.org/wp-content/uploads/RPP-webinar-slides-11.2.16.pdf>

⁴⁹<http://steps-centre.org/wp-content/uploads/Rural-Electrification.pdf>

⁵⁰<http://dare.uva.nl/search?identifier=b5ed77bf-d12d-421f-8d39-d684e8844eb6>

⁵¹<http://www.esa.doc.gov/sites/default/files/sandyfinal101713.pdf>

החברתית", מתמקדת בהשפעות על רווחת הציבור עם דגש על צדק חלוקתי, ובפרט בצמצום הפער במצב הכלכלי של אוכלוסיות שונות, נגישות לחשמל אמין ותרומה לתוצר. שיטה זו אינה משקללת תועלות חברתיות של מיזמים לשיתוף פעולה בינלאומי בטכנולוגיות של אנרגיה מתחדשת⁵².

מרכיב אחר אותו יש לקחת בחשבון הוא הפגיעה בהכנסות של חברות הולכת/חלוקת החשמל והשתת עלויות אלה – שנכללות בתעריפי החשמל – על אותם צרכנים שטרם חוברו למיקרוגרید וניזונים מחברת החשמל המסורתית. במקרים רבים, אין לצרכנים אלה את האמצעים כדי להנות מפרישת המיקרוגרید. כך, עלול להתרחב הפער בין צרכנים במעמד סוציו-אקונומי שונה. הנסיון המצטבר בישראל ובעולם בנוגע להשפעות של רפורמות באספקת שירותים חיוניים על אוכלוסיות מוחלשות מלמד על צורך לשמר "רף צדק חלוקתי מינימלי". למשל, באמצעות איזון אי-השוויון הטבעי בשווקים תחרותיים באספקת החשמל כאשר צרכנים תעשייתיים גדולים "אטרקטיביים" יותר עבור שחקנים חדשים בשוק, ומשקי הבית עלולים להישאר עם היצרנים הקיימים ולשלם עבור העלויות השקועות של הקמת התשתית. כנגד הנטייה ל-CHERRY PICKING של הלקוחות האטרקטיביים, נוקטים הרגולטורים מדיניות תעריפית ייעודית להגנה על הצרכנים ושמירה על האיתנות הפיננסית של חברות החשמל⁵³.

כימות התועלות החברתיות של מיקרוגריד בישראל, מחייב לקחת בחשבון את השונות הדמוגרפית והכלכלית בין אזורים שונים (כפי שמלמדים נתוני הלמ"ס) כמו גם נתוני אמינות באספקת החשמל (נתוני רשות החשמל).⁵⁴ את השפעת ההטמעה של מיקרוגריד ניתן לבדוק דווקא בפריפריה הגיאוגרפית, דוגמת אזור הנגב, שם רמת האמינות הצפויה, החשיפה למזג אוויר קיצוני, שיעור העוני, והזדמנויות תעסוקה מוגבלות מצביעים על תועלות אפשריות גבוהות מהממוצע הארצי.

נספח 8 לדו"ח זה מתייחס לסוגיה זו באופן מפורט.

דוגמה לכימות תועלות חברתיות: מכפיל כלכלי

תועלת חברתית-כלכלית נוספת שרלוונטית לדוגמאות שנדונו עד כה היא תעסוקת עובדים מקומיים בהקמה ותחזוקה של המיקרוגריד. במקרה בו נדרש גיוס עובדים חיצוניים, עשוי גם מגזר השירותים להנות מגידול שיתרום ליצירת מקומות עבודה נוספים והגדלת התוצר המקומי באמצעות תופעה המכונה "מכפיל כלכלי" (MULTIPLIER EFFECT). מאידך, יש לקחת בחשבון את העלויות הקשורות בהכשרת העובדים האלה. הניתוחים הכלכליים המצביעים על כלכליות של פרישת מיקרוגריד אינם מציינים בברור אם עלויות והתועלות אלו נלקחו בחשבון, ועד כמה יש להתאים את מתודולוגיית הניתוח למדינות מתפתחות לאור העובדה שניתוחים אלו בוצעו בעיקר במדינות מפותחות⁵⁵. לפיכך, מוצע לבצע ניתוח כמותי שישקף את ה-MULTIPLIER EFFECT בהתבסס על המתודולוגיה מקובלת של IRENA⁵⁶, בה נלקחים בחשבון מקומות עבודה ישירים ועקיפים, בהתאמה לצורך לייבא עובדים מחוץ לאזור הנתון או להכשיר עובדים לתנאי השטח בישראל. בשל יתרון הגודל במיקרוגרידים, יש לבצע ניתוחים אלו בכמה תרחישים על בסיס סדרי גודל ומרכיבים משתנים (לדוגמה, תוספת אגירה, מתקנים סולאריים, ניהול ביקושים ועוד).

מכפילים כלכליים מצביעים על ההשפעת שיש להשקעה מקומית מסוימת על כלל המשק. למשל, מכפיל של 1.5 מציין כי השקעה של דולר אחד במיקרוגריד תתרום דולר וחצי נוספים לפעילות המשקית. מחקרים קודמים מצביעים על מכפילים

⁵² http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Captur_the_MultiplBenef_ofEnergyEfficiency.pdf

⁵³ <http://www.srpnet.com/prices/priceprocess/pdf/DGRateReview.pdf>

⁵⁴ יודגש שהעבודה הזאת כבר בוצעה בהערות הכלכליות של קידום אנרגיה סולארית בישראל, ראה <http://www.greenpeace.org/israel/Global/israel/file/2005/7/greenpeace-solar-report-for-is.doc>

⁵⁵ https://dusp.mit.edu/sites/dusp.mit.edu/files/attachments/project/EMS_Microgrid.pdf

⁵⁶ <http://www.irena.org/rejobs.pdf>

כלכליים הנעים בין 1-4, כאשר טווח שמרני ומקובל הוא 1.5-2.^{57, 58, 59} נתונים מקליפורניה מלמדים על גידול ממוצע בהיצע של כ-5.7 שנות עבודה לאדם (PERSON YEARS) על פני 10 שנים עבור כל מיליון דולר שהושקעו באנרגיה מתחדשת.⁶⁰ טבלה 4 להלן מציגה מכפילים הקשורים מתייחסים להקמת מתקני אנרגיה מתחדשת במיקרוגרید, בעיקר בטכנולוגיה פוטו-וולטאית (PV) ורוח. תועלת נוספת של הקמת מיקרוגרידים נובעת מכך שהמיקרוגריד הוא פרויקט בתחום התשתית, ולפיכך הוא מייצר מקומות עבודה בתחומי הבנייה, הנדסה אזרחית ותחזוקת תשתיות משולבות, שתורמים לפיתוח ההון האנושי. לאור זאת, ייתכן שהמכפילים המשמשים להערכת התועלת של תוספת מתקני אנרגיה מתחדשת על הכלכלה המקומית גבוהים בפועל מהמדדים המקובלים.

טבלה 4: תוצאות של אמידת מכפילים כלכליים קשורים למרכיבי מיקרוגריד

מקור	סך מקומות עבודה למגהוואט (ישירים + עקיפים)	טכנולוגיה
REPP	7.41	PV
גריןפיס	10.56	PV
REPP	0.71	רוח
גריןפיס	2.79	רוח
REPP	0.95	גז טבעי

עם זאת, המכפיל הנכון לבדיקת כדאיות המיקרוגריד תלוי באופן מהותי בתמהיל המשאבים במיקרוגריד. למשל, כל השקעה במגהוואט נוסף של ייצור חשמל בטכנולוגיה פוטו-וולטאית תורמת ליותר מפי שנים מספר מקומות עבודה מאשר השקעה במגהוואט נוסף בתחנה שמייצרת חשמל באמצעות שריפת גז טבעי.⁶¹ IRENA וגופים אחרים אומדים את המכפיל באמצעות מודלי "תשואה-תפוקה" מורכבים, בהם "עלות" הירידה הצפויה במקומות עבודה באזורים שכנים בעקבות מעבר עובדים מקומיים לאזור הנבחן לצורך פיתוח מיקרוגריד. מומלץ לבנות מודל מסוג זה שיותאם לחישוב מכפילים כלכליים בישראל, ולא להסתמך רק על נתונים מהעולם. מאחר והמכפילים נקובים ביחידות של מקומות עבודה למגהוואט מותקן נוסף בלבד, נשאלת השאלה מה הספק המיקרו-גרידים החזויים. כלומר, במידה שכדאיות המיקרוגריד היא שולית, אזי סך המיקרוגרידים עלול להיות נמוך והתועלת הכלכלית זניחה.

⁵⁷ http://www.bcit.ca/files/ir/pdf/economic_impact_report_2015.pdf

⁵⁸ <http://www.westhawaiiiforum.org/wp-content/uploads/2016/01/HECO-HELCO-Power-Supply-Improvement-Plan-Update.pdf>

⁵⁹ http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf

⁶⁰ Daniel Kammen, *Putting Renewables to Work; How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate?* http://rael.berkeley.edu/old_drupal/sites/default/files/very-old-site/renewables.jobs.2006.pdf

⁶¹ : <http://www.westhawaiiiforum.org/wp-content/uploads/2016/01/HECO-HELCO-Power-Supply-Improvement-Plan-Update.pdf>

גישה מוצעת לחישוב עלויות ותועלות המיקרוגריד

מבחן הכלכליות

דו"ח זה בוחן את התרומות הכלכליות של הטמעת מערכות מיקרוגריד ברמה המשקית. אין חולק כי חלק מהתרומות ניתן לייחס באופן פרטני למרכיבי המערכת, למשל הפחתת פליטות או הקטנת השקעות בתשתית כתוצאה מייצור מבוזר. אך ישנן גם תרומות פרטניות מעצם ניהול המערכת כמערכת מיקרוגריד, בין היתר כתוצאה מהגברת שימוש במערכות ייצור מבוזר או מניהול כולל של אמצעי הייצור והצריכה המביאים לאופטימיזציה כלכלית לצרכן תוך הגברת האמינות המשקית - החוסכים בהשקעות בתשתית ההולכה והחלוקה ותורמים ליעדי הממשלה בהשגת התייעלות אנרגטית. לכן יש לבחון את התועלות של מערכות מיקרוגריד באופן משולב עם הסדרות קיימות, באופן שימצא איזון נכון בין שמירת ההסדרות הקיימות ומחויבות ליזמות הפרטית בתחום, לבין התרומה הכוללת של מערכות מיקרוגריד. בכל מקרה, יש להימנע מפגיעה/שינוי של הסדרות קיימות כחלק מהתהליך.

הערכת העלויות והתועלות מצריכה הגדרת מיקרוגריד "אופייני" הכולל צד-היצע שבו תחנות מבוססות דלקים מחצביים ואנרגיה מתחדשת, צד-ביקוש הכולל ניהול ביקושים פעיל, ומתקני אגירה. יש לקחת בחשבון גם את ההסתברות לגודש במערכות ההולכה והחלוקה ועלות הגודש על המערכות האלה. למשל, מיקרוגריד שצרכניו יכולים להשתתף בתכניות לניהול ביקושים, שכולל סוללות אמינות וזולות, מתקני ייצור זולים ואמינים ושמוקם באזור עמוס עם עלות גודש גבוהה עשוי להיות כדאי כלכלית. במילים אחרות, בעוד שחישוב הכדאיות כולל את עלויות ההשקעה והדלקים הנדרשות (או הנמנעות), וחישוב ההכנסות ממכירת אנרגיה ושירותים נלווים, איסוף רשימת התשומות ומתן ערך לכל תשומה אינו טריוויאלי. לכן, יש לבנות מודלים גמישים למיקרוגריד שיכולים להתמודד עם תשומות משתנות כתוצאה משינויים במשק החשמל או החלטות רגולטוריות שמשליכות על השקעות בתשתיות ההולכה והחלוקה. מומלץ לכלול את ערך הגמישות של המיקרוגריד באמצעות חישוב ערך ה-REAL OPTION ("אופציונליות") של מיקרוגריד גמיש.

לבחירת המכפיל הכלכלי משמעות רבה יותר מכל גורם אחר על תוצאות ניתוח הכדאיות. זאת בשל השונות הרבה בגישות המתודולוגיות לאמידת המכפיל וגם בתוצאות החישובים. מחקרים קודמים בהם חושבו מכפילים כלכליים כאלו (בתחום האנרגיה המתחדשת בלבד) הצביעו על שונות רבה באמידת המכפילים אפילו בניתוחים שנוגעים לאותו פרויקט עצמו. שונות זו עשויה להיות גדולה אף יותר עבור מיקרוגרידים, כאשר מכלול המשאבים משתנה בין מיקרוגריד זה למיקרוגריד אחר. לכן, במידה שההשפעה הכלכלית נלקחה בחשבון, יש לתת נימוק לכל הנחה בתחשיב ולייצור טווחים וגמישות סביבה.

המצב הרגולטורי המקומי

פרק זה סוקר את הצעדים והתחומים הנדרשים על מנת לקדם את הרגולציה של מיקרוגריד בישראל, בראיה כוללת. היום, אין בישראל התייחסות רגולטורית למיקרוגריד כמערכת ניהול אנרגיה. יחד עם זאת, ובדומה לעולם, נעשו צעדים לא מעטים לקידום התחום דוגמת הסדרות לייצור מבוזר, אמצעים להתייעלות אנרגטית והסדרות לניהול מחסור, כפי שיפורט להלן.

מיקרוגריד בישראל: רגולציה קיימת ונדרשת

בישראל, בדומה למדינות אחרות בעולם, קיימת הסדרה התומכת במיקרוגריד. זאת, אף מבלי שקידום התחום הוגדר ונבחן בראיה כוללת. הסדרה זו כוללת:

ייצור מבוזר

בשנת 2002, קבעה ממשלת ישראל לראשונה יעד משמעותי לייצור מבוזר באנרגיה מתחדשת ולפיו 2% מהחשמל המסופק במשק עד לשנת 2007 ו-5% עד לשנת 2016 יהיה ממקורות מתחדשים. יעד זה הוגדל בשנת 2017 עת נקבע כי 13% מהחשמל המסופק במשק הישראלי עד לשנת 2025 ו-17% מהחשמל עד לשנת 2030 יהיו ממקורות מתחדשים. במישור האופרטיבי, תורגמת מדיניות זו להסדרות פרטניות של רשות החשמל, שכללו קידום ייצור מבוזר באנרגיות מתחדשות. נוכח המאפיינים הגאוגרפיים והאקלימיים בישראל, מיקוד הפעילות במישור זה הוא בטכנולוגיה הפוטו-וולטאית, ובמהלך השנים הוקמו אלפי מתקנים בהספקים של מאות מגוואטים של ייצור מבוזר המחוברים לרשת החלוקה.

הסדרות הרשות הניחו את הבסיס גם לשימוש בטכנולוגיות נוספות בהן רוח, ביו-גז ואנרגיה הידרו-אלקטרית, אף שפוטנציאל ההספק של מערכות אלו בישראל אינו עולה על עשרות מגהוואט בודדים. תחום נוסף המוסדר בימים אלה הוא מתקני ייצור חשמל בגו טבעי במקטע החלוקה. במהלך חודש דצמבר 2017 פורסמה הסדרה חדשה שמהותה קידום מתקנים אלה תוך דגש על מתקנים בעלי נצילות אנרגטית כוללת גבוהה, קרי שילוב אנרגיה חשמלית ותרמית.

ניהול הביקוש

בישראל קיימת הסדרה לניהול הביקוש הנובעת מהכרת הרגולטור בצורך לתת מענה לשעות שיא הביקוש. הסדרה זו כוללת מנגנונים כגון השלה יזומה, השלת תדר, הסדרת צרכנות חכמה וכדומה, שהם הסדרים צרכניים המאפשרים לצרכן לקבל תעריף/תשלום מתמרץ עבור הפחתת צריכתו ותרומתו לצמצום צריכת החשמל בשעות בהן המערכת נדרשת להתמודד עם שיאי ביקוש.

התייעלות אנרגטית

גם בתחום ההתייעלות האנרגטית קיימת הציבה ישראל יעדים מרחיקי לכת. על פי החלטת הממשלה, עד לשנת 2030 תצומצם צריכת החשמל בשיעור של לפחות 17% לעומת תרחיש עסקים כרגיל. בשנים האחרונות, הפעילו משרד האנרגיה והמשרד להגנת הסביבה מספר לא מבוטל של תכניות המעניקות תמיכות והקלות למתקנים ו/או פרויקטים של התייעלות אנרגטית. החלטת הממשלה האחרונה מיום 17.12.2017, (החלטה 3269), אימצה את "התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית 2016 - צמצום צריכת החשמל 2030" שהכין משרד האנרגיה, וקבעה יעדים אופרטיביים לביצוע (אשר חלקם אושר כבר בעבר) על ידי גופי השלטון השונים. בכלל זה, הקמת מנגנון למתן ערבויות מדינה לפרוייקטי התייעלות אנרגטית, הפעלת תוכנית מענקים להשקעות בהפחתת פליטות והתייעלות אנרגטית בהיקף של 300 מלש"ח, בנוסף, בוחנת הממשלה מנגנון של דירוג אנרגטי למבני מגורים ומשרדים חדשים.

מה עוד נדרש?

כפי שפורט לעיל, נראה כי נעשו לא מעט מהלכי הסדרה ביחס למרכיבים פרטניים אותם ניתן לראות כחלק ממהלך כולל לקידום מיקרוגרידים בישראל. עם זאת, יש צורך בצעדים משלמים כדי שתחום המיקרוגריד יקודם כתחום מהותי בישראל. להלן דוגמאות לצעדים משלמים נוספים הנדרשים בתחום:

- הגדרה וקביעת תחום המיקרוגריד כתחום לקידום - כפי שצויין לעיל, אין הגדרה מוסכמת למיקרוגריד, והוא מתואר כ"מערכת ניהול שמטרתה להביא לאופטימיזציה של שימוש באמצעי האנרגיה". כפועל יוצא, אין התייחסות כוללת לתחום לא כל שכן צעדים מעשיים. הגדרת התחום היא סוגיה מרכזית וחשובה בקביעת הרגולציה התומכת כך שתמריץ ותעודד את השגת היעד. להגדרת התחום והקביעה הממשלתית כי הוא מהווה יעד לקידום יש חשיבות רבה בקביעת הצעדים הרגולטוריים שיאפשרו את קידומו. שכן, בהעדר הגדרה כוללת, הרגולטור עשוי להסתפק בצעדים שיישם עד עתה כדי לקדם את הנושא. אך לא די בכך. על מנת לאפשר הקמת מערכות מיקרוגריד בישראל נדרשות הסדרות רגולטוריות שיאפשרו את מימוש התחום באופן ראוי. בנוסף על הצבת תחום המיקרוגריד כיעד מדיניות לקידום יש לבצע/לבחון את ההיבטים שיפורטו בנקודות הבאות.
- קביעת מכסה ייעודית - המציאות הרגולטורית היא כזו בה הסדרות שמטרתן קידום תחום חדש נדרשות להסדרה פרטנית הכוללת הסדרים להתנהלות במשק החשמל: אמות מידה, הסדרים תעריפיים (כפי שיפורט בהמשך) וקביעת מכסה ייעודית. הגדרת התחום וקביעת המכסה מהווים כר מוגדר וברור ליזמות/צרכנות המבקשת לממש פעילות בתחום המיקרוגריד. ללא קביעת מכסה יהיה קשה לקדם את התחום, לפחות בשלב הראשון, בהיעדר ודאות ליזמות/צרכנות של התחום ולגוף המממן.
- הסדרות למחקרי היתכנות - אין בישראל די ידע או ניסיון בנוגע לתרומה המערכתית של מיקרוגריד כאשר מנקודת מבטו של הרגולטור, יש לבחון תרומה זו כחלק מקביעת מדיניות כוללת במשק החשמל. לפיכך, ובהסתמך על מדיניות הרשות בכל האמור במתקני חלץ, יש לאפשר את קידום תחום המיקרוגריד ובמקביל לפתוח את השוק לכל החפץ בכך, באמצעות מחקרי היתכנות. מתן רישוי למחקרי היתכנות אינו צריך לבוא במניין מכסות והסדרות למימוש מיקרוגריד.
- הסדרת פעילות מתחמי מיקרוגריד במסגרת אמות המידה - אין היום בישראל הגדרה ברורה מי יכול ליישם מערכות מיקרוגריד ובאיזה אופן. כפועל יוצא, פעילות זו מתאפשרת רק ברמת הצרכן, ובמקרה הייחודי של "מחלקים היסטוריים". מעבר לשיקולים כלכליים, קידום התחום מותנה ביכולת לפעול באופן חוקי ויעיל במשק האנרגיה ולשם כך נדרשת, כמו בכל תחום פעילות, הסדרה המבוססת על ארבעה סוגי פעילות:
 1. רישיון/היתר הפעלה – יש להגדיר פורמלית את הזכות לפעילות יזמית במתחמי מיקרוגריד. אישור זה יכול להיות באמצעות מתן רישיון הספקה, צרכן מאגד או פורמט אחר, ובלבד שיוגדר מי יכול להקים ולהפעיל מערכות מיקרוגריד ובאילו תנאים.
 2. הגדרת מתחמים גאוגרפיים/רגולטוריים בהם ניתן להפעיל מערכות מיקרוגריד – לרוב מקושרת מערכת מיקרוגריד למתחם גאוגרפי פיזי (קיבוץ, מרכז קניות, אזור תעשייה, שכונת מגורים). יחד עם זאת, ניתן לקיים פעילות מיקרוגריד על היבטיה השונים גם בקרב צרכן עם נקודות צריכה שונות שאינן בהכרח רציפות גיאוגרפית, תוך שימוש בתשתית של מחלק. על הרגולציה להגדיר מתחמים אלה בראיה של קידום התחום, ולקבוע את הגבולות המקסימליים המאפשרים יישום מערכות מיקרוגריד מבלי להגבילם לאזורים גאוגרפיים בלבד.
 3. התממשקות עם מנהל המערכת ורשת החשמל – סוגיה מרכזית בקידום מיקרוגריד באופטימיזציה מלאה היא הממשק וככלי ההתנהלות מול רשת החשמל ומנהל המערכת, בכלל זה מכלול ההיבטים הטכניים. כאמור, למיקרוגריד יש פוטנציאל לתרומה כלכלית משמעותית בהיבט של שירותים נלווים. בנוסף, ניהול

אופטימלי של אמצעי הייצור יכול וצריך לאפשר סחר בשירותים ואנרגיה בין מערכת המיקרוגריד למנהל המערכת או במסגרת עסקאות בילטרליות עם שחקנים אחרים במשק החשמל (יצרנים פרטיים, צרכנים).

4. שימוש בתשתית ספק השירותים החיוניים (סש"ח) – השימוש בתשתית ההולכה והחלוקה של סש"ח כאמצעי לקידום מיקרוגריד ובכלל זה מיקרוגריד מבוזר תאפשר את הרחבת השימוש במיקרוגריד. אין בקביעה זו להידרש להיבטים הכלכליים של שימוש בתשתית מול התרומה או התמריץ למיקרוגריד, אלא ציון הצורך בהסדרת השימוש בתשתיות סש"ח על מנת לקדם את פעילות המיקרוגריד.

- אגירה - כמו שצויין לעיל, אגירה היא סוגיה מהותית ברמה המשקית בכלל ובתחום המיקרוגריד בפרט. פעילות המיקרוגריד אינה מותנית אמנם בקיומה של אגירה, אולם יצירת מתחמי ייצור וצרכנות עצמאיים, בשילוב עם האפשרות לסחר באנרגיה על בסיס כלכלי, תקודם באופן משמעותי עם קידום תחום האגירה. היום, אין בישראל הסדרה פרטנית (לא כל שכן מתמרצת) לאגירה, ובמקביל לקידום תחום המיקרוגריד יש לבדוק גם את קידום והסדרת תחום האגירה.

נספח 7 לדו"ח זה כולל פירוט נוסף והמלצות לגבי השינויים הנדרשים במגנוני הרגולציה כדי להאיץ פיתוח המיקרוגריד בישראל.

סקר מיקרוגרידים בעולם

מצב רגולטורי ותחרותי

התקדמות תחום המיקרוגריד בעולם נובעת משתי התפתחויות מנוגדות לכאורה: מודל חברת החשמל המאוגדת אנכית, שהפך למיושן ופגיע בפני אסונות טבע, השבתות, ותחרות מצד מקורות ייצור מבוזרים; ומצד שני, הצורך הגובר באספקת חשמל אמין שישפר את חיי האזרחים במדינות מתפתחות. שתי ההתפתחויות אלו מצביעות לכיוון פיתרון דומה של ייצור מבוזר וגמיש, אשר יכול לחסוך השקעות כבדות בפיתוח תשתיות הנהנות לכאורה מיתרון לגודל אך פחות גמישות. במדינות בעלות מערכת אספקת חשמל מרכזית מבוססת, רצוי כי קובעי המדיניות, חברות החשמל, והאזרחים ישקלו האם המודל הקונבנציונלי של זרם חשמל חד-כיווני מהיצרן לצרכן הוא אכן הגישה האופטימאלית כדי לספק חשמל אמין ויציב. מודל המונופול בו חברת החשמל מחזיקה בתשתית ייצור לצד תשתית מסירה כבר התגלה כפגיע בפני אסונות טבע והשבתות. מאידך, מדינות מתפתחות חסרות חשמל אמין ויציב, שאינו קיים בהן. מיקרוגריד הוא פיתרון משולב, אשר יכול לשמש הן במדינות עם מערכות חשמל מפותחות ומבוססות והן במדינות מתפתחות.

ארוע מכונן בשיח בארה"ב אודות מיקרוגריד הוא השבתת שרשרת שהביאה לעלטה בצפון-מזרח ארה"ב בשנת 2003, כאשר השאלה הנשאלת היא מה יכולתו של המיקרוגריד למנוע או למתן את השפעת השבתות מסוג זה. השבתת זו נבעה מבעיה זניחה יחסית, באתר קטן במערכת שהיה קשור למערכת של ניהול ותמיכה בקבלת החלטות (DECISION SUPPORT SYSTEMS). ואולם, השבתות שרשרת אובחנו כתופעה מובנית במערכת שכזו המצויה בקצה יכולתה התפעולית:

א. שינויים המבניים במקטע הייצור (דוגמת הרפורמה במשק החשמל בישראל) כאשר מערכת ההולכה סובלת מתת-השקעה בשל אי-וודאות רגולטורית בתקופת הטמעת הרפורמות: ההשקעות ברשתות המסירה בארה"ב לא גדלו באותו הקצב של משאבי הייצור, כאשר כ-70% מתשתיות הולכה וההשנאה נבנתו לפני שנת 1990 וגילן הממוצע של תחנות כוח עולה על 30 שנה.⁶²

ב. מחסור באגירה כדי לאזן בין היצע לביקוש בארועים קצרי-טווח. העלטות בשנת 2003 השפיעו על כ-50 מיליון תושבים (כ-62 גיגה-וואט) בצפון-מזרח ארה"ב וקנדה, כשישית מאוכלוסיית המדינה. הנוק הכלכלי נאמד בכ-10 מיליארד דולר. מכאן, שהמיקרוגריד נחשב כסוג של פיתרון "ריפוי עצמי" וכשלב בדרך לרשת חכמה עתידית.

מחקר אחר, בחן לעומק את מדיניות הרגולציה בנושא מיקרוגריד בארה"ב, אירופה וסין. ממצאי המחקר מלמדים כי התמיכה בקידום מיקרוגריד באה לידי ביטוי בעיקר בקידום מרכיביו (ייצור מבוזר, אמצעי התייעלות אנרגטית, ניהול ביקושים ואמצעי אגירה) אך ולא כתחום הדורש/מכלול המצריך התייחסות כוללת. לפיכך, קשה למצוא דוגמאות למדיניות/רגולציה קוהרנטית ומקיפה ליישום של מערכות מיקרוגריד.⁶³ כאמירה כללית, הידע שנצבר מפעילות הרגולטורים בתחום המיקרוגריד בעולם מבוסס על ראיית המיקרוגריד כמכלול של פעילויות פרטניות ולא כמערכת הוליסטית הגדולה מסך רכיביה.

⁶² (Campbell, 2012; President's Council of Economic Advisers & U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2013).

⁶³ (Overview of current Microgrid, Policies, Incentives and Barriers in the European Union, United States and China)

אין ספק כי האתגר הרגולטורי העיקרי להטמעת מיקרורגידים בעולם הוא פוליטי: הדומיננטיות של חברות החשמל הקיימות. אתגר זה משמעותי אף יותר מהאתגר הטכנולוגי. גם במדינות שעברו רפורמות מבניות במשקי החשמל שלהן, לחברות החשמל נותר עדיין כוח פוליטי והשפעה על הרגולטורים, ועל האופי והתוכן של הרגולציה ועל כללי המשחק במשק. מעצם הגדרתו, מצמצם המיקרורגיד את יכולתן של חברות החשמל לראות ולשלוט על כלל תשתיות הייצור והמסירה במשק, ומצמצם גם את ה"שבי הרגולטורי" (REGULATORY CAPTURE), קרי השפעתן של החברות על מערכת קבלת ההחלטות של הרגולטורים. בשימועים אותם עורכות רשויות רגולציה ניתן לראות את המאמצים של חברות החשמל לשלוט על מתודולוגיות של חישוב כדאיות כלכלית, בעלות על תשתית, ותנאים להשתתפות גורמים תחרותיים. חלק מהחברות היו רוצות לפתח את המיקרורגיד בעצמם, אך לא בהכרח להביא למיצוי של מלוא תועלותיו.

עיקר ההספק המותקן והמתוכנן של מיקרורגיד נחלק נכון להיום באופן שווה בין ארה"ב (42%) ואסיה (42%), כאשר חלקה של אירופה עומד על 11%, אמריקה-לטינית כ-4%, ואילו במזרח התיכון ובאפריקה כ-1% בלבד. סך ההספק העולמי המותקן של מיקרורגיד עמד בשנת 2015 על כ-1400 מגהוואט, ועל פי תחזיות חברת חקר השוק נביגנט, הוא צפוי לגדול לכ-5700 מגהוואט (הערכה שמרנית) או 8700 מגהוואט (הערכה מרחיבה) עד לשנת 2024. יודגש כי מיקרורגידים מרוחקים (REMOTE) תופסים כ-54% מסך ההספק העולמי המותקן, כאשר חלקם היחסי של מיקרורגידים קהילתיים בבעלות ושליטה של חברות חלוקה הוא כ-26%. מיקרורגידים במוסדות ובקמפוסים (15%) וכאלו בבעלות גורמים מסחריים/תעשייתיים (5%) אינם בקו היישום הראשון. זאת ככל הנראה בגין כדאיות כלכלית מובהקת יותר אצל המיישמים הראשונים, שאינה קיימת באותה המידה ללא מנגנוני עידוד ותמיכה כספית.

כניסת מתחרים לחברות החשמל ושינויים רגולטורים נדרשים

על אף הלחצים של חברות החשמל, יש בשוק מספר מתחרים הפועלים כספקי מרכיבים למיקרורגיד, דוגמת ספקי טכנולוגיות מידע, ספקי מתקני אגירה ואנרגיה סולארית, וחברות הנדסה. לכל אחד מגורמים אלו יש יתרון יחסי שאינו קיים בחברות החשמל. מאידך, לחברות החשמל אין כל יתרון מובנה ביצירת שיתופי פעולה בין גורמים בהקמת מיקרורגידים. לפיכך, מכוונים רגולטורים בעולם לייעל את קידום המיקרורגיד באמצעות מערכות תעריפים ואמות מידה לכניסת כל גורם (או אגרזייה של גורמים) שיכול לתרום לקידום התחום, ללא עדיפות לגורם או לטכנולוגיה ספציפיים. היכן שקיימים כשלי שוק שמצריכים מעורבות ממשלתית צפוי הרגולטור לקבוע אמות מידה ותעריפים בהתאם.

הגורמים המסחריים הפעילים ביותר בתחום המיקרורגיד הם הספקים המסורתיים לחברות החשמל (דוגמת תאגידי הענק סימנס, היטצ'י, ABB, וכדומה) הפועלים בהתאם למודל עסקי המבוסס על חברות חשמל. בשוק פועלות גם חברות סטארט-אפ עם מודלים וטכנולוגיות גמישים יותר, הפועלות לפי מודל עסקי שונה. לכן, על הרגולטור להבחין בין סוגי ספקים, ולא לקבוע כללים שיחסמו כניסה יעילה למשק.

חלק מתהליך הביזור נובע מאתגרים מובנים בהקמת תשתיות הולכה נוספות ועלויות הון גבוהות בהוספת משאבי ייצור מרכזיים. חברות החשמל בודקות אופציות להוספת קיבולת (הספק מותקן) בנקודות אסטרטגיות ברשת החלוקה. זאת, באמצעות שילוב בין התייעלות אנרגיות, ניהול ביקושים, ומשאבי אנרגיה מבוזרים. שיקול נוסף הוא פגיעות המערכת הקיימת לאסונות טבע, התקפות סייבר והשבתות שרשרת. לאור ההכרה בחשיבותו של חשמל איכותי לכלכלה ולשירותים חיוניים, מדינות מוכנות להשקיע במערכות מבוזרות – כולל מיקרורגידים – שנחשבות כיציבות יותר. במקביל, ביזור משאבים חייב לעמוד בדרישות להפחית פליטת גזי חממה, כאשר פתרונות רבים ניתנים ליישום בצורה מבוזרת.

כאמור, מקרים בולטים של הפרעות ברשת החשמל הגבירו את העניין במיקרורגידים, אשר בכמה ממצבים אלו הפגינו יכולת לספק חשמל בעוד שיתר הצרכנים המחוברים לרשת הארצית נותרו מנותקים. בין הדוגמאות הבולטות ניתן למנות את העלטה בצפון-מזרח ארה"ב (2003), רעידת האדמה ביפן (2011), הוריקן איירין (2011) והוריקן סנדי (2012). בארוע של הוריקן סנדי למשל, סיפקו המיקרורגידים המותקנים באוניברסיטאות פרינסטון וניו-יורק ובמשרד ה-FDA חשמל

במשך כמה ימים, בעוד שאתרים סביבם נותרו בעלטה. הנזק הכלכלי של הפסקות חשמל הקשורות למזג אוויר חריג בארה"ב הוערכה בכ-18-33 מיליון דולר לשנה, אך קיים חשש כי שינויי האקלים יגדילו את מספר העלטות ואת הנזק הכלכלי שהן גורמות. בעקבות ההוריקנים איירין וסנדי, ביצעה העיר ניו-יורק הערכה כלכלית של כדאיות חיבור מתקנים חיוניים במיקרוגריד, כתחליף לגנרטורים המשמשים לגיבוי. רשויות מקומיות בארה"ב מראות נכונות לחלוק בבעלות על מיקרוגרידים עם גורמים פרטיים, על מנת שיוכלו לתת מענה במצבים חריגים, אך לשם כך נדרשים תיקוני חקיקה ורגולציה⁶⁴.

⁶⁴ (New York State Energy Research and Development Authority, New York State Department of Public Service, & New York State Division of Homeland Security and Emergency Services, 2014).

דוגמאות מעשיות

דוגמאות - רגולציה

מחקר זה מיועד למקבלי החלטות בישראל, ולפיכך הוא מתמקד בדוגמאות ממדינות מפותחות (צפון-אמריקה ואירופה). ואמנם, סוגיות הרגולציה עמן מתמודדות כמה מדינות בארה"ב המובילות בקידום מיקרוגרידים (ניו-יורק, מסצ'וסטס) כוללות מספר נושאים המשותפים לרשתות חשמל במדינות מפותחות. בכלל זה השאלות הבאות:

- האם יש לראות במיקרוגריד חברת חלוקה הכפופה לרגולטורים בדומה לחברות החשמל (כספקי שירותים חיוניים)?
- אם אין המיקרוגריד מוגדר כחברת חשמל, ופטור מהמשטר הרגולטורי הנלווה לספק שירות חיוני, האם חלה עליו המסגרת המשפטית בנוגע למכירה/רכישה של חשמל וכן הזכות לייצר ולחלק חשמל? המיקרוגריד זקוק לוודאות רגולטורית ומשפטית כדי לשכנע משקיעים פוטנציאליים כי הוא BANKABLE. סוגיות הרגולציה ומערך של חוקים פדראליים ומדיניים בארה"ב דוגמת הסדרת הזכות לעשות שימוש בנכסים שונים, הגנת הסביבה, זכויות הלקוח והגנת זכויות צרכנים, והוראות אדמיניסטרטיביות דוגמת אישור לחיוניות ונחות ציבורית (CPCN) הנדרש כדי לקבל אישור מהרגולטור (NYSPSC) – כל אלו מקשים על גיוס מימון. במיקרוגריד מתקיים שילוב מיוחד בין ייצור, הולכה, וחלוקה שאינו אופייני לשקחנים הקיימים במשק החשמל. חוסר ההגדרה ("מהו מיקרוגריד") מעלה שאלות שונות בנוגע לסוגי החוקים והתקנות החלים עליו.
- מערכת החשמל במדינת ניו-יורק נחשבת אמנם לאחת מהמורכבות בארה"ב בהבטי תכנון וניהול, אך הצורך להתייחס לסוגיות אלו רלוונטי גם במדינה אחרות בארה"ב. לפיכך, הרגולטור הפדראלי (FERC) פועל כדי ליצור אחידות בהגדרות וברגולציה - אף שסטטוטורית, הסמכויות שלו חלות רק על עסקאות סיטונאיות למכירת חשמל שחוצות גבולות של מדינות בארה"ב. מכאן, שאי הוודאות הרגולטורית עלולה להמשיך ולעכב את פיתוח תחום המיקרוגריד, וזאת עד שהמדינות עצמן תסכמנה לכללי משק אחידים לגביהם.
- הגם שתחום המיקרוגריד לא מקודם כתחום כולל, הוא זוכה לתמיכה רחבה בקידום של מרכיביו דרך רגולציה פרטנית במספר מדינות בצפון אמריקה.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION הפעילה תוכנית מענקים בסכומים של 5-7 מיליון דולר ואף יותר, להוכחת הכדאיות העסקית של מיקרוגרידים כאמצעי לעמידה ביעדי הפחתת פליטת גזי החממה של מדינה זו⁶⁵.
- גורמי הרגולציה במיין שבארה"ב ובפרובנס שבקנדה מקדמים פרויקט משותף בשווי של כ-12.4 מיליון דולר, שמטרתו להדגים את התרומה של מיקרוגריד לחיסכון כספי ולהטמעת אנרגיות מתחדשות וזאת באמצעות שימוש בתוכנות מתקדמות. התוכנית מיועדת לגופים כגון אוניברסיטאות וחברות טכנולוגיות⁶⁶.
- המדינות קונקטיקט, מרילנד, מסצ'וסטס, ניו-ג'רסי וניו-יורק סובלות מתשתית מיושנת לצד ארועי מזג אוויר קשים. מדינות אלו בוחנות את הכדאיות של הקמת מיקרוגריד אף מעבר לצורך בתפעול מתקנים ותשתיות קריטיים בעת אסון טבע. בין היתר נבחנים מיקרוגרידים "קהילתיים" שמספקים חשמל למספר שכונות עד רמת התחמ"ש וכולל כמה עשרות מגהוואט.

⁶⁵(<http://www.energy.ca.gov/contracts/epic.html#GFO-17-302>)

⁶⁶ <https://microgridknowledge.com/multi-utility-microgrid/>

- דוגמה בולטת למיקרוגריד קהילתי הוא ה-NEW YORK PRIZE - תחרות המתקצבת בכ- 40 מיליון דולר ומנוהלת על-ידי ה-NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT AUTHORITY (NYSERDA) המסייע לתהליך בדיקת ההתכנות משלב בדיקת הכדאיות הכלכלית ועד ליישום. מטרתה העיקרית של NYPRIZE היא להאיץ את פיתוח המיקרוגריד בשטח, תוך הגדלת המודעות והזדמנויות לשיתופי פעולה והגדלת החוסן והשרידות של משק החשמל בכללותו. ללא תמיכה זאת, המיקרוגריד עלול להישאר מוצר "נישה" למוסדות גדולים - ללא תועלות ישירות לצרכנים האחרים ברשת.
 - מדינת ניו-יורק תקצבה סכום של כ-11 מיליון דולר לתמיכה בפרויקטי מיקרוגריד, אשר גופי מימון קונבנציונאלי לא היו מוכנים לממן. וזאת, בראיה של חזון חדש שהיא מובילה למשק האנרגיה.
 - העיר ניו-יורק, אשר מסיבות פיזיות, מוגבלת בתשתיות ההולכה והחלוקה המוליכות לתוכה חשמל, מוגדרת כ-LOAD POCKET. על מנת להתמודד עם אתגר LOAD POCKET, נבחנו בין היתר פתרונות המבוססים על מערכות מבוזרות ביחס למודל הפיתוח המוכר ("עסקים כרגיל"). פרויקט כזה בוצע לדוגמה על ידי חברת החשמל הפועלת בעיר (CONSOLIDATED EDISON), שהובילה הקמת מיקרוגריד במטרה לדחות הקמת תחנת משנה בסך של מיליארד דולר בברוקלין ובקווינס⁶⁷. עלות הקמת מערכות חלוקה חדשות נעה בין 25,000 ל-65,000 דולר לק"מ, ועלות זו לבדה עשויה להעיד על כדאית כלכלית גבוהה של מיקרוגריד.
 - בניו-יורק, מיקרוגריד שמוקם כדי לשרת כמה צרכנים שאינם קשורים זה לזה, חוצה דרך ציבורית בקווי מסירה ו/או מקבל זיכיון מרשות מקומית עלול להיחשב (רגולטורית) כחברת חשמל. הרגולטור במדינת ניו-יורק NYSPPSC הוא שאוכף את הרגולציה והחוקים האלה, כולל ה-PUBLIC SERVICE LAW. אם מיקרוגריד מוגדר כחברת חלוקה בהתאם ל-PSL, אזי הוא נדרש לעמוד בפני אותן הדרישות החלות על חברות חשמל מפקחות (לדוגמה, כספק שירותים חיוניים), כולל החובה לשרת כל צרכן (OBLIGATION TO SERVE).
 - ממשלת ארה"ב מתערבת בקידום המיקרוגריד - במישרין (בצורת מענקים) ובעקיפין (בתמיכה בטכנולוגיות שניתנות ליישום במיקרוגריד). משרד האנרגיה בארה"ב (USDOE) קבע יעדים ספציפיים לקידום מערכות מיקרוגריד מסחריות בהספק של עד 10 מגהוואט, אשר על פי הערכה יכולות לצמצם את הפסקות החשמל בכ-98% ובעלות דומה לפיתרונות בייס-ליין קיימים (מערכת UPS למניעת העלטות + דיזל גנרטור). זאת, תוך צמצום פליטות המזהמים ביותר מ-20% ושיפור היעילות האנרגטית בכ-20%.
- נספח 8 לדו"ח זה כולל פירוט נוסף על דוגמאות רגולטוריות והצלחתן בהשגת יעדי המדינה.

דוגמאות - תקנים לחיבור, תעריפים תומכים ומנגנון רגולציה תומך

עם השלמת שורה של תהליכי רפורמות ודה-רגולציה במשקי החשמל במדינות ארה"ב בשנות התשעים, אין בנמצא תקנים לאומיים לחיבור יצרנים לרשת. תקן IEEE 1547 שיצא בשנת 2003 היה צעד חשוב בהטעמת משאבי אנרגיה מבוזרים עם הספק מותקן של עד 10 מגהוואט, מפני שקבע כללים אחידים שהחליפו את התקנים הנפרדים שהיו קיימים (אשר הוסיפו עלויות מהותיות לכל פרויקט). תקן IEEE 1547.4 שיצא בשנת 2011, הוסיף הנחיות לתכנון, תפעול והטמעת DER כך שיוכל לפעול כאי-חשמלי ובחיבור לרשת. בהתבסס על IEEE 1547.4, ובעקבות אישורו, קבעו מדינות כמו קליפורניה וניו-יורק תקנים לחיבורים לרשת בהתאם לתקן הזה, עם התאמות מקומיות בנוגע למשאבי אנרגיה מבוזרים.

⁶⁷ Tweed, 2014.

תוצר לוואי שני לתהליכי הדה-רגולציה הוא הצורך להתמודד עם משאבי ייצור שהם חיוניים למשק החשמל (כולל אנרגיה מתחדשת) אך אינם בשלים להיכנס לשוק תחרותי. באירופה ובארה"ב, משאבים אלו מקודמים באמצעות תעריפי הזנה (FEED IN), מונה נטו (NET METERING), ותעודות אנרגיה מתחדשות סחירות (REC). במדינות בהן קיימים תעריפי הזנה, המיקרוגריד יכול למכור חשמל לרשת בשעות השיא או כאשר יש לו הספק עודף, בהתאם להסכמים מול חברת החשמל בכובעה כחברת ניהול הרשת. לפיכך, מדיניות רגולטורית לגבי תשלומים ל-REC הכוללת תעריפי הזנה, מנייה נטו, ו-REC היא מרכיב חיוני כדי לתמרץ הקמת מיקרוגרידים וטכנולוגיות נלוות.

החלטות רגולטוריות לגבי ניהול ביקוש

מבחינת רשתות החשמל בעולם, אין הבדל עקרוני במודל הפעילות בין הערך המתקבל כתוצאה מהפחתת ביקושים במגהוואט נוסף לבין הערך המתקבל מייצור מגהוואט נוסף. החלטה ORDER 745 של FERC (בארה"ב) נועדה להתמודד עם גישה זו בפיוצי על משאבי ניהול ביקושים (כלומר מצב בו משאבי צד-היצע שווים למשאבי צד-ביקוש). ORDER 745 הוא צעד חשוב לקידום מיקרוגרידים בארה"ב, מכיוון שאלו בנויים לשלב ביקושים גמישים שיכולים לרדת בהתראה מסוימת (שניות עד שעות). משאבי צד-ביקוש המחוברים למיקרוגריד עשויים להרוויח אם המיקרוגריד משתף בשוק חשמל סיטונאי. ניהול ביקושים חשוב גם בשוק הקמעונאי, ויש לבדוק את ההתאמה בין תעריפים מפותחים שנועדו לנהל את הביקוש לקידום מיקרוגרידים. לאור זאת, רגולטורים בעולם מנסים לקבוע תעריפי תעו"ז המשקפים את כלל העלויות הסיטונאיות (אנרגיה, גודש, איבודים, וכדומה) במערכת, כאשר במצב אידיאלי, התיאום בין התעריף הסיטונאי והמחיר הקמעונאי אמור להיות מוחלט בכל אינטרוול באופן המעלה את הערך של המיקרוגריד.

דוגמאות - יישומי מיקרוגרידים

בשונה מארה"ב המניע המרכזי באירופה לקידום מיקרוגריד הוא ההתמודדות עם שינוי האקלים. עם זאת, היעדים הנקודתיים ביישום המיקרוגריד דומים. בארה"ב, התייחסות לסוגיה של אנרגיה מבוזרת התחילה בשנת 1999 בהקמת CONSORTIUM FOR ENERGY RELIABILITY TECHNOLOGY SERVICES (להלן, "CERTS"). בין הפעולות של ה-CERTS יש גם מיקרוגריד המורכב ממספר רב של משאבי אנרגיה מבוזרים (DER), המהווה צרכן או יצרן קטן מבחינת מנהל הרשת. CERTS התמקדה בסוגיית הניתוק והחיבור האוטומטי לרשת. מטרות CERTS כוללות:

1. מניעת הישענות על מערכות בקרה מרכזיות וקידום מערכות PEER TO PEER;
2. יצירת מערכות גמישות מסוג PLUG AND PLAY כדי להוריד את העלויות הקבועות הראשוניות ולמקם מתקני ייצור קרובים לנקודות צרכנות.

להלן מספר דוגמאות ליישומי מיקרוגריד:

- מחקר ופיתוח במעבדות- מעבדות למחקר ופיתוח הן מרכיב חיוני בקידום מיקרוגרידים בארה"ב ובאירופה, וחלק בלתי נפרד ממיזם ה-CERTS. אחד מהיתרונות של המעבדות האלה הוא היכולת לדמות את מרכיבי המיקרוגריד בשלבים טרום-מסחריים. דוגמה למעבדה מובילה היא ה-ENERGY SYSTEM INTEGRATION FACILITY במעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת (NREL). ה-ESIF כולל סימולטור לרשת לבדיקת ציוד ומכשירי מיקרוגריד בעומסים קודם הפעלתם בשטח. חברות החשמל עורכות אף הן סימולציות מעבדה למיקרוגרידים. חברת דוק אנרג'י לדוגמה, בודקת שיתופי פעולה בין יצרנים ושילובי של ניהול ביקושים, מתקנים פוטו-וולטאיים, ואגירה בתחנות מכבי אש.
- יישומים צבאיים - מאז 2011, משרד ההגנה של ארה"ב עורך ניתוחים של כדאיות כלכלית ל-4 סוגי מיקרוגריד ב-3 אתרים המתאפיינים בתנאי אקלים שונים. בדיקת הכדאיות כוללת את בדיקת ההשפעה של אספקת

שירותים שונים לרשת על התשואה להון של המיקרוגריד. שירותים אלה כוללים בין היתר, השתתפות בתכניות ניהול הביקושים של חברות החשמל, אספקת רזרבות סובבות, והפחתת גודש. התוצאות מראות כי מיקרוגרידים המשלבים מתקני PV יכולים לפעול במצב של אי-חשמלי לזמן ממושך יותר ממיקרוגרידים המבוססים על סולר בלבד. הניסיון הצבאי מצביע גם על כך ששילוב בין PV לבין אגירה אינו כדאי כלכלית, בעיקר בגלל העלות הנוכחית של אגירה. אולם לאור הירידה המתמשכת במחירי האגירה יש לבחון מחדש הנחה זו. מיקרוגרידים צבאיים בהספק המותקן של 35 מגהוואט פעועלים היום רק בצפון-אמריקה (מערכות מחוברות לרשת ומערכות טקטיות מרוחקות)⁶⁸. פרויקטים נוספי בשלבי מחקר ופיתוח בוחנים את ניצול תכונות המיקרוגריד (גיוון בדלקים, יתירות) שתורמים לתפעולו היעיל - לאתר הצבאי כולו⁶⁹.

התפקיד העיקרי של מיקרוגרידים בשימוש צבאי הוא "בטיחות אנרגטית" המוגדרת כ"יכולת המתקן לקבל אספקה אמינה של חשמל ודלקים והאמצעים להשתמש בהם כדי להגן ולמסור אנרגיה מספקת לפעילויות קריטיות במשך השבתה מתמשכת של רשת החשמל האזורי"⁷⁰. יכולת זו כוללת הקמת רשתות למשאבי אנרגיה שמאפשרת יתירות וגיוון דלקים, והגדלת הנצילות של תחנות המחוברות לרשת. דוגמה למיקרוגריד צבאי בשלב המו"פ הוא ה-SPIDERS JCTD שמטרתו "להבטיח תפעול בטוח ואמין בייצור וחלוקת חשמל"⁷¹.

- יישומים מסחריים ותעשייתיים – עד כה נרשם יישום מיקרוגריד במקטע המסחרי/תעשייתי בהיקף מצומצם, עם הספק מותקן של כ-71 מגהוואט בצפון-אמריקה וכ-47 מגהוואט באסיה. מרכזי נתונים (DATA CENTRES) נחשבים כיישום מבטיח של מיקרוגרידים⁷², כאשר אנרגיות מתחדשות תקוזה את ההוצאות הגבוהות על תפעול גנרטורים מבוססי סולר.

- יישומים ביתיים - דיון מרכזי בשימועים שעורכים רגולטורים ומקבלי החלטות בחברות ניהול המערכת בצפון-אמריקה לנושא המיקרוגריד הוא היקף האיגוד (אגרגציה) של מיקרוגרידים. למשל, האם עדיף ליצור מיקרוגריד קהילתי מאגרגציה של כמה בתים נפרדים, או להטמיע טכנולוגיות מיקרוגריד בבתי עצמם? לשילוב מיקרוגריד בבניין עצמו יתרונות רבים דוגמת שליטה מלאה על-ידי הצרכן והעובדה שהבתים כבר מחוברים לרשת החלוקה הקיימת, כך שאפשר להימנע מסיבוכים משפטיים ורגולטוריים מעבר לאלה הקשורים להתקנת PV על גגות. לעומת זאת, שיטה זו מוותרת על החיסכון המתקבל כתוצאה מיתרון הגודל, ותועלות הנובעות מביזור ייצור ועומסים. שיטה זו מחייבת גם הסדרי מימון מיוחדים מכיוון שהיא מצריכה מכשירי בקרה, שילוב מערכות וייצור אנרגיה שאינם שכיחים במיקרוגריד ביתי. מחקרים שונים מנתחים את הכדאיות הכלכלית של מיקרוגריד ביתי⁷³, ובפרט את אופציית הניתוק המוחלט מהרשת באמצעות PV ואגירה בסוללות. בארה"ב פועלות היום חברות מסחריות עם מודלי מימון חדישים המציעות מיקרוגרידים ביתיים כחלק מחבילה השירותים שלהן.

⁶⁸ . (Asmus & Lawrence, 2016b)

⁶⁹ S. Van Broekhoven, Judson, Galvin, & Marqusee, (2013).

⁷⁰ Van Broekhoven, S. B., Judson, N., Nguyen, S. V., & Ross, W. D. (2012). *Microgrid study: energy security for DoD installations*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA5657>

⁷¹ Naval Facilities Engineering Command. (2015). *Technology Transition Final Public Report: Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security (SPIDERS)* (p. 41). U.S. Department of Defense.

⁷² Asmus, P., & Lawrence, M. (2016b, Q1). Market Data: Microgrids.

⁷³ Khalilpour & Vassallo, 2015; Suryanarayanan, Rietz, & Mitra, 2010(

- יישומים במוסדות ובקמפוסים - המיקרוגרידים הגדולים ביותר הפעילים היום (4 עד 40 מגהוואט) נמצאים בקמפוסים (דוגמת אוניברסיטאות קורנל, ניו-יורק, ופרינסטון) ובמוסדות חינוך, בהספק כולל של 220 מגהוואט. אלו כוללים שילוב בין חימום, קירור וחשמל ("טרי-גנרציה")⁷⁴. אוניברסיטאות היו בין המאמצים הראשונים של DER בכלל (כדי לחסוך בהוצאות החשמל). בשנים האחרונות, המשיכו גופים אלו להיות בין המאמצים הראשונים של טכנולוגיות מיקרוגריד בשל הצורך בבטחון באספקת אנרגיה ושילוב אנרגיה מתחדשת. דוגמה בולטת ליישום מוסדי של מיקרוגריד הוא בית הסוהר סנטה-ריטה שבקליפורניה, הכולל תא-דלק בהספק של 1 מגהוואט, מתקן PV של 1.2 מגהוואט, שני דיזל גנרטורים של 2.4 מגהוואט, וסוללה של 2 מגהוואט לאגירה. לפני הקמת המיקרוגריד עשה בית הסוהר שימוש בדיזל גנרטורים בהפסקות חשמל, אבל בשיהוי של 10 שניות, שאינו מקובל בבית סוהר. מיקרוגרידים קהילתיים (COMMUNITIES) ושל חברות חשמל – משלבים אנרגיה ירוקה שמפחיתה פליטות של גזי חממה יחד עם חיזוק החוסן ובטחון האספקה. השימושים העיקריים הם אספקת חשמל אמין ורציף עבור מוסדות ציבור וטיפול במים ובשפכים. בהקשר זה, אין הבדל מהותי בין מיקרוגרידים של חברות חשמל לבין מיקרוגרידים של קהילות, למעט העובדה שחברת החשמל כבר "יודעת" למכור חשמל מבחינת זכיונות, קבלת רישיונות וזכויות בנייה. למיקרוגריד הקהילתי יש עם זאת יתרון משום שהוא יכול לספק פתרון (למשל, איכות חשמל מוגברת) לכלל השירותים המוגדרים כחלק מהמיקרוגריד הקהילתי - במקום המיקרוגריד של חברות חשמל אנכיות. דוגמאות של מיקרוגרידים כאלו (של חברות חשמל) נמצאות בניו-ג'רסי, ניו-אינגלנד, במדינות בדרום ארה"ב ובקליפורניה.

דוגמאות – יישומי מיקרוגרידים לצמצום אי-שיוויון באיכות אספקת החשמל ולמטרות חברתיות נוספות

כפי שצויין לעיל, יתרון בולט של יישום מיקרוגריד הוא היכולת למקם מקורות אנרגיה קרובים לצרכנים שאמינות אספקת החשמל שלהם נמוכה, ואף נמנעת מהם גישה לשירותים חיוניים. במשקים מפותחים, חוסר גישה לחשמל אמין קיים בעיקר באזורים מרוחקים או באזורים עירוניים בהם נדרשות השקעות עתק כדי לשדרג את תשתיות הרשת. להלן דוגמאות למיקרוגרידים מסוג זה:

- GREEN MOUNTAIN POWER – בשנת 2015, חברת החשמל המפוקחת הגדולה במדינת ורמונט יישמה בעיר רטלנד שבמדינת ורמונט (16 אלף תושבים) מיקרוגריד המכונה STAFFORD HILL SOLAR FARM, הכולל 770 פנלים סולאריים (2 מגהוואט) מגובים על-ידי מערכת אגירה בסוללות (4 מגהוואט). זאת, לצורך פיתוח כלכלי וכיעד ליזמות באנרגיה מתחדשת⁷⁵. בקיץ 2016, המיקרוגריד חסך לצרכני החברה כ-200 אלף דולר בתשלומים לחברת ניהול המערכת ISO NEW ENGLAND כתוצאה מהורדת תרומתן לשיא הביקוש שלה⁷⁶.
- NYSEERDA (חברה בבעלות ממשלתית חלקית לקידום מחקר ופיתוח בתחומי התייעלות אנרגטית ואנרגיה מתחדשת במדינת ניו-יורק) מפעילה מיקרוגריד בעיר סירקיוז (כ-140 אלף תושבים) הכולל אספקת חשמל ל-2300 צרכנים סופיים, כולל מוסדות חינוך, מטות למשטרה וכבאי אש, כ-1700 משקי בית, וכ-600 צרכנים מסחריים ותעשייתיים. מטרות המיקרוגריד כוללות, בין היתר, שיפור אמינות ואיכות החשמל כדי לשפר את

⁷⁴ Asmus & Lawrence, 2016b

⁷⁵ <https://microgridknowledge.com/vermont-builds-microgrid-revitalize-city/>

⁷⁶ <http://www.cleaneenergy.org/ceg-projects/resilient-power-project/featured-installations/stafford-hill/>

התחרויות הכלכלית של העיר ובמרכז מדינת ניו-יורק בכלל⁷⁷. המיקרוגרד מבוסס על מערכת להפקת אנרגיה מפסולת, עם מערכת גיבוי מטורבינות גז.

- תחרות NY PRIZE של NYSEDA הציבה קריטריון מרכזי לזכייה והוא תרומת המיקרוגרד לציבור בעלי ההכנסה הנמוכה. המיקרוגרדים כאלה מתמקדים בתשתית חיונית לאוכלוסייה בסיכון, בעיקר בעת סופות, הוריקנים, וכדומה, וכוללים, בדרך כלל, בנייני דירות ציבורי, בתי חולים, ומקלטים להומלסים, וגם תשתיות כבאי אש, משטרה, ושירותים חירום אחרים.⁷⁸ המיקרוגרדים הזוכים הם, בין היתר:

- אזור המרכז הרפואי בעיר בפאלו (סמוך לשכונת מגורים בסיכון);
- העיר גימסטון, עיר קטנה בעלת שיעור משמעותי של תושבים מתחת לקו העוני - החשופה לסופות רבות והפסקות חשמל בתדירות גבוהה)⁷⁹.
- מנהטן – מיקרוגרד של 100% אנרגיה מתחדשת + אגירה בסוללות לפרויקט דיור ציבורי ע"ש מרקוס גרבי. הפרויקט ממומן על-ידי חברת החשמל CONSOLIDATED EDISON והלוואות מה- NEW YORK CITY ENERGY EFFICIENCY CORPORATION ("NYCEEC", חברה ציבורית להתייעלות אנרגטית)⁸⁰.

- ה-BOARD OF PUBLIC UTILITIES במדינת ניו-ג'רסי - מיישם במסגרת סמכותו כרגולטור של משק החשמל מדיניות ממשלתית לקידום משאבי אנרגיה מבוזרים (להלן, "DER") במטרה לעודד פיתוח כלכלי. חברות החשמל המפוקחות מבצעות את הפרויקטים האלה ומקבלות הכרה תעריפית בעלויות הכרוכות בהם. התועלות הכלכליות כוללות, בין היתר: מיקום מפעלים לפיתוח וייצור טכנולוגיות התומכות במיקרוגרד באזורי אוניברסיטאות פרינסטון ורטגרס ושיפור בתחרותיות של מגזר הייצור במדינת ניו-ג'רסי⁸¹, ובעיקר בחברות שמצריכות רמת אמינות גבוהה יותר מאשר הרמה המוצעת על-ידי חברות החשמל הנוכחיות⁸².

- סן-פרנסיסקו - פרויקט HUNTERS POINT⁸³ ממוקם באזור הסובל מעוני ופסולת רעילה בקרקע כבר עשרות שנים. כחלק מתכנית הפיתוח הכלכלי של האזור, מפותחת בשכונה מיקרוגרד אליה יחוברו 20 אלף צרכנים ביתיים ומסחריים/תעשייתיים. רוב היכולת המותקנת של המיקרוגרד היא ממתקנים סולריים על גגות וחניונים (כ-50 מגהוואט).

- NREL וחברת החשמל COMMONWEALTH EDISON - מקימים מיקרוגרד המשלב מתקנים סולאריים ואחסון בסוללות בשכונת ברונזוויל שבשיקגו (שכונה "גבולית" מבחינה כלכלית)⁸⁴. הפרויקט צפוי לתרום כ-233

⁷⁷ http://oneidalakewatershed.org/RFPs/CNY_RPDB_Microgrid_BCA.pdf

⁷⁸ <http://microgridknowledge.com/microgrids-for-social-justice/>

⁷⁹ <https://microgridknowledge.com/ny-prize-stage-1-awards-who-why-and-whats-it-mean-for-community-microgrids/>

⁸⁰ <http://www.demand-energy.com/2017/04/13/demand-energy-brings-pioneering-solar-plus-storage-microgrid-to-new-york-city/>

⁸¹ http://www.bpu.state.nj.us/bpu/pdf/reports/20161130_microgrid_report.pdf

⁸² http://ceic.tepper.cmu.edu/-/media/files/tepper/centers/ceic/publications/phd%20dissertations/2006/doug_king_phd_thesis_2006%20pdf.pdf?la=en

⁸³ <http://microgridknowledge.com/make-many-community-microgrids-hunters-point-model/>

⁸⁴ <http://www.utilitydive.com/news/comed-pushes-ahead-with-bronzville-microgrid-despite-lack-of-legislative/432689/>

מיליון דולר לכלכלה המקומית, לחסוך כ-80 מיליון דולר בעלויות הולכה, ולצמצם את פליטת גזי החממה בכ-30 מיליון ק"ג⁸⁵.

נספח 8 לדו"ח זה כולל פירוט נוסף על פרויקטים של מיקרוגרید חברתי.

⁸⁵ <http://microgridknowledge.com/make-many-community-microgrids-hunters-point-model/>

אתגרים עיקריים בפיתוח מיקרוגרید: גורמים ופתרונות אפשריים

אתגר 1: חוסר מדיניות ורגולציה תומכת לעידוד מיקרוגרידים

אף שקיימת מדיניות המעודדת מרכיבים מסוימים של המיקרוגריד (PV, אגירה, קוגנרציה), הרי שאין תמריצים ספציפיים עבור יישום מיקרוגרידים במסגרת רגולציה התומכת ביעדים חברתיים דוגמת אמינות, הגנת הסביבה, וחסכון בעלויות החשמל. מדינות ניו-יורק וקונקטיקט החלו ליצור קרנות מימון ייעודיות לפיתוח מיקרוגרידים קהילתיים ולקבוע מנגנוני פיצוי עבור השירותים שהמיקרוגרידים מספקים. בנוסף, קיים חוסר עקביות בחיבור, בתיאום בין מרכיבים (INTEROPERABILITY) ובאימוץ תקני IEEE 1547 - שהם צעדים ראשוניים אך לא מספקים.

אתגר 2: התנגדות מצד חברות החשמל

אף שבעתיד הנראה לעין, צרכני המיקרוגריד יהיו מחוברים גם לרשת הארצית, הרי שצריכה/ייצור עצמי, ויצירת אי-חשמלי מהמיקרוגריד עלולים לשחוק את בסיס ההכנסות לבניית תשתיות המסירה ברשת ולתחזוקתה. כתוצאה מכך, חברות החשמל מבקשות כבר כעת להשית עלויות נוספות על בעלי DER ולעצור תכניות של "מונה נטו". על מנת להתמודד עם אתגר זה יש לבצע שינויים הכוללים הפרדה מלאה בין שירותי ייצור, הולכה, וחלוקה, וניתוק הכנסות מחלוקת החשמל מכמות החשמל הנמכר (DECOUPLING), בדומה לתכנית ה-NYREV במדינת ניו-יורק. עד היום, 14 מדינות בלבד בארה"ב אימצו את הגישה הזאת. סוגיה זו מעלה שאלה משמעותית יותר בנוגע לתפקידן העתידי של חברות החשמל: האם הן תהיינה "אינטגרטורים" שמאזנים בין היצע לביקוש ומסירת חשמל ללא שינוי מהותי המצב הקיים, או שאלו תהפוכנה לחברות לאספקת שירותי אנרגיה, כולל חשמל, קירור, חימום, ספק שירותי חוסן (RESILIENCY), או שילוב בין שירותים אלו? בנוסף, נשאלת השאלה היכן יש למתוח את הקו בין שירותים שהם מונופול טבעי המצריך תעריף ממוקח לבין שירותים אשר אין היגיון כלכלי בהגדרתם כמונופול טבעי, ואשר אותם יש לפתוח לתחרות, תוך מניעת סבסוד צולב בין שירותים ממוקחים לשירותים תחרותיים.

אתגר 3: חוסר תיאום בין בעל המיקרוגריד למשלם חשבונות החשמל

קיימים מספר רב של קמפוסים ומוסדות בהם בעל המיקרוגריד משלם את הוצאות התפעול ואילו צרכן הקצה משלם רק את חשבון החשמל. כלומר, קיים נתק בין מקבל ההחלטה להקים מיקרוגריד לבין הלקוח המשלם את חשבונית החשמל, ולכן אין לאותו גורם קשר הכרחי בין הפעילויות שלו לבין התועלות שהוא מקבל. יצוין כי בעיה זו קיימת גם בתחום ההתייעלות האנרגטית ונפתרת לרוב בחוזה בין בעל הנכס לבין הצרכן. יש למצוא פתרונות דומים עבור מיקרוגרידים.

אתגר 4: מי משלם ומי מרוויח?

תשומת לב מתמדת נדרשת בניהול ותפעול מיקרוגריד, שהוא מעין "חברת חשמל זוטא". ברוב המקרים, אין בנמצא צוות מקצועי או הצדקה כלכלית להעסקת צוות - אך בעלי המיקרוגריד נדרשים לרכוש את היכולות המיוחדות לניהול ותפעול המיקרוגריד. לפיכך, כאשר גורמים שונים ונפרדים משלמים עבור עלויות ההון, התפעול, ותעריפי חברות החשמל/חברות ניהול המערכת, נוצרת בעיה בחלוקת אחריות על ניהול ותפעול ובחלוקת התועלות הכלכליות.

נספח 8 מתייחס באופן יותר מפורט לאתגרים האלה ופתרונות אפשריים.

סיכום והמלצות כלליות

המודל "קלאסי" של אספקת חשמל, הזורם בכיוון אחד מתחנות כוח מרכזיות, דרך תשתית הולכה וחלוקה, עד לצרכן הקצה, ניצב היום בפני מספר אתגרים ותרחישי התפתחות עיקריים שהתשובות להן תקבענה את עתיד מערכת החשמל. על פי אחד התרחישים המסתמנים, המערכת העתידית עשויה לעבור משליטה של חברות גדולות עם זכויות בלעדיות למכירת חשמל לצרכנים, למודל כלכלי ותפעולי חדשני בו חברות החלוקה המסורתיות מספקות רק את התשתיות (קווים, תחנות משנה וכדומה). במסגרת מודל זה מיקרו-גרידים עשויים להיות מוטמעים במבנים לצורך פשטות הקמתם ותפעולם. אפשרות חלופית היא כי יוקמו מיקרו-גרידים יהיו בהספקים גדולים כך שיוכלו לנצל את היתרונות לגודל. כמו כן, ייתכן מודל אמצע בו המיקרוגרידים יהיו רק בקצה הרשת או באזורי ספר, לעומת מודל רחב בו הם פרושים על-פני כל הרשת, כולל אזורים עירוניים. מבחינת המודל הכלכלי, מיקרוגרידים עשויים להתפתח כישויות מסחריות עצמאיות הפועלות כדי להרוויח בעצמן אם כי ייתכן שהממשלה תדרש לסבסד מיקרוגרידים (לפחות בשלבים הראשונים) כדי להביא למימוש התועלות המקומיות והגלובאליות שלהן, דוגמת בטחון אנרגיה או איזון מערכת החשמל המקומית. לצד זאת, יש לזכור כי יש חלופות טכנולוגיות למיקרוגריד, שעלותן עשויה להיות נמוכה יותר.

מנגד, התקדמות בפיתוח מיקרוגרידים מסוג DC המשלבים אנרגיה, קירור, וחימום, עשויה להאיץ אימוץ מיקרוגרידים במשק. יש להמתין ולראות איזו טכנולוגיה תקדם מיקרוגריד שיכלול ייצור מדלקים מחצביים, אנרגיה מתחדשת לא-רציפה, ומערכות אגירה וניהול ביקושים כדי לאזן היצע וביקוש.

יצוין כי התחזית ארוכת הטווח להתפתחות תחום המיקרוגרידים היא אופטימית. עלות משאבי אנרגיה מבוזרים כמו PV ומערכות אגירת אנרגיה יורדת, ואילו פרוטוקולים, תקנים, ואסטרטגיות בקרה למיקרוגריד עוברים תהליך של סטנדרטיזציה במספר משקי חשמל בעולם. למעשה, מיקרוגרידים כבר קיימים ופעילים בעולם, ורגולטורים וקובעי מדיניות מכירים את היכולת של המיקרוגריד בהובלת המעבר למערכות חשמל מבוססות על אנרגיה ירוקה ומבוזרת. אם מגמות אלו תמשכנה במקביל לפיתוח מודלים מתאימים של מימון, עלות המיקרוגריד לקוט"ש עשויה לרדת מתחת התעריפים הקמעוניים היום. אולם, אם תנאים אלו לא יתממשו, אזי המיקרוגריד עשוי להיות מוצר נישא המשמש רק צרכנים בעלי דרישות מיוחדות לחשמל איכותי ואמין, דוגמת קמפוסים ומוסדות כמו בתי-חולים.

המלצות מדיניות

כדי לתת תשובות לשאלות הנ"ל ולממש את הפוטנציאל של המיקרוגריד בישראל, מומלץ לבצע את הפעילויות כדלהלן:

- ביצוע פרויקטי פיילוט באזורים שונים, הכוללים מיפוי חסמים ותועלות לפי סוגי המיקרוגרידים השונים. יש לפעול בצורה מתודולוגית, לבדוק את כל התועלות והעלויות הפוטנציאליים ולבצע סקרי היתכנות תוך איתור קנה המידה, וסוג הצרכנים האופטימלי כלכלית ואסטרטגית. יש לבצע את הפיילוטים האלה באתרים שונים, כולל שכונות עירוניות, יישובים מנותקים מהרשת הארצית, פארקי תעשייה, וקמפוסים.
- ביצוע ניתוח עלות-תועלת מעמיק ושקוף של מערכות מיקרוגריד בהינתן ההסדרות קיימות, ובאופן שימצא את האיזון הנכון בין שמירת ההסדרות הפרטניות הקיימות, והמחויבות ליזמות בתחום זה, לבין אופן ביטויים בתרומה הכוללת של מערכות מיקרוגריד. בכל מקרה, יש להימנע מפגיעה/שינוי של הסדרות קיימות כחלק מהתהליך. מוצע שמקבלי החלטות יגדירו מיקרוגריד "יציג" (למרות השונות הגדלה עם השנים בין סוגי מיקרוגריד).

- קביעת תרחיש בסיס לתכנית אב מוסכמת למשק החשמל, ושימוש בקצבי פריסת המיקרוגרידים שפורסם על-ידי חברת נביגנט (תרחיש נמוך, בסיס, וגבוה)⁸⁶.
- מימון בדיקת ישימות Feasibility Study למספר מיקרוגרידים בדומה לתכנית NYPrize של NYSERDA במדינת ניו-יורק. יצוין שהמימון הגיע מהיטלים בתעריפי החשמל המפוקחים שהועברו ל-NYSERDA לצורך יוזמת ה-NYPRIZE ומימון פרויקטים מבטיחים – שיטה שאפשר לאמץ גם בישראל באמצעות התעריפים המערכתיים.
- תמיכה בחדירת יישומי מיקרוגריד באמצעות תכניות להכשרה מקצועית והסמכה : : קורסי הכשרה , הסמכת יועצים/מתפעלים, והסמכת פתרונות טכנולוגיים. התכנית יכולה להיות חלק מתכנית הכשרה בתחומי רשת חכמה או כתכנית משלימה בקורסים לתפעול מערכות חשמל כולל רשת חכמה.

⁸⁶ <http://www.neaman.org.il>

נספחים

- נספח 1 : הגדלת האמינות המשקית (ליאור אבן-חן)
- נספח 2 : הגדלת הייצור המשקי באנרגיות מתחדשות (ליאור אבן חן)
- נספח 3 : חיסכון בהשקעות תשתית ברשת ההולכה והחלוקה (ליאור אבן חן)
- נספח 4 : תועלת המיקרוגרید ברמת הפרט (ליאור אבן חן)
- נספח 5 : שירותים נלווים (ליאור אבן חן)
- נספח 6 : Microgrids Lessons Learned (אלעד שביב)
- נספח 7 : רגולציה (אילן סולימן)
- נספח 8 : ניתוחים כמותיים ואיכותיים על השלכות סביבתיות וחברתיות מפריסת מיקרוגרידים (מלקולם איינספן)
- נספח 9 : Microgrid Review (אדם הירש)

נספח 1: הגדלת האמינות המשקית (ליאור אבן-חן)

הגדלת האמינות המשקית

עבור צרכני הקצה ישנה חשיבות רבה לאספקה מתמדת, רציפה ואיכותית של חשמל. בעידן הטכנולוגי בו אנו נמצאים כיום המשק ככלל יכול להיפגע בעקבות כל הפרעה העלולה להיווצר באספקת החשמל לה הוא זקוק. לכן, המטרה היא שאספקת האנרגיה תהיה אמינה. אמינות אספקה, מהווה נדבך חשוב בשרשרת זרימת החשמל שתחילתה במערך ייצור החשמל דרך רשת החשמל בקווי מתח על ועליון, קווי מתח גבוה, וקווי מתח נמוך וסיומה בנקודת חיבור המתקן הפרטי של הצרכן/יצרן לרשת. אספקת חשמל אמינה מתבטאת בשני אספקטים מרכזיים:

א. אספקת חשמל רציפה תוך צמצום ההפרעות ברשת למינימום האפשרי.

ב. אספקת חשמל איכותית תוך שמירה על יציבות התדר איזון המתח ועוד.

רמת האמינות של רשת החשמל נגזרת מפרמטרים רבים כגון: גיל הקו, אורך הקו, סוג הקו (עילי, תת קרקעי או מעורב) סוג הציוד המותקן בקו, מספר המפסקים המותקנים בקו, מזג האוויר בסביבת הקו וכד'. מבין הגורמים הרבים המשפיעים על רמת האמינות בקו, אורך הקו וסוג הקו הינם הפרמטרים המשפיעים ביותר על רמת האמינות בו. רמת האמינות לצרכנים המחוברים לקווים ארוכים או עיליים באופן אינהרנטי נמוכה יותר מרמת האמינות של צרכנים המחוברים לקווים קצרים או תת קרקעיים.

מדדים לרמת האמינות ברשת

את רמת האמינות לצרכנים מקובל למדוד באמצעות שלושה מדדים שונים אשר כל אחד מהם מהווה אינדיקציה לרמת השירות המסופקת לצרכן הקצה:

1. מדד דקות אי אספקה ממוצעות לצרכן ממוצע בשנה (CAIDI) – מספר הדקות הממוצע בשנה בהן צרכן משק החשמל מנותק מאספקת חשמל.
2. מדד תדירות הפרעות ממוצעות לצרכן ממוצע לשנה (SAIFI) – מספר הפעמים בשנה בהן צרכן היה מנותק מאספקת חשמל.
3. מדד משך שיקום ההספקה – משך הזמן הממוצע בו סולקה ההפרעה מתחילתה ועד החזרת החשמל לאחרון הצרכנים שנותקו כתוצאה מהאירוע.

בישראל, רמת אמינות החשמל הנמוכה ביותר לפי מדד דקות אי אספקת חשמל נמדדת במקטע קווי המתח הגבוה. נכון לשנת 2012: מדד דקות אי אספקת החשמל ביחידות הייצור ובקווי מתח על ועליון עומד על כ- 5 דקות בממוצע לשנה; בקווי מתח הנמוך מדד דקות אי אספקת החשמל עומד על כ- 17 דקות בממוצע בשנה, ואילו בקווי מתח גבוה מדד דקות אי אספקת החשמל עומד על כ- 171 דקות בממוצע לשנה. מסיבה זו הפיקוח על אמינות האספקה והפעולות לשיפור ממוקדות ברשת המתח הגבוה.

כאמור, את רמת האמינות לצרכנים מקובל למדוד באמצעות שלושה מדדים שונים אשר כל אחד מהם מהווה אינדיקציה לרמת השירות המסופקת לצרכן הקצה. כמפורט להלן:

1. **מדד אי אספקה** – מדד זה מציג את ממוצע המשך המצטבר (בדקות) של הפסקות חשמל שהיו ללקוח במשך שנה.⁸⁷

טבלה 5 : השוואת דקות אי-אספקה בממוצע ללקוח, 2003-2015.

השוואת דקות אי אספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל												
2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
272	139	234.4	171.6	132.2	144.9	121.3	123.6	133.5	178.7	134.5	151.1	177.7

בשנת 2013 פרסמה רשות החשמל את מדד דקות אי אספקה בישראל בפילוח גיאוגרפי על פי מחוזות האספקה של חח"י. להלן נתוני שנת 2013

טבלה 6: מדד אי אספקה לשנת 2013 בחלוקה למחוזות חח"י.

האזור/מחוז	מדד דקות אי-אספקה לצרכן בשנת 2013
חיפה	132.7
קריות	141.8
סה"כ מחוז חיפה	136.3
חדרה	257.6
עפולה	143.7
טבריה	104.2
צפת	478.9
כרמיאל	196.8
סה"כ מחוז הצפון	220.4
סה"כ מחוז דן	108.5
נתניה	276.5
רעננה, הרצליה	248.3
פתח תקווה	169.9
ראשון לציון	237.6
רמלה, לוד	162.9
רחובות	223.3
אשדוד	270.3
אשקלון	192.6

⁸⁷ מדד דקות אי אספקה לשנת 2015 עומד על 272 דקות, וזאת בין היתר לנוכח נזקי הסערה שפקדה את המדינה בחודש אוקטובר 2015.

נפת באר שבע	374.3
אילת	140.5
סה"כ מחוז הדרום	246.6
אריאל	881.6
בית שמש	532.4
ירושלים	352.8
סה"כ מחוז ירושלים	478
סה"כ לכלל חח"י	234.4

ניתן לראות כי קיימת שונות גדולה בין האזורים התפעוליים השונים. השונות מוסברת הן במאפייני הטופוגרפיה השונים (קווים הרריים וארוכים, אזורי מז"א קיצוני וכו' והן במאפייני צפיפות האוכלוסייה וכמות קווי האספקה המגיעים לכל אזור.⁸⁸

2. **מדד תדירות הפסקות החשמל** – מדד זה בוחן את המספר הממוצע של הפסקות החשמל שהיו ללקוח במשך שנה.

טבלה 7 : השוואת תדירות אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל

השוואת תדירות אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל									
2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
3.7	2.7	3.2	2.6	2.6	2.7	4	2.9	3.4	3.6

3. **מדד משך שיקום האספקה** – מדד זה מבטא את משך הזמן הממוצע שארכה כל הפסקת חשמל ללקוח, הוא מתקבל מחלוקת דקות אי האספקה בתדירות האספקה.

טבלה 8 : השוואת משך שיקום אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל

השוואת משך שיקום אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל									
2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
46.7	48.6	45.9	46.5	47.9	48.8	45.2	46.1	44.2	50

⁸⁸ כבר בשלב זה ניתן להניח כי באזורים בהם כמות דקות אי האספקה גבוה יותר התועלת מהקמת המיקרוגריד עשויה להיות גדולה יותר

עלות אי אספקה בישראל:

בטבלה 9 ניתן לראות עלויות אי אספקה לקוט"ש לפי חלוקה לצרכנים שונים. מנתוני הטבלה עולה כי סך העלות הממוצעת לצרכן, משוקללת לפי אחוזי הצרכנים השונים כולו עומדת על 121.4 ש"ח עבור שינויים בתדירות ועל 111.3 ש"ח עבור שינויים במשך הפסקות החשמל.

העלות עבור שינוי בתדירות הינה העלות השולית של אירוע אי אספקה נוסף ואילו העלות עבור השינוי במשך הינה העלות השולית עבור שינוי במשך ההפסקות (בהינתן מספר הפסקות קיים). התוצאות בשני המקרים הן שקלול של העלות עבור קבוצות הכנסה שונות (לפי הצריכה הממוצעת לשעה). כמו כן, משקלות הצריכה לפי שעות המוצגות בלוח הן על פי התפלגות שעות הצריכה בפועל של משקי הבית. במסגרת המחקר הונח כי אורכה הממוצע של הפסקת חשמל עומד על 45 דק' וכי בממוצע נרשמות 4.5 הפסקות לשנה.

טבלה 9: שקלול עלות אי-אספקה לקוט"ש לא מסופק לפי הצרכנים השונים⁸⁹

עלות אי אספקה- משך (ש)	עלות אי אספקה- תדירות (ש)	משקל הצריכה	צריכה בפועל	
77	99	9.3%	4,305	מתח עליון
66	83	12.8%	5,950	גבוה תעשייתי
88	99	13.9%	6,458	גבוה מסחרי ציבורי
191	268	3.7%	1,713	נמוך תעשייתי
263	300	18.9%	8,793	נמוך מסחרי ציבורי
8.4	10.6	4.8%	2,247	שאיבת מים
100	114	3.9%	1,827	יישובים חקלאיים
71	53	32.7%	15,201	משקי בית
111.3	121.4	100%	46,494	סה"כ

השפעות מזג האוויר

- תקופות של מזג אוויר "קיצוני" (חורף קשה או קיץ חם במיוחד), עשויות להשפיע על היקף הביקוש לחשמל, כמו גם על אמינות אספקת החשמל ויכולתה של החברה לספק חשמל לכל צרכני הקצה בישראל. לדוגמא, בחודש אוקטובר 2015 פקד את המדינה אירוע מזג אוויר חריג, אשר גרם לנזקים ברשת החשמל והוביל לשיבושים באספקת החשמל ברחבי המדינה. החברה נערכת באופן מתמיד על מנת להתמודד עם מצבי קיצון, המאופיינים בין היתר, בביקושי שיא

⁸⁹ מתוך: <http://energy.gov.il/gxmsmnpublishations/aluthashmal.pdf> - עמ' 34

לחשמל. בנוסף, בשנים האחרונות חל גידול בהיקף הייצור המותקן במשק החשמל, בעיקר כתוצאה מכניסה של יחידים לפעילות ייצור במשק החשמל והפעלת התוספות הקיטוריות ברמת חובב, חגית ואשכול, באופן אשר מקטין את הסיכון לאי יכולתה של החברה לעמוד בביקושים הנדרשים ממנה אף בנסיבות של מזג אוויר קיצוני, ולפיכך, להערכת החברה קטן הסיכון לאי יכולת של החברה לספק את כל ביקושי החשמל הנדרשים ממנה כתוצאה ממחסור בהיקף ייצור מותקן⁹⁰. בהקשר זה ניתן לציין כי ההספק הנקוב במשק נכון לדצמבר 2017 עומד על MW 15,808 כאשר שיא הביקוש של כל הזמנים אשר נקבע בשנת 2015 עמד על MW 12,905. על פי תחזיות רשות החשמל בשנת 2018 ההספק הנקוב החזוי לשנת 2018 הוא MW 16,010 כאשר שיא הביקוש החזוי ל-2018 הינו 13,300.

• רשת החשמל האמריקאית של קווי ההולכה והחלוקה אינה בנויה בצורה המאפשרת לה התאוששות מהירה מנזקים אשר משפיעים בבת אחת על מספר מרכיבים במערכת, ניתן היה לראות זאת לפני מספר שנים בזמן הוריקנים "איירין" (אוגוסט 2011) ו"סנדי" (ניו יורק, אוקטובר 2012) אשר פקדו את מזרח ארה"ב. מספר ומשך הפסקות החשמל בארה"ב המשיך לעלות, כאשר הסיבה העיקרית לכך היא אירועי מזג אוויר חריגים. משך הזמן הממוצע של הפסקות חשמל בארה"ב הוא 120 דק', כאשר זמן זה ממשיך לעלות. פעמים רבות גנרטורים מונעי דיזל המשמשים לגיבוי הם מקור אספקת האנרגיה הזמין היחיד. אך השימוש בגנרטורים אלו יכול לגרום למספר בעיות:

1. בדרך כלל הגנרטורים משרתים רק את הבניינים שאליהם הם מחוברים.
2. פעמים רבות כמות הדיזל במיכל הגנרטור מספיקה ל-72 שעות ומשלוחי דלק עלולים להתעכב באופן משמעותי.
3. בדרך כלל קיבולת הגנרטור מותאמת לביקושי עומס השיא ולכן הם אינם עובדים ביעילות עבור עומסים נמוכים יותר.

חשוב לציין כי רשת החשמל בארה"ב מאופיינת בקווי מתח עליון ועל-עליון ארוכים מאוד אשר מעבירים את החשמל המיוצר באזורים שונים בארה"ב לעיתים אף מאות ק"מ עד לאזורי הצריכה. מאפיין זה יוצר תלות גדולה של אזורים שלמים בתקינות מערכת ההולכה. בנוסף עקב מיקומה הגיאוגרפי לצד האוקיינוסים ובמישורים הגדולים של מרכז המדינה חשופה מערכת ההולכה והחלוקה לסופות הוריקן גדולות ו/או סופות טורנדו אשר לא קיימות באזור ישראל.

תועלות מערכת המיקרוגריד

מערכות המיקרוגריד יכולות להוות פתרון לבעיות אמינות האספקה. המיקרוגריד יכול לבדוד את עצמו ע"י ניתוק מבוקר מהרשת האזורית וביצוע תיאום וסנכרון בין הגנרטורים במיקרוגריד כך שלא יהיה צורך עבור כל בניין להחזיק מערכת גנרטורים נפרדת לגיבוי. השימוש במספר הגנרטורים הדרוש על מנת לספק תמיכה בעת הצורך מבטיח שימוש יעיל וניצול מירבי של כל הדלק הנמצא באזורו של המיקרוגריד. מערכות לאחסון אנרגיה גמישות ונוחות יותר מאשר תחנות כוח משניות אשר משמשות לגיבוי, גודלן הקטן של מערכות אלו מאפשר תפוצה משנית יעילה יותר. כאשר המערכת הראשית נפגעת, מערכת האחסון יכולה להמשיך ולספק אנרגיה לצרכנים. ניתן למקם מערכות אלו בצורה אשר תספק שירות יותר אמין ומאובטח לצרכנים. המיקרוגריד יכול להשתלב במספר תחומים נוספים בנוסף לגיבוי כגון:

1. מקורות אנרגיה חלופיים כגון אנרגיה סולארית וטורבינות רוח.
2. טורבינות וגז ומתקני CHP.
3. אחסון האנרגיה בסוללות ובמכונות חשמליות.

⁹⁰ מתוך: <https://www.iec.co.il/investors/DocLib1/ISA2015.pdf>

מערכת המיקרוגרید רגישה לעומסים ולתנאים חריגים וביכולתה לנתב את האנרגיה למקומות הקריטיים הנדרשים בהתאם לכל תרחיש.

ניתן להגדיר למיקרוגרید מספר פעולות עיקריות:

1. ייצור אנרגיה מקומי
2. ניהול ובקרת עומסים מקומיים
3. יכולת להתנתק באופן עצמאי מהרשת הכללית ולפעול במצב מבודד
4. יכולת לעבוד באופן מגובש עם הרשת המקומית.⁹¹

שרידות

אנו מצפים מרשתות הנדסיות כגון: רשת חשמל, גז, מערכת הולכת מים ועוד, לפעול באופן רגיל ברוב הזמן. התנהגותן של מערכות אלו תוך כדי מצבים של תקלות והזמן שלוקח להן לפעול מחדש יכולות להיות מתוארות על ידי תכונות האמינות והזמינות. לעומת זאת, היכולת של רשת לעמוד בנזקים פתאומיים (ולא להיפגע) אשר נגרמים כתוצאה מאירועים קשים וחריגים נקראת שרידות. תכונת השרידות לא הייתה חלק משיקולי בניית ועיצוב המערכת בעבר וכעת ישנו הצורך לעשות התאמות למערכות הקיימות. כיום, הסיכויים להתרחשותם של אירועים קשים ובלתי צפויים גדלים לאור התפתחותה של הטכנולוגיה, השינויים באקלים ושינויים המתרחשים בסביבה הפוליטית. בנסיבות הקיימות, נפילה של רשת יכולה להשפיע באופן משמעותי על אורח החיים והכלכלה ולכן כיום חשיבותה של תכונת השרידות גדלה משמעותית. על מנת למתן את השפעות תופעות הלוואי מאירועים אשר פוגעים ברשת ישנו הצורך בחישובים מתמטיים על מנת להעריך את השרידות הקיימת במערכת הנוכחית ואת יעילותה. הגורמים שמשפיעים על שרידות המערכת הם: רכיבי המערכת, סוג הרכיבים ואיך הם מחוברים ביניהם.⁹²

במשק החשמל, "שרידות" הינה היכולת של רשת לעמוד בנזקים פתאומיים (ולא להיפגע) אשר נגרמים כתוצאה מאירועים קשים וחריגים נקראת שרידות. תכונת השרידות לא הייתה חלק משיקולי בניית ועיצוב המערכת בעבר וכעת ישנו הצורך לעשות התאמות למערכות הקיימות. כיום, הסיכויים להתרחשותם של אירועים קשים ובלתי צפויים גדלים לאור התפתחותה של הטכנולוגיה, השינויים באקלים ושינויים המתרחשים בסביבה הפוליטית. בנסיבות הקיימות, נפילה של רשת יכולה להשפיע באופן משמעותי על אורח החיים והכלכלה ולכן כיום חשיבותה של תכונת השרידות גדלה משמעותית. על מנת למתן את השפעות תופעות הלוואי מאירועים אשר פוגעים ברשת ישנו הצורך בחישובים מתמטיים על מנת להעריך את השרידות הקיימת במערכת הנוכחית ואת יעילותה. הגורמים שמשפיעים על שרידות המערכת הם: רכיבי המערכת, סוג הרכיבים ואיך הם מחוברים ביניהם.⁹³

שרידות מערכת החשמל ותרומתו של המיקרוגרید לשרידות מצריכים התייחסות. במשך השנה האחרונה, הרגולטור בארה"ב בתחום אנרגיה FERC פרסם דרישה מחברות ניהול המערכת להגדיר "שרידות" ולהצביע על צעדים שחברות ניהול המערכת מתכננות לנקוט כדי לשמור על החוסן הנדרש. עד כה, עלות השרידות – מעבר לעלות האמינות – טרם כומתה. בכל אופן, יש לכמת אותה, גם לצורך הערכת התועלות של המיקרוגרید וגם לצורך תמחור שירותי חוסן במידה

⁹¹ מתוך: <https://www.nema.org/Storm-Disaster-Recovery/Microgrids-and-Energy-Storage/Pages/Energy-Reliability-with-Microgrids.aspx>

⁹² מתוך: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1205/1205.0768.pdf>

⁹³ <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1205/1205.0768.pdf>

שה- FERC יחליט שיש לתמחר אותם. עד כה, לא ברור אם ישראל או מדינות אחרות תתייחסנה לנושא של שרידות בכלל ולתרומת המיקרוגרید לשרידות המערכת בפרט.

התקן האירופאי בנושא רגולציית איכות החשמל (EN 50160)

אנרגיה חשמלית היא תוצר אשר כמו כל תוצר אחר צריך לספק את הצרכן ולעמוד בתקני האיכות הרלוונטיים. כיום ישנם מכשירים חשמליים רגישים אשר זקוקים לאיכות חשמל גבוהה, ההפסד המוערך (בתעשייה) שנוצר בעקבות איכות ירודה של חשמל הוא כ- 10 מיליארד יורו בשנה. עפ"י תקן EN 50160 יצרן החשמל מחויב לספק חשמל באיכות הדרושה לצרכן, אך בפועל רמת האיכות היא פשרה בין היצרן לצרכן. בתקן פורסם במהלך יולי 2010 ע"י האיחוד האירופי, הוא מאפיין ומגדיר את איכות המתח המסופק ברשת הציבורית ומהווה עדכון לתקן הקדם לו (ממרץ 2007). התקן מתייחס למתח אספקה עד 150 קילוואט בחלוקה למתח נמוך, בינוני וגבוה בהתאם להגדרת תחומי המתחים באירופה.⁹⁴

מאפייני המתח (בהתאם לתקן):

- תדר – התקן דורש כי 99.5% מהשנה תדר הרשת יהיה בתחום של $1\% \pm$ HZ50, וביתרת הזמן $4\% \pm 6\%$
- שינוי מתח אספקה – ב- 95% משבוע המדידה המתח בערכי $\text{ROOT MEAN SQUARE}^{95}$ (להלן, "RMS") לא יחרוג מהמתח הנקוב ביותר מ- $10\% \pm$, במקבצי דגימה של כל 10 דקות. במתח עליון וגבוה הדרישה היא כי ב- 99% משבוע המדידה המתח בערכי RMS לא יחרוג מהמתח הנקוב במקטע של 10 דקות מ- $15\% \pm$.
- שינויי מתח מהירים – נגרמים בדרך כלל כתוצאה משינויי עומס מהירים, מיתוגים ברשת ו/ או כשל.
- רמת הבהוב – התקן דורש כי ב- 95% מהשבוע רמת הבהוב (מציינת את השינוי במעטפת גל המתח אשר יש לו השפעה על העין האנושית) בטווח הארוך עד $Plt \geq 1$.
- אי איזון במתח האספקה – התקן דורש כי ב- 95% מהשבוע במקבצי דגימה של 10 דקות ערכי המחזוריים השליליים לא יהיו יותר מ- $0\% - 2\%$ מהמחזור הבסיסי. התקן מתייחס רק למחזורים השליליים מאחר והם הדומיננטיים בהפרעות מולכות.
- מתח הרמוני – רמת עיוות הרמוני במתח מבטאת את היחס בין גל המתח שנדגם לגל סינוסואידלי בתדר הרשת והתקן דורש כי ב- 95% מהשבוע במקבצי דגימה של 10 דקות הערך של העיוות הרמוני הכולל במתח לא יחרוג מ- 8% מחושב עד ההרמוניה ה-40.
- מתח אינטר הרמוני – אין ניתוב מחייב אך ברור שהוא משפיע על עליה ברמת הבהוב. מתח אינטר הרמוני הינו מתח המורכב מגלים סינוסואידלים באמפליטודות שונות ובתדרים שאינם כפולות שלמות של דבר הרשת.
- הפרעות במתח האספקה – אינן מפורטות כמותית.
- שקיעות/עליות מתח – תופעות הנגרמות בדרכי במערכת האספקה, שתיהן בלתי צפויות וסיווגן הינו בהתאם לרגישות הציוד ומיקום התקנתו.

⁹⁴ מתוך: <http://admin.copperalliance.eu/docs/librariesprovider5/power-quality-and-utilisation-guide/542-standard-en-50160-voltage-characteristics-in.pdf>

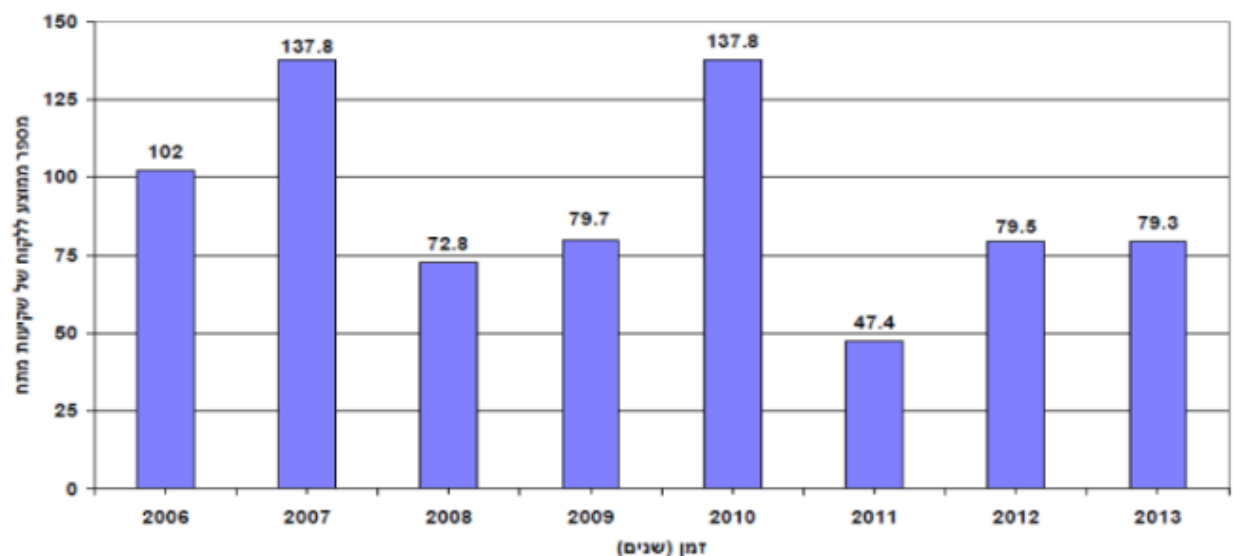
⁹⁵ המונח RMS מוגדר כ- "שורש ממוצע הריבועים שמשמש למדידת ההספק הרגעי. מכיוון שמדובר במתח חליפין (AC) משתמשים ל RMS למצוא את הממוצע של הסינוס.

- תופעות מעבר – נגרמות בד"כ כתוצאה מהופעת ברק או מיתוג מהיר של עומס כבד. בכדי לעמוד בתופעות מתחי היתר התקן מומלץ להתקין אמצעי הגנה בהתאם לתקן IEC 60364-4-44.

יצוין שתקן 50160 לרגולציית איכות החשמל⁹⁶ בישראל הוא התאמה של תקן EN 50160. התקן הזה נכנס לתוקף כתקן וולונטרי החל מינואר 2011 ובמתכונתו הנוכחית התקן הישראלי מתייחס למתח גבוה ומעלה (מ-1 קילוואט ומעלה בהתאם למתחים הנקובים בישראל). התקן מתייחס למאפייני מתח האספקה בלבד ולא לאופי העומס.

נתונים ממשיק החשמל הישראלי:⁹⁷

שקיעת מתח הינה ירידה רגעית (עד דקה) ברמת המתח עד ל- 5% מהרמה הנדרשת. זהו אחד הפרמטרים לקביעת איכות החשמל. התרשים מציג את ממוצע מספר שקיעות המתח בהתפלגות שנתית לצרכן/יצרן בשנים האחרונות, ומצביע על שיפור ממוצע של כ-79.5 בין שנים 2008 ל-2013 כאשר שנת 2010 מציגה תוצאה חריגה של 137.8 ואילו שנת 2009 חריגה לטובה עם ממוצע של 47.4 47.4 שקיעות בלבד.

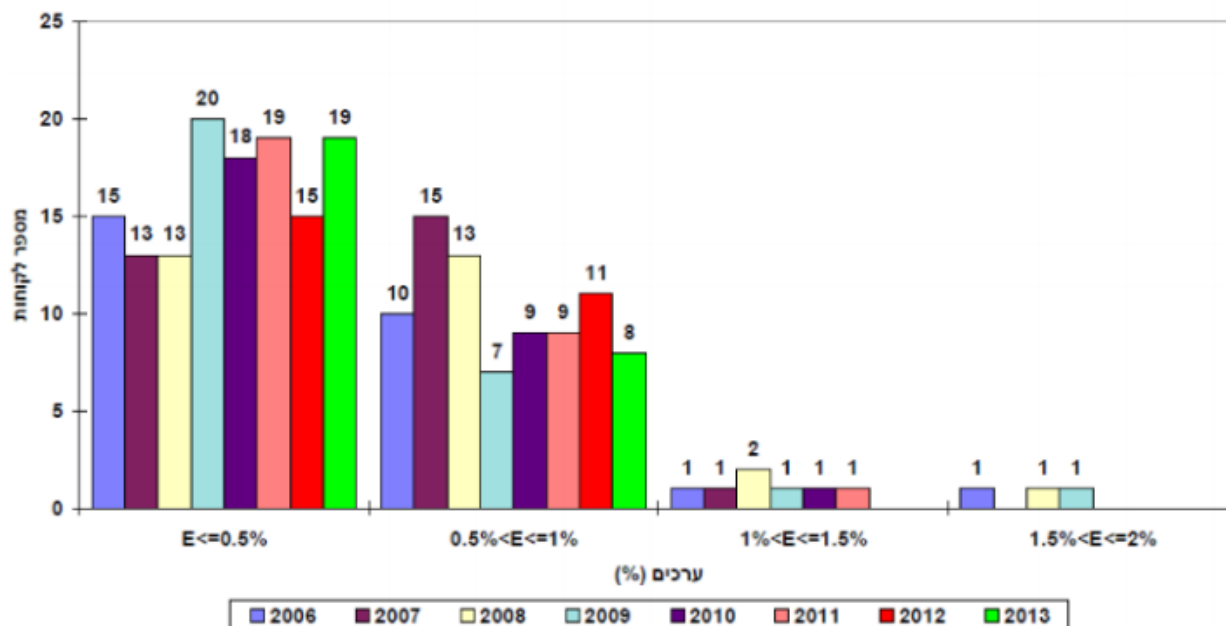


גרף 2: התפלגות שנתית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מתח עליון

אי איזון מתח מבטא את מידת חוסר האיזון בין 3 המתחים במערכת תלת פאזית. זהו אחד הפרמטרים לקביעת איכות החשמל. התרשים מציג בתחומי ערכי אי איזון מתח שונים את הערכים המרביים שנמדדו מול מספר הצרכנים/יצרנים שחוו את אי האיזון בכל תחום, ומצביע על שיפור בערך המרבי ובממוצע לצרכן/יצרן יחסית לשנים קודמות, ועל עמידה בתקנים בינלאומיים וישראליים.

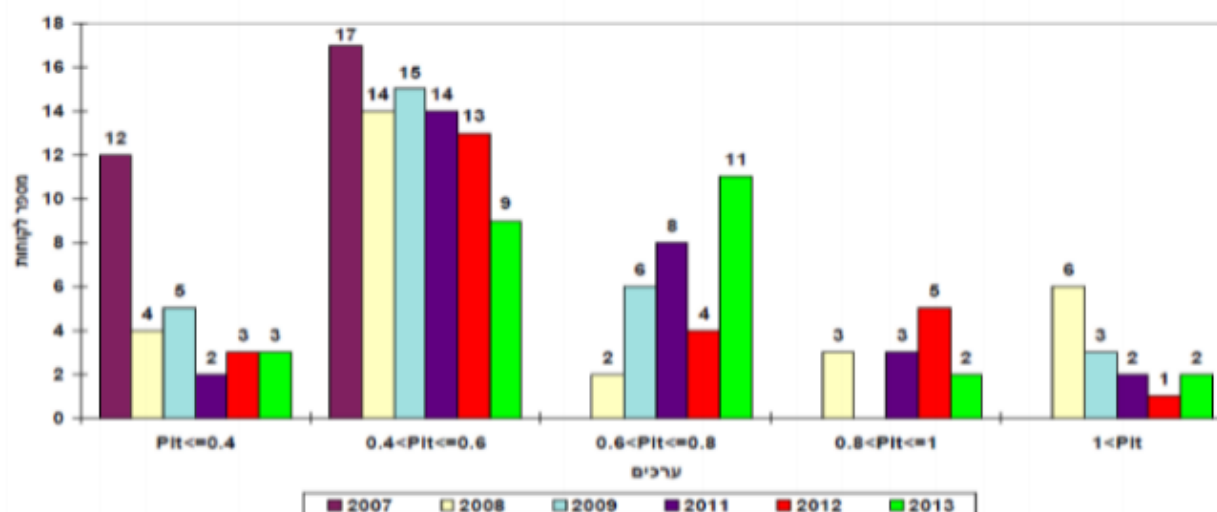
⁹⁶ מתוך: http://www.seeei.org.il/prdFiles/2908_desc2.pdf

⁹⁷ מתוך: https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/doch_reslut_2015.pdf



גרף 3: התפלגות ערכים מרביים של אי איזון מתח לצרכני מתח עליון.

עצמת הבהוב מתח הינה חווית השינוי בעוצמת התאורה הנובעת משינויים מחזוריים במעטפת גל המתח. זהו אחד הפרמטרים לקביעת איכות החשמל. התרשים מציג בתחומי ערכי הבהוב מתח שונים את הערכים המרביים שנמדדו מול מספר הצרכנים/יצרנים שחוו את ההבהוב בכל תחום. הנתונים מצביעים על חריגה בערך המרבי אך ביצועים דומים בממוצע לצרכן/יצרן בשנת 2013 יחסית לשנים קודמות.



גרף 4: התפלגות ערכים מרביים של עוצמת הבהוב לצרכני מתח עליון

מהנתונים לעיל עולה כי הפרמטרים הנמדדים במשק החשמל עומדים, כאמור, בתקני איכות בינלאומיים ובכלל זה בתקן ישראלי 50160, המבוסס על התקן הבינלאומי EN50160.

סקירת ספרות

בדו"ח של NYSERDA ישנה התייחסות לפרמטרים אשר נלקחו בחשבון כאשר החוקרים כימתו את תועלת האמינות. NYSERDA משתמשים במודל ה-Benefit-Cost Assessment (BCA) אשר בנוי על מנת לנתח את יתרונות ועלויות פרויקט המיקרוגרید עבור משך זמן של 20 שנות פעולה. המודל משתמש בטכניקות היוון שגרתיות על מנת לחשב את הערך הנוכחי של העלויות והיתרונות בהתבסס על ערך הניכיון השנתי המצוין ע"י המשתמש. כל תוצאות חישובי המודל מותאמים לאינפלציה וערך הדולר בשנת 2013.

על מנת להעריך את יתרון האמינות, מודל ה-BCA משתמש בנתונים הבאים:

- ערכי בסיס עבור שני מדדים של איכות ושירות: מדד תדירות הפרעות המערכת הממוצע (SAIFI) ומשך ההפרעה הממוצעת ללקוחות (CAIDI) עבור מתקנים המיועדים להשתמש במערכות מיקרוגריד.
- מספר הלקוחות הביתיים והלא ביתיים אשר מסופק להם שירות בעזרת מערכת המיקרוגריד.

במודל NYSERDA, הגיליון ICE CALCULATOR מחשב תשומות שמאפיינות את בסיס הצרכנים, כולל צריכת אנרגיה שנתית, התפלגות צרכנים מסחריים ותעשייתיים לפי מקטע כלכלי, פריסת גנרטורים לגיבוי, תכונות דמוגרפיות, סוגי מבנים ביתיים, והתפלגות העלטות לפי סוגים יומיים, שבועיים, ושנתיים. ה-ICE CALCULATOR מאפשר התאמת התשומות האלה לאזור הפרויקט. ומחשב את עלויות העלטות לפי סוג צרכנות ולכלל הצרכנים. העלויות האלה הינן תוצאות של הרצות מודל אקונומטרי של עלות העלטות על התשומות הנ"ל כמשתנים אקסוגניים/מסבירים⁹⁸.

החישוב עפ"י נתונים אלו לוקח בחשבון שימוש אנרגיה שנתי ע"י צרכנים ביתיים ולא ביתיים, חלוקת הצרכנים המסחריים והתעשייתיים לפי ענפי המשק, נתונים דמוגרפיים, השכיחות של הימצאות גנרטור גיבוי אצל הלקוחות ועוד. התוצאה המתקבלת נותנת הערכה לעלות השנתית של ההפסקות בשירות עבור כל סוג של לקוח וכמו כן גם עבור כלל הלקוחות. עפ"י הערכות אלו מתבצעות הערכות לגבי המצב כאשר ישנו שימוש במיקרוגריד.

מתוך הדוח (C-25)

The estimate of reliability benefits takes into account the capabilities of the backup power systems already available at the Broome County site. It also takes into account the variable costs of operating all generators, **both in the baseline scenario and as integrated components of a microgrid**. The estimated improvement in reliability stems from the assumption **that establishment of a microgrid would promote regular testing and maintenance of all generators, reducing the risk that these units may fail when called into service**. In the **baseline** scenario, the analysis assumes a **15 percent failure rate**, based on an estimate provided by the Electric Power Research Institute (EPRI).³ it assumes **that establishment of a microgrid would reduce the rate of failure to near zero**.

⁹⁸ <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Electric-Power-Delivery/How-Reliable-Is-Your-Microgrid.pdf>

כימות התועלת

במסגרת המחקר עלו שתי מתודולוגיות לחישוב התועלת מהגברת אמינות האספקה. הנוסחה הראשונה לקוחה מהמאמר "Economic Analysis of Microgrids Including Reliability Aspects" אשר עוסק בניתוח הכלכלי של תועלות המיקרוגריד ובפרט בתועלת אמינות האספקה. המאמר מציע מתודולוגיות ונוסחאות העוזרות לכמת תועלות אלו. הנוסחה השנייה נלקחה ממחקר כמותי בסוגיית עלות אי אספקת חשמל ומציע נוסחאות ונתונים בנושא.

הנוסחה הראשונה לקוחה ממאמר שמטרתו ומטרת המתודולוגיות המופיעות בו היא לזהות את העלויות הרלוונטיות אשר קשורות בהקמת מתקן מיקרוגריד ותועלות הנובעות משיפור אמינות האספקה, מה שיאפשר לבנות מודל אשר יעזור בהחלטה על כדאיות הקמת המתקן. הנוסחה לוקחת בחשבון את תפקודו את המיקרוגריד והחיסכון כתוצאה מהימנעות ממצבים בהם אין אספקת חשמל על מנת לחשב את התועלת מהאמינות. על פי המאמר, הערך הכלכלי של תועלת האמינות תלוי ב:

- מספר ומשך הפסקות החשמל
- היחס בין ההספק הפנימי לייצור הפנימי של המיקרוגריד לאחר הפסקת חשמל
- שווי האנרגיה שלא סופקה לצרכנים בתוך המיקרוגריד (תלויה גם בסוג הצרכן: ביתי/ מסחרי/ תעשייתי/ שירותי)
- האנרגיה המסופקת במצבי גירעון אנרגיה

הנוסחה מחשבת את התועלת הכלכלית השנתית של צרכנים מהגדלת האמינות באופן הבא:

נניח מצב של P תקופות, התועלת הכלכלית השנתית של הצרכנים (V_{ANDE}) הנובעת מהגדלת האמינות נתונה ע"י הנוסחה:

99

$$V_{ANDE} = \sum_P \lambda_{up}^P (r_{up}^P - P_M T_a) \times \frac{W^P}{T_P} \times (V - P)$$

בכל תקופה P:

λ_{up} : ערך ההפרעה של רשת המתח העליון

r_{up} : זמן שיקום ממוצע של רשת המתח העליון

W^P/T^P : כמות החשמל הממוצעת שיוצרה ע"י מיקרו גנרטורים בתקופה P

P_M : ההסתברות שהמיקרוגריד לא יצליח לבודד את עצמו בעת הצורך

T_a : הזמן הממוצע להפעיל מחדש מיקרוגריד לאחר ניתוק מוחלט

V: הערך הממוצע של ANDE (הימנעות מאנרגיה שלא מחולקת לצרכנים)

⁹⁹ מתוך: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4202248&tag=1>

P : תעריף האנרגיה המשולם ע"י הצרכנים כאשר המיקרוגרד מבודד

נוסחה נוספת אשר מוזכרת במאמר זה היא הנוסחה אשר מאפשרת לחשב את סך הפיצויים המגיעים לצרכנים בגין הפרעות באספקת החשמל. הנוסחה נועדה לעזור בעיקר בקביעת הרגולציה בנושא.

נוסחה המחשבת את הפיצוי לצרכנים בגין אי אספקת חשמל:

חישוב התשלומים שצריך לשלם ישירות לצרכנים כאשר סטנדרטים של אמינות לא מתקיימים:

(במידה ומקבלים ששני הערכים חריגים הקנס יהיה הגדול ביותר)

$$\begin{aligned} C_I &= (N_I - N_{ref}) \times FC \\ C_D &= (D_I - D_{ref}) \times P_C \times K_C \end{aligned} \quad (5)$$

C_I/C_D : הקנסות על ערכים חריגים בכמות ומשך ההפרעות

N_I/D_I : הערכים של כמות ומשך ההפרעות במהלך השנה

N_{ref}/D_{ref} : ערכי הייחוס של כמות ומשך ההפרעות

FC/K_C : ערכי הקנסות

P_C : ערך הסכום החשמל עם הלקוח

בעזרת שתי נוסחאות אלה, ניתן לחשב את התועלת הכלכלית הנובעת מהגברת האמינות, כאשר מן המתודולוגיה ניתן להסיק כי היא מושפעת מהחיסכון בעלויות הנובע משימוש במערכת המיקרוגרד ומחיסכון בהוצאות הנובעות כתוצאה מהפרעות באספקה. כמו כן, הנוסחה השנייה משמשת כעזר, בעיקר לצרכים רגולטוריים, על מנת לחשב את הפיצוי אשר מגיע לצרכנים במידה וישנן הפרעות באספקת החשמל הסדירה. פיצוי זה, הוא חלק מהפרמטרים שניתן לייחס להוצאות הנובעות מאי אספקה וניתן לחסוך אותן במידה ומשתמשים במערכת מיקרוגרד.

המצב הרגולטורי בישראל כיום

- החלטה מספר 6 מישיבה 109, מיום 26 ביוני, 2002 בעניין "רמת אמינות בבסיסי התעריפים":
 - א. בסיסי התעריפים נועדו להשגת רמת אמינות כוללת של 100 דקות אי אספקה לצרכן מתח נמוך.
 - ב. עד חודש פברואר 2003 תקבע רשות החשמל תכנית מחייבת להשגת היעד.
 - ג. על בסיס המערך התפעולי הקיים נדרשת החברה לצמצם את השונות בין רמות האמינות באזורים המנהליים השונים לבין הממוצע הכללי מ-100% ל-50%.
- רשות החשמל פרסמה את אמת המידה החדשה לפיצוי צרכנים ויצרנים בגין אמינות אספקה ירודה, הקובעת את התנאים בהם יפוצו לקוחות במקרים של הפסקות חשמל מעבר להיקף שנקבע. אמת המידה נכנסה לתוקף ביום ה-1 בינואר 2015.

אמת מידה פיצוי בגין נזקים למכשירי החשמל¹⁰⁰

זיכוי הצרכן ספק השירות החיוני יזכה את הצרכן בעבור כל נזק ממון ישיר שנגרם למכשיר כאשר קיים קשר סיבתי בין התקלה באספקת החשמל לבין הנזק שנגרם למכשיר. גובה הזיכוי שיעביר ספק השירות החיוני לצרכן בכל מקרה לא יעלה על שווי של מכשיר החשמל במועד שניזוק.

¹⁰⁰ מתוך : <https://pua.gov.il/Standards/Documents/48.pdf>

נספח 2: הגדלת הייצור המשקי באנרגיות מתחדשות

אנרגיה מתחדשת - אנרגיה שמקורה הבלעדי הוא אחד מאלה: שמש, רוח, מים, פסולת אורגנית, שפכים או תופעות טבע אחרות.¹⁰¹

עפ"י הגדרת כללי משק החשמל "מיתקן אנרגיה מתחדשת" – הוא כל אחד מאלה:¹⁰²

1. מיתקן ממקור אנרגיה מתחדשת שלצורך הפעלתו לא נדרש שימוש בדלק פוסילי.
2. מיתקן ממקור אנרגיה מתחדש שהמקור ליצירתה הוא שמש או פסולת, שלשם ייעול ותמיכה בהמרת אנרגיה ממקור האנרגיה לחשמל, רשאי להסתייע בדלק פוסילי בהיקף שאינו עולה על 15% מהייצור השנתי של החשמל, ובהיקף שלא יעלה על 25%, אם קבע המנהל כי קיימת תרומה מיוחדת לזמינות והפעלה יעילה יותר של מערכת החשמל הארצית, בכפוף למגבלות שיקבע המנהל לפי סוג טכנולוגיה, והיקף שעות הייצור בדלק פוסילי.
3. מיתקן אחר, בהספק שאינו עולה על 20 מגוואט, שהמנהל אישר כי מבחינת הפעלתו יש לראותו כמיתקן אנרגיה מתחדשת, לרבות ייצור חשמל נקי מחום או לחץ שיורי לאחר הליך ניצול דלק פוסילי עיקרי.

יתרונות השימוש באנרגיות מתחדשות

השימוש באנרגיות המתחדשות מביא עימו תועלות כלכליות וסביבתיות:

- חיסכון בהוצאות המערכת
- השפעות סביבתיות

תועלות אלה הינן תועלות אשר ניתן לקבל אותן גם ממיתקן המיקרוגריד.

1. חיסכון בהוצאות המערכת:

התמודדות עם העלייה במחירי הדלק – ככל שמקורות האנרגיה הנפוצים מצטמצמים, כך עולה מחירם של המקורות הללו דבר שמשפיע על התייקרות בתעשייה, בייצור מזון וכדומה.¹⁰³

מחקרים אשר נעשו בניו יורק מראים כי השימוש באנרגיות מתחדשות מצמצם את הוצאות המערכת ע"י החלפת תחנות כוח אשר הינן יקרות לתפעול, בעיקר בשל השימוש בדלקים. New York Independent System Operator (NY ISO) הראה כי הוספת GW 8 של אנרגיית רוח בניו יורק עד שנת 2018 תוביל לחיסכון של 1.3 מיליארד דולר לשנה עבור עלויות תפעול המתקן המהוות 65 דולר לכל צרכן. במחקר זה שמו לב כי ישנו צורך בהשקעה בתשתית החשמלית על מנת להסתנכרן עם כמות הייצור החדשה בעזרת האנרגיות המתחדשות. אך השקעה זאת היא נמוכה יותר ממחירי החשמל הנמכר ולכן גם לאחר השקעה זו יהיה רווח.¹⁰⁴

2. השפעות סביבתיות:

¹⁰¹ מתוך: <https://pua.gov.il/Standards/Documents/1.pdf>

¹⁰² מתוך: https://www.nevo.co.il/law_html/Law01/159_027.htm

¹⁰³ מתוך: <http://www.ecowave.org.il/אנרגיה-מתחדשת/>

¹⁰⁴ מתוך: <http://www.wri.org/blog/2014/06/shifting-renewable-energy-can-save-us-consumers-money>

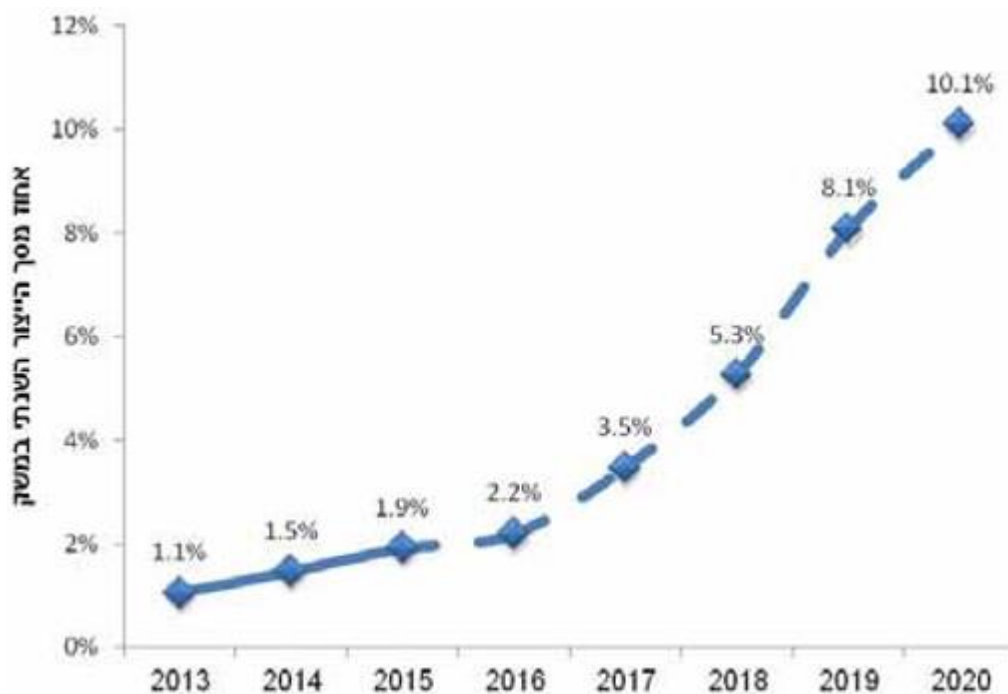
מקורות אנרגיה טבעיים ומתחדשים לרוב אינם פוגעים או פוגעים פחות בסביבה. כאשר לא נוצרים גזים רעילים או פחמן דו חמצני שנובעים משריפת דלקים, מופחת זיהום האוויר ומופחת אפקט החממה.

בתהליך ייצור החשמל נפלטות לאטמוספירה סוגים שונים של תוצרי לוואי משריפת דלק. העיקריים שבהם הינם: גופרית דו-חמצנית (SO₂), תחמוצות חנקן (NOX), חומר חלקיקי (PM) ופחמן דו-חמצני (CO₂). על פי המשרד להגנת הסביבה, משק החשמל בישראל הוא בין הגורמים העיקריים לזיהום אוויר מפליטת מזהמים הנוצרים משריפת דלק. תחנות הכוח בישראל פולטות כ-65% תחמוצות גופרית, 45% תחמוצות חנקן, 38% חלקיקים, ו-60% פחמן דו חמצני, מסך הפליטה השנתית של מזהמים אלה במדינת ישראל.

עפ"י דוח רשות החשמל לשנת 2016:

האנרגיות המתחדשות מהוות כ-2.6% מייצור האנרגיה בישראל, כאשר בשנים האחרונות התווספו למשק כ-900 מגוואט ממקורות אנרגיה מתחדשת. רשות החשמל ומשרד האנרגיה העריכו כי צפוי פער בעמידה ביעד של 10% בשנת 2020 וכתוצאה מכך, נוספו מכסות נוספות לייצור אנרגיה סולארית בשנים 2017-2018 הצפויות להבטיח עמידה ביעד. מבין המכסות שהגדירה הממשלה בתחום האנרגיה המתחדשת ניכר קושי במימוש אנרגית הרוח (בעיקר כתוצאה ממגבלות ביטחוניות וסביבתיות המעכבות את התכנון הסטטוטורי) וכן במימוש אנרגית ביוגז (כתוצאה מפוטנציאל נמוך למימוש תחום זה בישראל).

בגרף ¹⁰⁵ ניתן לראות כי עם השנים השימוש באנרגיות מתחדשות עולה וצפוי לעלות עוד במהלך השנים הבאות בהתאם ליעדי הממשלה.



גרף 5: שילוב אנרגיה מתחדשת מסך הייצור המשקי

¹⁰⁵ מתוך: https://pua.gov.il/publications/documents/meshek_atatus_2016.pdf

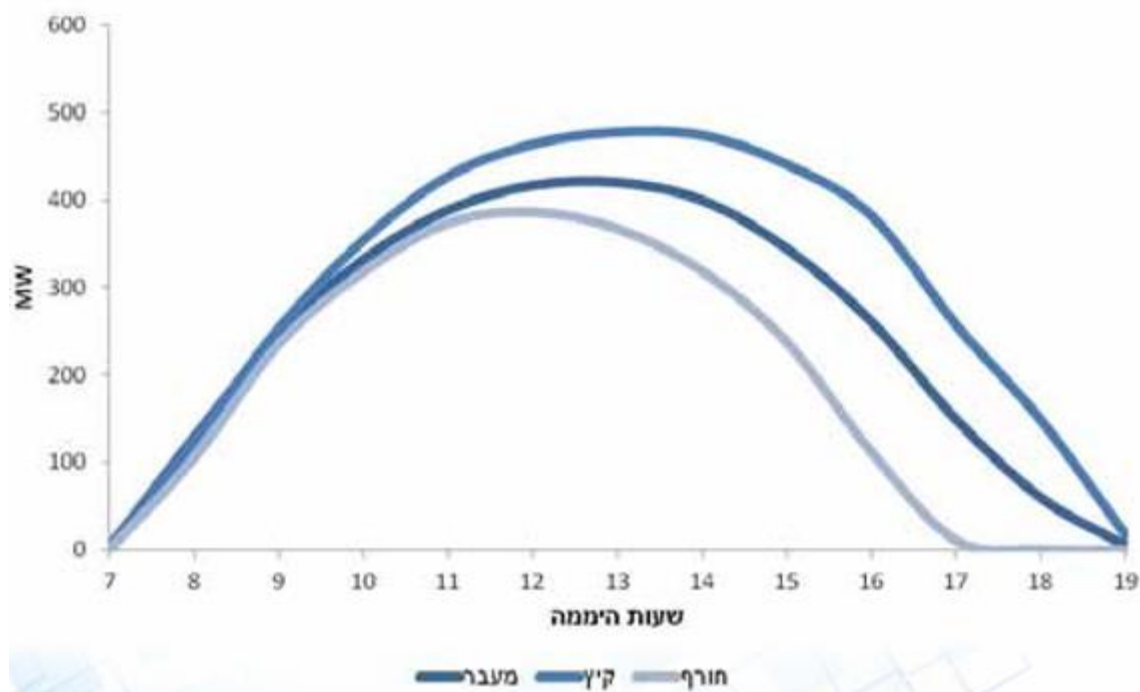
ניתן לראות כי הייצור בעזרת מתקני רוח ומתקנים סולאריים צפוי להוות חלק משמעותי של מעל 60% מסך הייצור באנרגיות מתחדשות.

טבלה 10: תחזית הייצור בתחום האנרגיות המתחדשות

שיעור מסה"כ ייצור אנרגיה	2020	2018-2019	2016-2017	דצמבר 2014	
30.04%	1.96	1.47	0.98	0.61	רוח (THW)
21.1%	1.38	1.05	0.66	0.33	ביומסה (THW)
34.87%	2.28	1.90	1.43	1.33	תרמו סולר או פוטו וולטאי גדול (THW)
9.1%	0.60	0.60	0.60	0.60	פוטו וולטאי בינוני (THW)
4.89%	0.32	0.32	0.32	0.32	פוטו וולטאי עד 50 קילוואט (THW)
100%	6.54	5.34	3.99	3.19	סה"כ ייצור אנרגיה בפועל (THW)

בחודשי הקיץ, האנרגיה הסולארית נותנת מענה גם בשעות אחר הצהריים, בהן הביקוש לחשמל גבוה.

כמו כן, בשעות הצהריים הייצור מאנרגיה מתחדשת מהווה כיום כ-4.5% מהייצור במשק. נתח זה צפוי לגדול באופן ניכר עם מימוש מכסות סולאריות נוספות.



גרף 6: השוואה עונתית של ייצור סולארי ממוצע

יתרונות מתקן המיקרוגריד בשילוב עם אנרגיות מתחדשות:

לשימוש באנרגיות מתחדשות כמקור אנרגיה עיקרי ישנו חיסרון עיקרי שהוא בעיית הזמינות התמידית של מקור האנרגיה המתחדש בשל תנאים טבעיים אשר אין ביכולתו של מפעיל המערכת לשלוט עליהם ובשל כך ישנה פגיעה באמינות אספקת החשמל. ביכולתה של מערכת המיקרוגריד להציע פתרון לבעיה זו בשל תכונת הניהול החכם שלה והשליטה על הביקושים, אפשרות האגירה ותפעול המערכת באופן יעיל יותר.

חסרונות השימוש באנרגיות מתחדשות:

זמינות חסר של מקור אנרגיה ראשוני (רוח, חום, קרינה) – אנרגיה מתחדשת עלולה להיות לא אמינה. הייצור באנרגיות מתחדשות מושפע רבות ממזג האוויר (רוח ושמש) ובמידה ותנאים אלה לא מתקיימים כנדרש עבור המערכת נוצרת בעיה לייצר אנרגיה. למשל, שימוש באנרגיה סולארית תלוי במחזוריות הטבע. מסיבה זו, הפקה של אנרגיה סולארית בימים מעוננים או גשומים ובשעות הלילה תהיה נמוכה משמעותית ביחס לימים שטופי שמש. עם זאת, ברבות מתחנות הכוח להפקת חשמל מאנרגיה סולארית ישנה טכנולוגיה ייחודית לאגירת קרני שמש או אפשרות להשתמש במקור אנרגיה נוסף לייצור חשמל.

דוגמא נוספת היא אנרגיית רוח אשר תלויה בחוזקה וכיוונה של הרוח.

מיצוי הפוטנציאל המלא של אנרגיה מתחדשת בישראל יתאפשר רק אם רכיב משמעותי בתוכה יכלול יכולת DISPATCH או אגירה אשר יאפשרו ניהול מושכל של היצע האנרגיה המתחדשת המיוצרת בהתאם לביקושים.¹⁰⁶

מערכת המיקרוגרید נותנת פתרון לאי הוודאות ולשינויים בתדירויות של האנרגיות המתחדשות בשל רגישותה לביקושים, להספק המיוצר ולאפשרות האגירה.

יתרונות מתקן המיקרוגרید :

1. ניהול חכם :

שילובן של אנרגיות מתחדשות באמצעות שימוש ברשת חכמה פירושו להיפרד מתפיסת ניהול הרשת המבוססת על הצורך להבטיח עומס בסיסי ולעבור לתפיסת ניהול רשת המבוססת על תמהיל גמיש ובר-שיגור של תחנות כוח מאנרגיה מתחדשת. ברשת חכמה, יכולים מספר ספקי אנרגיה גמישים לשלוט בניהול העומס במשך היום והלילה (לדוגמה ; שילוב של אנרגיה סולארית וגז טבעי, או אנרגיה גיאותרמית ורוח עם כלים של ניהול ביקוש) ללא הפסקות חשמל.

רשתות חכמות מאזנות את הביקוש באזור. רשת חשמל חכמה מחברת בין אנרגיה מתחדשת מבוזרת וקוגנרציה, ומפיצה את החשמל ביעילות גבוהה. סוגים מתקדמים של טכנולוגיות ניהול ובקרה לרשת החשמל יכולים גם הם לגרום לה לפעול ביתר יעילות. לדוגמה, מוני חשמל חכמים מראים את השימוש והעלויות בזמן אמת ומאפשרים לצרכני אנרגיה גדולים להפסיק או להוריד את צריכתם על-פי אות קשר ממפעיל הרשת ולהימנע ממחירי חשמל גבוהים.¹⁰⁷

תכונת הניהול החכם של המיקרוגרید מאפשרת לגנרטורים שונים להיות ממוקמים במקומות שונים ואותן מערכות מיקרוגרید יכולות להשתמש באנרגיה ממקורות שונים כגון : אנרגיה סולארית, אנרגיית רוח, אנרגיית הידרו ועוד, כתלות במיקומו של המיקרוגרید ופרופיל הצרכנים באותו אזור. בנוסף, על ידי ניהול חכם של מתקני אגירה, המתקנים יכולים להיות ממוקמים במקומות שונים, הניהול של חיי הסוללה יהיה יעיל יותר, יהיה שיפור ביעילות flywheels, בשאיבת המים והאחסון. הניהול החכם משפר את יעילות הייצור והאחסון וכמו כן מביא לרמה אופטימלית את גודלם של הגנרטורים ומתקני האגירה.¹⁰⁸

מערכת החשמל העתידית תכלול עשרות אלפי יחידות ייצור, כגון פאנלים סולאריים, טורבינות רוח וייצור מתחדש אחר, חלקן בתוך מערכת החלוקה וחלקן מרוכזות בתחנות כוח גדולות כמו פארקים רוח ימיים. תכנון מערכת החשמל יהפוך להיות מורכב יותר עקב מספרם הגדל של נכסי הייצור והנחת המשמעותי של ייצור חשמל בהספק משתנה שמוזרם לרשת החשמל. טכנולוגיית רשת חכמה הכרחית לצורך תמיכה בתכנון וניהול של מערכת החשמל. הדבר יתבצע על ידי תמיכה פעילה בתחזיות של יום-לפני ואיזון המערכת תוך סיפוק מידע בזמן אמת על מצב המערכת ויחידות הייצור בשילוב עם תחזיות מזג האוויר עדכניות. הטכנולוגיה גם תמלא תפקיד משמעותי בהבטחת יכולתן של מערכות לענות על ביקוש שיא ולהשתמש בצורה טובה יותר בנכסי הולכה וחלוקה וכך להשאיר את הצורך לבצע הרחבות של כושר הייצור במינימום האפשרי.

¹⁰⁶ מתוך : <http://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2013/07/%D7%93%D7%95%D7%97-%D7%95%D7%A2%D7%93%D7%AA-%D7%A7%D7%A0%D7%93%D7%9C.pdf>

¹⁰⁷ מתוך : http://www.greenpeace.org/israel/Global/israel/image/2013/03/energy%20revolution_isr.pdf

¹⁰⁸ מתוך : http://docs.circutor.com/docs/Cat_Renovables_EN.pdf

2. פתרון להשגת חדירה גבוהה של אנרגיה סולארית

על מנת להשיג חדירה גבוהה של אנרגיה סולארית לרשת, על האנרגיה הסולארית להיות נגישה לפי הצורך והכמות הדרושה. כל זאת, באופן שווה או טוב יותר מאשר אנרגיה ממקורות קונבנציונאליים. כמו כן, אזור יכולת ההפצה צריך להבטיח כי מתקני אנרגיה סולארית המבוססים על PV וטכנולוגיות המרכזות אנרגיה סולארית (CSP) מסוגלים להפיץ את האנרגיה הדרושה בצורה טובה יותר מאשר המתקנים הקונבנציונאליים.

לצד חדירת הכמות הגדולה של אנרגיה סולארית לרשת, הגבלתה של אנרגיה זו רק לשעות היום, ההקשר שלה לפעילות סירונית והתוצאות השונות גורמים ל-RAMPING דרסטי בשימוש בדרכי ייצור האנרגיה החלופיות אשר משתמשות בדלקים כגון גז טבעי, הידרו ועוד על מנת להתאים את סך האנרגיה המיוצרת לביקוש. הדרישות ל-RAMPING בביקושים לייצור קונבנציונאלי עלולות להיות מורכבות ויקרות. כמו כן, ישנם אתגרים הנובעים מתפעול המערכת כגון הגדרה נכונה של רמות ההפצה עבור כלל הייצור הקונבנציונאלי. כיוון שמקור אנרגיה סולארי והאנרגיה אשר יוצאת ממנו צריכים להיות חזויים מראש ואינם יכולים להיות מתוכננים בצורה וודאית, ישנה אי וודאות לגבי תזמון ה-RAMPING. השפעה נוספת של שימוש נרחב באנרגיה סולארית היא ערך קיבולת האנרגיה הסולארית. על מנת להגביר את הימצאותה של האנרגיה הסולארית ברשת בצורה יעילה, חסכונית ובמינימום קיצוץ באנרגיה הסולארית, זה קריטי שייצור באנרגיה סולארית יהיה זמין במשך כל שעות היממה.

האתגרים ביכולות ההפצה עבור שימוש רחב באנרגיה סולארית:

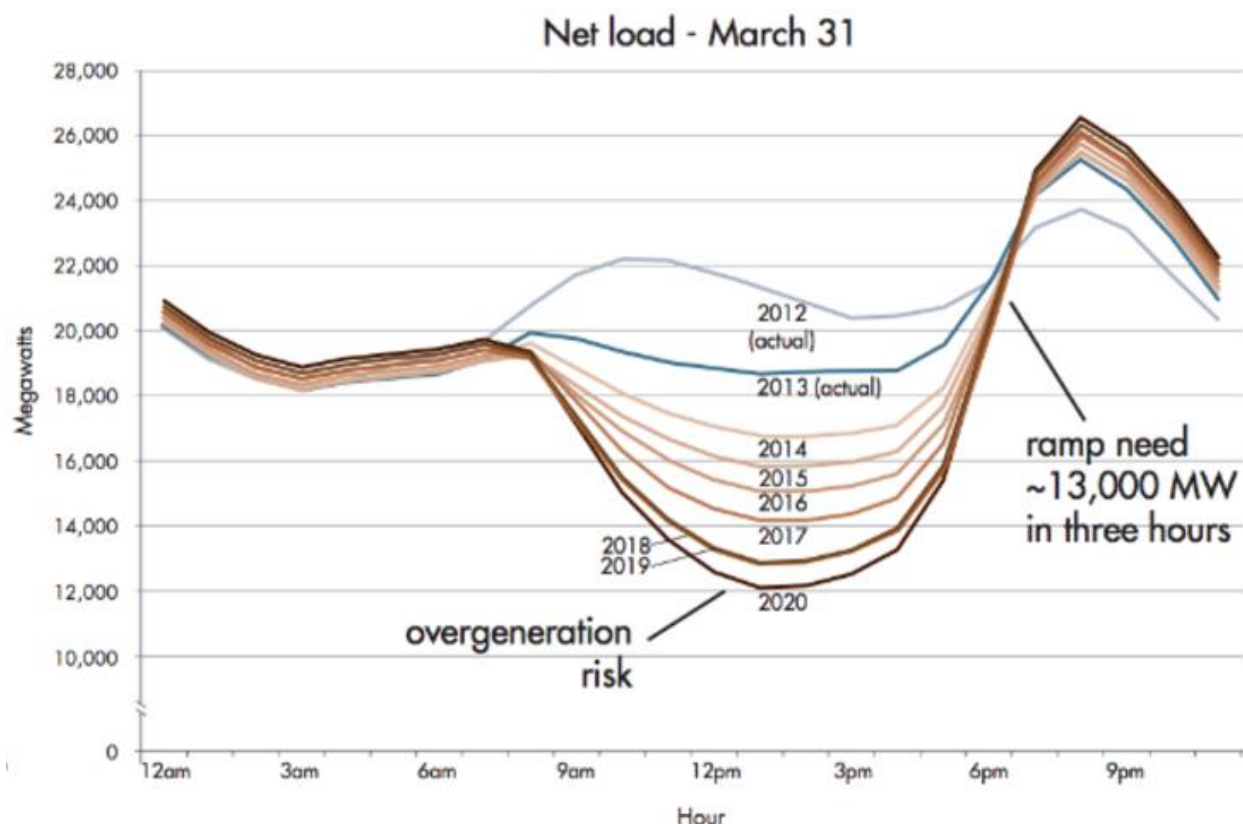
- תפעול הרשת- כימות ההשפעה של יכולת הפצת האנרגיה הסולארית על RAMPING בייצור הקונבנציונאלי, הולכה וקיצוצים בייצור.
- אמינות הרשת- קביעת ההשפעה על רזרבות, גמישות בייצור והתאמה בקודים הרשתיים.
- תפעול מתקנים סולאריים- דרישה לרמות אופטימליות של תפעול ברמה המקומית, האזורית והגלובלית.
- אופטימיזציה של האנרגיה הסולארית- בחירת הפרמטרים לאופטימיזציה עבור קצב זמן, רמות RAMPING, תכונות הרשת והגדרת ההשפעה והערך עבור רגולטורים ומתקני רשת.¹⁰⁹

לדוגמא:

בגרף 7¹¹⁰ ניתן לראות את השלב בו ישנו צורך ב-RAMPING.

¹⁰⁹ מתוך: <https://energy.gov/eere/sunshot/dispatchability>

¹¹⁰ מתוך: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/renewable-energy-intermittency-explained-challenges-solutions-and-opportunities/>



גרף 7: צפי אפקט הגידול בייצור באנרגיה סולארית (עפ"י נתוני מפעיל רשת החשמל בקליפורניה)

שטחה של מדינת ישראל הוא רצועה צרה מאוד הנמתחת מצפון ועד דרום ולכן ישנה השפעה גדולה יותר של RAMPING שכן השינויים מתרחשים כמעט בבת אחת בכל הארץ, זאת בשונה ממצב של מדינה ששטחה מתוח ממזרח עד מערב ששם שינויים קורים בקצב איטי יותר והשפעתם אינם על כלל שטחה של המדינה.

יצוין שביחס למדינות אחרות כמו ארה"ב, שבהן נושא האמינות האספקה וגידול באנרגיות אי-רציפות (אתגר ה-RAMPING) מהוות מוטיבציה מרכזית לפיתוח מיקרוגרید בארה"ב. התועלת מכך הוא פחות בחשיבותו בישראל. לפיכך, העובדה ששיטות לכימות תועלות המשאבים שיכולים לספק את הגמישות הנדרשת ל-RAMPING ולמיתון השפעות "עקומת הברווז" בגרף ה-LOAD NET לעיל אינה עלולה להשפיע מהותית על כימות התועלות של המיקרוגרید בישראל. בתיאור שיטה מוצעת לכימות התועלות האלה בישראל, התועלות האלה אינן נלקחות בחשבון.

3. טעינת רכבים חשמליים

תועלת נוספת היא טעינה מנוהלת של רכבים חשמליים: רשת חכמה למערכת תחבורה המבוססת על רכב חשמלי רשת חכמה, בגישה שפותחה ע"י חברת בטר פלייס, מאפשרת טעינת רכבים חשמליים גם בשיטה מנוהלת. קיימות שתי אסטרטגיות לטעינת רכבים חשמליים: בלתי-מנוהלת (unmanaged) טעינת הרכב מתבצעת ללא קשר למחיר/תעריף החשמל, אילוצי תשתית מקומית וארצית, וכדומה; מנוהלת (managed) מאפשרת ניהול טעינה לשביעות רצון הלקוח מתוך שיקולים של עומס על הרשת, ניצול אנרגיות מתחדשות בהיותן זמינות, וכדומה. החברה יצרה אפליקציה לניהול אנרגיה

לטעינת רכבים חשמליים. באסטרטגית ניהול הטעינה ניתן לחסוך 12% מעלות החשמל וכפועל יוצא - להתחשב באילוצי תשתית ובזמינות של אנרגיות מתחדשות.¹¹¹

כימות התועלות המערכתיות של המיקרו-גריד בהטמעת אנרגיות מתחדשות

מטרת כימות תועלת המיקרוגריד הינה להעריך את התרומה הסביבתית לפריסת מיקרוגרידים שונים על הפחתת פליטות גזי חממה וזיהום אוויר, כאשר הניתוחים האלה יתבססו על שיטות כימות מקובלות בספרות מחו"ל ויתואמו לנסיבות המשק הישראלי.

התועלת הסביבתית העיקרית הינה היכולת להשתמש בייצור מקומי והחוסר השיורי הנובע ממנו כדי להחליף ייצור מאובן, ובעיקר ייצור מתחנות כוח פחמיות. אותו המיקרו-גריד יכול להשתמש באנרגיה המיוצרת תוך ייצור חשמל לצורכי חימום וקירור מבנים, חימום מים, ואפילו קירור באמצעות צילרי ספיגה. הגברת כוח הצרכן בבחירת טכנולוגיות מבוזרות הכלולות במיקרו-גריד עשויה להוריד את התלות בדלקים מאובנים, לספק את הגמישות הנדרשת כדי לתת מענה לאי-רציפות של אנרגיות רוח ושמשי, והורדת גזי חממה^{112,113,114}. בכל אופן, כימות ערכי התועלות הסביבתיות של המיקרו-גריד חייבת לקחת בחשבון את הקצב המתמשך בירידות בעלויות הטכנולוגיות, מאנרגיה מתחדשת ועד אגירה ותשתית חלוקה מתקדמת. כמו כן, יש לכלול גם כן את הקלת הגישה של משאבים חלופיים כולל ניהול ביקוש, אגירה, ומתחדשות שעשויה להשתקף בהורדת עלויות מימון המשאבים האלה. יש לכלול את יצירת המחזור ההטבה (VIRTUOUS CYCLE) הזה בתועלות הסביבתיות של הטמעת המיקרו-גרידים.

בדרך כלל, הצעד הראשון בהערכת תועלות הסביבתיות הינה הערכת התרומה להורדת גזי החממה. בישראל, רשות החשמל ומשרדים ממשלתיים משתמשים בהנחות של משרד הגנת הסביבה, שהן מבוססות על נתוני הארגון האירופי EXTERNE. נתוני EXTERNE הינם הנתונים מיוון המפנימים בתוכם את העלויות החיצוניות של הפליטות. הנתונים נלקחו מיוון מכמה סיבות: (1) התוצרת הלאומי הגולמי (להלן, "תל"ג") דומה לתל"ג בישראל; (2) מאפיינים אקלימיים; ו-(3) מאפיינים דמוגרפיים (צפיפות ופזור אוכלוסין), שהם הגורמים להערכת נזקים בריאותיים הנגרים מהזיהום. ל-EXTERNE יש מאגר מידע עם כל העלויות החיצוניות של מזהמים שונים, וניתן להשוות את ישראל לכל מדינה עבור CO₂, NOX, חלקיקים (PM), ו-SO₂. העלויות כוללות נזק סביבתי, בריאותי, וכמה אפשר לחסוך אם נמנעים מהפליטות האלה.¹¹⁵

להלן נתוני EXTERNE כפי שהם מקבלים ביטוי בתעריפים הנקבעים על-ידי רשות החשמל.¹¹⁶

¹¹¹ מתוך: <http://www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1&LNGID=2&GID=2765>

¹¹² <https://certs.lbl.gov/initiatives/certs-microgrid-concept>

¹¹³ http://www.energy.ca.gov/research/epic/documents/2016-09-06_workshop/presentations/02%20California%20ISO%20Microgrid%20Roadmap.pdf

¹¹⁴ Ibid.

¹¹⁵ www.neaman.org.il

¹¹⁶ <https://pua.gov.il/Rates/Documents/Hoveret010117.pdf>

טבלה 11: עלות זיהום בדולר לטון מזהם

לוח 1-11.2: עלות זיהום בדולר לטון מזהם

סוג	דולר לטון מזהם	סנט לגרם
חלקיקים	9,500	0.95
תחמוצות חנקן	2,400	0.24
תחמוצות גופרית	3,190	0.319
פחמן דו חמצני	7	0.0007

טבלה 12: פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות

לוח 2-11.2: פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות באגורות לקווי"ש

P_p = רמת פליטת חלקיקים ביחידות גרם/קווי"ש
 P_N = רמת פליטת תחמוצות חנקן ביחידות גרם/קווי"ש
 P_S = רמת פליטת תחמוצות גופרית ביחידות גרם/קווי"ש
 P_C = רמת פחמן דו חמצני למעט פחמן נייטרלי ("carbon neutral") ביחידות גרם/קווי"ש

		פרמיה (אגורות לקווי"ש)				
עונה חורף	מש"ב	חלקיקים	תחמוצות חנקן	תחמוצות גופרית	פחמן דו חמצני (למעט carbon neutral)	סה"כ (100% מהפרמיה)
שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
גבע	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
פסגה	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	

אולם, מודגש שבחול"ל, נתוני ה-EXTERNE נחשבים כמיושנים, ויש להשתמש בנתונים של ה-NEEDS PROJECT¹¹⁷. לכן, בנייתו של מודגש גם בהנחות של משרד הגנת הסביבה, בנתוני ה-NEEDS PROJECT, ובמחירי הפליטות הסחירות. השיטה הזאת גם תואם לגישה של מדינות אחרות בחול"ל, שמשתמשות גם במחירי שוק לפחם וגם בעלויות נמנעות לפחם המומלצות על-ידי יועצים וצוותים המקצועיים של הרגולטור ו/או משרדי הממשלה (שאמורות לשקף את המחיר ארוכת-הטווח של גזי החממה). יצוין שגם EXTERNE וגם NEEDS PROJECT אומדים כמה נזקים כולל: נזק לבריאות; אובדן גיוון ביולוגי; נזק ליבול חקלאי, ונזק לחומרים גולמיים לתעשייה.

¹¹⁷http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1a%20D6_1%20External%20costs%20of%20reference%20technologies%2024032009.pdf

שיטות הכימות של EXTERNE וה-NEEDS PROJECT כוללות הערכות לערך הממוצע של חיי בני-אדם, מבוסס על כוח ההרווחה שלו על פני משך חייו. התועלות גם כן כוללות את עלויות הרפואיות בתי חולים, תרופות, ביקורים רפואיים, וכדומה). בהערכת תועלות הסביבתיות, יש גם לקחת בחשבון את הקשר הישיר המוכח בין יישום המיקרו-גריד לאיכות האוויר והתאורה, והשיפור ביכולת הקוגניטיבית והייעול התפעולי הנובעים ממנו. בכל אופן, יש לקחת בחשבון שמימוש התועלות האלה אמור להתרחש רק כמה שנים לאחר היישום הראשוני¹¹⁸.

אחד מהיתרונות של שיטת ה-NEEDS PROJECT הינו שיטות ההיוון ושיקולי שוויון (EQUITY WEIGHTING). לעומת השיטות ההיוון ה"מסורתיות" שמשקפות רק עדיפויות להחלפות צריכה בין-זמנים, ה-NEEDS PROJECT גם כולל מרכיבים של עדיפויות בלקיחת סיכון והתועלת השולית לצריכה. לפיכך, שיעורי ההיוון נוטים להיות גבוהים משיעורי ההיוון חברתיים מקובלים אחרים. למשל, ה-NEEDS PROJECT הינם בטווח של 4.5-5.5%, לעומת 2.5-3.5% במחקרים אחרים.

שיקולי שוויון משקפים את העובדה שמפני שהתועלת השולית לצריכה שונה כפונקציה, בין היתר, של הון הצרכן, יש לשקל את הנזק הסביבתי בהתאם לאי-יכולתו של הצרכן העני להימנע מהנזק הזה (שערך הנזק הזה ביחס להון שלו גבוה) כלומר, שיטת ה-NEEDS PROJECT מאפשרת מידול גורם ממשלתי שדואג לסילוק אי-השוויון הזה ועלות מדיניות הסילוק. יצוין שה-EQUITY WEIGHTING גורם לטווח מאוד רחב, ואפילו צוות ה-NEEDS PROJECT ממליץ על זהירות רבה בשימוש בתוצאות האלה. בכל אופן, לצורך עבודה בעתיד, יש לעקוב אחרי פיתוח השיטה הזאת, כדי לאמוד את הנזק הסביבתי והחברתי מהמשך תרחיש "עסקים כרגיל"¹¹⁹.

בטבלה 13, ניתן להשוות סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות:

טבלה 13: סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות.

מקור	סוג פליטה	עלות לטון (דולר ארה"ב)	מתודולוגיה	שימוש
EXTERNE	פחם	7	ניתוח תשואה/תפוקה	משרדי ממשלה בישראל כולל רשות החשמל בתעריפים
NEEDS PROJECT	פחם	7	אמידת עלות חברתית – GENERAL EQUILIBRIUM	משרדי ממשלה באירופה
NEEDS PROJECT	פחם	32	עלות מניעת נזקי פחם שולית (MARGINAL ABATEMENT COST)	משרדי ממשלה באירופה

¹¹⁸ http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1a%20D6_1%20External%20costs%20of%20reference%20technologies%2024032009.pdf

¹¹⁹ <http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1b%20D5.4-5.5.pdf>

מחירי CAP AND TRADE	פחם	13	מחירי שוק	עלות נמנעת – תכנון של CPUC שימועים על אנרגיה מבוזרת.
דו"ח קנדל ¹²⁰	פחם	14		עלות קנדל בפועל
דו"ח קנדל	פחם	35	עלות הנזק לפי בקר	נתון למשרד להגנת הסביבה
אומדן חברת איסקון	פחם	22		
חברת ייעוץ SYNAPSE	פחם	25	אמידת עלות חברתית	עלות נמנעת – תכנון של הרגולטור בקליפורניה CPUC
EXTERNE	NOX	2400	אמידת עלות חברתית	משרדי ממשלה בישראל כולל רשות החשמל בתעריפים
NEEDS PROJECT	NOX	8581	אמידת עלות חברתית – GENERAL EQUILIBRIUM	משרדי ממשלה באירופה
EXTERNE	SOX	3190	אמידת עלות חברתית	משרדי ממשלה בישראל כולל רשות החשמל בתעריפים

עוד יצוין שיש לאמוד את כמויות הפליטות הנמנעות הקשורות לכל מרכיב של המיקרו-גרید. במסגרת עבודת על קידום ייצור חשמל מבוזר, צוות ה-ENERGY DIVISION בקליפורניה העריך את ההשפעה הזאת כדלהלן¹²¹:

טבלה 14: פליטות נמנעות הקשורות לרכיבי מיקרו-גרید

טכנולוגיה	ירידה בפליטות CO2 (טון למוט"ש)	ירידה ב- NOX (גרם למוט"ש)
ניהול ביקושים	0.32	60
אגירת אנרגיה (60% גז טבעי)	0.28	60
אגירת אנרגיה (100% גז טבעי)	0.10	55
מתחדשות מבוזרות. /התייעלות אנרגטית	0.62	90

מוצע שלתרחיש בסיס, נשתמש בהנחות כדלהלן:

¹²⁰ <http://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2013/07/%D7%93%D7%95%D7%97-%D7%95%D7%A2%D7%93%D7%AA-%D7%A7%D7%A0%D7%93%D7%9C.pdf>

¹²¹ <http://www.cleaneogroup.org/wp-content/uploads/RPP-webinar-slides-11.2.16.pdf>

- שימוש בעלויות נורמטיביות נמנעות הכרוכות בעמידת מתקנים מרכזיים מאובנים ביעדים סביבתיים¹²²;
- 20 דולר לטון כתוספת GHG (עלות חברתית לפחם);
- תרחיש לגבי עלויות פליטות, שיעורי היוון, וכמות החשמל המאובן הנמנעת (ראה להלן).

עוד יצוין שקיימת מעגליות בין מחיר לפחם לבין ההשקעה במיקרו-גריד. כלומר, בדיקת ההשפעה של כל מגהוואט נוסף למיקרו-גריד (בהינתן עלות פחם מסוימת) חייבת לקחת בחשבון שהספק המיקרו-גריד הכדאי אמור להשתנות כפונקציה של מחיר הפחם¹²³.

¹²² [http://www.wisconsin.gov/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20\(10.10.14\).pdf](http://www.wisconsin.gov/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20(10.10.14).pdf)

¹²³ <http://escholarship.org/uc/item/8rc8k33w>

נספח 3: חיטכון בהשקעות תשתית ברשת ההולכה והחלוקה (ליאור אבן-חן)

מקטע התשתית – הולכה וחלוקה

מערכת ההולכה (Transmission Grid) הינה מערכת של קווי מתח עליון ועל-עליון שתפקידה להעביר את החשמל המיוצר בתחנות הכוח לאזורי הצריכה המרכזיים באופן יעיל ככל האפשר מבחינת הפסדי מתח בדרך. מערכת ההולכה מסתיימת בתחנות השנאה (תחמ"ש) אשר מורידות את המתח עליון למתח גבוה. מערכת החלוקה (Distribution Grid) הינה מערכת של קווי מתח גבוה ונמוך שתפקידה להעביר את החשמל מהתחמ"ש ועד לצרכני הקצה. המערכת בנויה באופן היררכי, כאשר המתח החשמלי מורד בהדרגה עד לרמה המתאימה לצריכה של כל צרכן בהתאם למאפייניו.¹²⁴

רשת ההולכה הינה מונופול טבעי. בשל עלות ההקמה הגבוהה של הרשת, צרכי הקרקע שלה, ואילוצים בטיחותיים ותפעוליים, אין בנמצא משקים שבהם שתי רשתות הולכה נפרדות הנפרשות על אותה יחידת שטח. בהתאם, זוהי מערכת המשרתת את כלל היצרנים והצרכנים ברשת, ועל כן רמת התפקוד שלה חיונית לאספקת החשמל התקינה ברשת.

בישראל רובו ככולו של מקטע החלוקה (Distribution Grid) מנוהל כמונופול אזורי על ידי שני בעלי רישיונות חלוקה כל אחד בתחומי הגיאוגרפי: חברת החשמל לישראל, וחברת החשמל מחוז ירושלים (חמ"י). בנוסף, כיום מבוצעת פעילות רכישת חשמל מחמ"י רכישה מרוכזת לצורך מכירה לצרכני קצה על ידי גורמים פרטיים (רשתות חלוקה עצמאיות של מחלקים היסטוריים – לרוב קיבוצים או בעלי נכסים מסחריים הקונים במרוכז את החשמל ומחלקים אותו לדיירי המשנה). כמו כן, בשל נסיבות – היסטוריות בחלק משטח הזיכיון של חמ"י במזרח ירושלים ובאיו"ש ישנה פריסת תשתית קווי חלוקה כפולה. באזור זה פרוסות שתי רשתות חלוקה כאשר האחת מזינה את צרכני חמ"י והשנייה מזינה את צרכני חמ"י למרות קרבתם הגיאוגרפית אחד לשני.¹²⁵

השקעות חמ"י ברשתות ההולכה והחלוקה:

על פי דו"ח רשות החשמל לשנת 2015: היקף ההשקעות השנתי של חברת החשמל בכל המקטעים, השתנה בשנים האחרונות בהתאם להחלטת הממשלה הקובעת שהחברה לא תקים תחנות חדשות. במקטע ההולכה היקף ההשקעות הוא יציב על כ-650 מליון ₪ בשנה. במקטע החלוקה נצפית בשנים האחרונות הפחתה בהשקעות, כך היקף ההשקעה בשנתיים האחרונות עמד על כ-900 מליון ₪ בשנה.¹²⁶

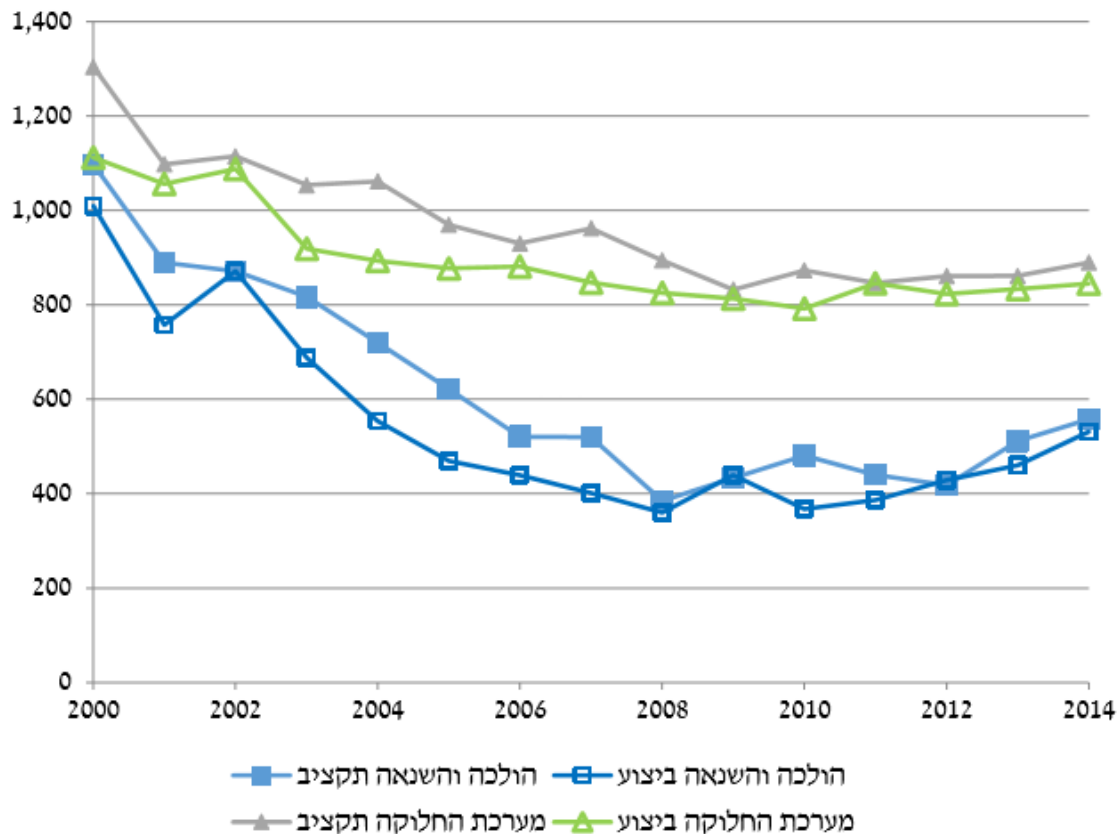
על פי דו"ח רשות החשמל לשנת 2016 ניתן לראות כי ההשקעות במקטעי הרשת לא גדלו כפי שנדרש היה בהתאם לתוכנית הפיתוח שאושרה. לאור זאת, הודיעה הרשות כי בכוונתה להסדיר את אופן הבקרה על ההשקעות בתוכנית הפיתוח במסגרת הרפורמה בתעריפי הרשת (ראה להלן).

¹²⁴ מתוך: <https://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/TransmissionGrid.pdf>
¹²⁵ מתוך: [http://energy.gov.il/AboutTheOffice/SpeakerMessages/Documents/דו"ח+יגב+20032014+-+נגזי.pdf](http://energy.gov.il/AboutTheOffice/SpeakerMessages/Documents/דו)
¹²⁶ מתוך: https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/doch_reslut_2015.pdf



בשנים האחרונות פחתו השקעות חברת החשמל ברשת ההולכה והחלוקה. ניתן לראות בגרף 1289 ירידה מתמשכת בהשקעה המגיעה עד לכ-50% מההשקעה בתחילת שנות האלפיים, כאשר העלייה היחסית בשנים 2010-2014, בעיקר ברשת ההולכה וההשנאה, נובעת מדרישה חריפה של משרד האנרגיה להגדיל את ההשקעה במקטעים אלו. למגמה של ירידה בהשקעות ישנה השפעה ישירה על אמינות מערכת החשמל.

מתוך: <http://energy.gov.il/abouttheoffice/speakermessages/documents/ברת%20החשמל%20באירועי%20הפסקות%20החשמל%20באוקטובר2015.pdf>



גרף 9: נתוני תקציב מול ביצוע השקעות במקטעי התשתית לשנים 2000-2015

בהתאם לתוכנית הפיתוח של חברת החשמל, מותאמים היקפי הפרויקטים לתוכנית הצרכים, עם התאמה של מועדי הפרויקטים העיקריים לתכנית המתואמת (הריאלית). בשנים 2021-2017 מתכננת חברת החשמל להוסיף למערכת ההולכה במתח עליון (400 ק"ו) כ- 164 ק"מ מעגל אשר מותנה בסיום הליכים סטטוטוריים לאישור הקווים. למועד הדוח, עומדת חברת החשמל בלוח הזמנים שנקבע בתוכנית הפיתוח. בשנים 2012-2017 מתכננת החברה להוסיף כ- 5.507 ק"מ מעגל עילי למערכת ההולכה במתח עליון (161 ק"ו) ובנוסף ישודרגו או יוקמו מחדש או יועתקו כ- 791 ק"מ מעגל וכן מתוכננים להיווסף כ- 5.80 ק"מ מעגלי כבלים תת קרקעיים.¹²⁹

מבנה תעריף הרשת – מבוסס על השימוע מאוגוסט 2017:¹³⁰

בסיס התעריף החדש שצפוי להיכנס לתוקף בתחילת שנת 2018 נותן מענה לשינויים שהתרחשו במהלך השנים בדגש על מבנה העלויות של חח"י ועל כניסתם לשוק של יצרנים ומספקים פרטיים, באמצעות שינוי מבנה התעריף, בפרט על ידי הוספת רכיב קבוע כמו גם פיצול תעריף הצרכנות למרכיב חלוקה ולמרכיב אספקה.

¹²⁹ מתוך: <https://www.iec.co.il/investors/Documents/year2016.pdf>
¹³⁰ מתוך: https://pua.gov.il/hearings/documents/male_bsis_tariff.pdf

מבנה התעריף, מגדיר את ייחוס העלויות בין המקטעים ברשת כמו גם שני רכיבי תעריף:

1. רכיב אנרגיה - גבייה לפי צריכה הנמדדת בקוטר"ש

2. רכיב קבוע - גבייה לפי גודל חיבור

מבנה זה תואם את מבנה העלויות ברשת, הכוללות הן עלויות קבועות והן עלויות משתנות, ועקבי עם השינויים במבנה התעריף במשקי חשמל שונים בעולם. בנוסף, החברה גובה תעריף קבוע לשירותי הצרכנות.

הקצאת העלות המוכרת במקטעי ההולכה והחלוקה לסוגי השירות יעודכנו עפ"י טבלה 15:

טבלה 15: עלויות מוכרות במקטעי ההולכה והחלוקה

מקטע	סוגי השירות	שיעור השירות מהמקטע
עלויות מקטע ההולכה	חיבור תח"כ (משויך לרכיב ייצור)	5%
	קווי מתח עליון ועל ותחמ"גים	45%
	השנאה ממתח עליון למתח גבוה (תחמ"ש)	50%
	סה"כ עלות מוכרת למקטע הולכה	100%
עלויות מקטע החלוקה	קווי מתח גבוה	50%
	השנאה ממתח גבוה למתח נמוך (תחט"ר)	25%
	קווי מתח נמוך	25%
	סה"כ עלות מוכרת למקטע החלוקה	100%

משך חיי הנכסים¹³¹

רשות החשמל ביצעה סקירה השוואתית למשך חיי הנכסים ברשתות ההולכה והחלוקה. סקירה זו נשענה, בין היתר, על החלטות רגולטוריות ברחבי העולם ומשך חיי הנכסים ברחבי העולם.

מקובל לראות ברשת שהיא בגיל של 30 שנה או יותר, כפוטנציאלית להחלפה. רשת בגיל של 45 שנים ויותר, מיצתה את אורך החיים הפיזי שלה, ועל כן יש להחליפה. לצורך ההחלפה, נדרשת השקעה בהיקף נרחב בעשור הקרוב, לצורך חידוש רשתות חלוקה מתח גבוה ומתח נמוך. השקעה זו צפויה לשפר את רמת אמינות האספקה במשק.

¹³¹ מתוך: https://pua.gov.il/hearings/documents/male_bsis_tariff.pdf

לאור זאת, קבעה רשות החשמל¹³² כי משך חיי הנכסים ברשתות ההולכה והחלוקה יהיה 45 שנה. כאשר, בין השנים 2018-2020 יוכר משך חיים של 35 שנה בלבד לנכסים שיעלו בתקופה זו על מנת לשמור על יציבותה הפיננסית של חברת החשמל. כמו כן, הנכסים הפעילים הקיימים הוחרגו ממשך חיים זה ויוכר להם משך חיים של 30 שנה.

טבלה 16: גיל רשת חשמל עילית ותת קרקעית בישראל

רשת מתח גבוה			רשת מתח נמוך				
עילית			תת קרקעית				
גיל הרשת	אורך רשת (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאל לית לחידוש (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאל לית לחידוש (%)	אורך רשת (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאל לית לחידוש (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאל לית לחידוש (%)	אורך רשת פוטנציאל לית לחידוש (%)
30 שנה ויותר	11,070	6,640	59.98%	1,100	1,050	95.45%	95.15%
45 שנה ויותר	7,010	4,210	60.05%	220	210	95.45%	95.14%
50 שנה ויותר	5,580	3,350	60.03%	130	120	92.30%	95.06%

טבלה 17: עלויות עבודות תשתית רשת

רשת	תחום	עבודות תשתית רשת	מלש"ח	יחידה
הולכה	קווי 400	הקמת קו מתח עליון 400 ק"ו – חד מעגלי	בקרת עלויות	ק"מ
הולכה	קווי 400	הקמת קו מתח עליון 400 ק"ו – דו מעגלי	בקרת עלויות	ק"מ
הולכה	קווי 400	UPRATING	בקרת עלויות	ק"מ
הולכה	קווי 400	תחנות מיתוג	בקרת עלויות	MVA
הולכה	קווי 161	הקמת קו מתח עליון 161 ק"ו – חד מעגלי	2.06	ק"מ
הולכה	קווי 161	הקמת קו מתח עליון 161 ק"ו – דו מעגלי	3.5	ק"מ
הולכה	קווי 161	UPRATING קו 161 ק"ו דו מעגלי	2.8	ק"מ
הולכה	קווי 161	העתקת קו 161 ק"ו דו מעגלי	3.33	ק"מ

¹³² מתוך: https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/doch_reshut_2015.pdf

הולכה	קווי 161	החלפת תיילים 161 ק"ו דו מעגלי	2.3	ק"מ
הולכה	קווי 161	הקמת קו מתח עליון 161 ק"ו מוטמן	14.72	ק"מ
הולכה	תחמ"ש	תחנת משנה סגורה	בקרת עלויות	לתחמ"ש
הולכה	תחמ"ש	תחנת משנה פתוחה (ללא קרקע)	55	לתחמ"ש
הולכה	תחמ"ש	הוספת שנאי 45 MVA כולל מפסקים	7	לשנאי
הולכה	תחמ"ש	סעיף קרקע A – כפרי מרוחק	0.15	דונם
הולכה	תחמ"ש	סעיף קרקע B – כפרי מרכז (בין חדרה לגדרה)	0.3	דונם
הולכה	תחמ"ש	סעיף קרקע C – אזור עירוני	0.75	דונם
הולכה	תחמ"ש	סעיף קרקע D – מטרופולין	1.5	דונם
הולכה	ניטור	יחידת קצה לניטור איכות חשמל ברשת הארצית	0.02	ליחידה
הולכה	סוללות קבלים	מתח עליון	בקרת עלויות	
חלוקה	סוללות קבלים	מתח גבוה	0.06	MVAR
חלוקה	פיתוח	עלות ק"מ קו מ"ג מוטמן	0.7	ק"מ
חלוקה	פיתוח	עלות ק"מ קו מ"ג עילי חד מעגלי	0.44	ק"מ
חלוקה	פיתוח	עלות ק"מ קו מ"ג עילי דו מעגלי	0.61	ק"מ
חלוקה	פיתוח	עלות ק"מ קו מ"ג תת קרקעי	0.41	ק"מ
חלוקה	פיתוח	עלות ק"מ קו מ"ג עילי	0.38	ק"מ
חלוקה	פיתוח	תחט"ר – 400 קו"א	0.2	MVA
חלוקה	פיתוח	תחט"ר - 630 קו"א 13/22 ק"ו – פנימי	0.74	MVA
חלוקה	פיתוח	תחט"ר – 630 קו"א 33 ק"ו - פנימי	0.14	MVA
חלוקה	חידוש	תחט"ר – 400 קו"א	0.16	MVA
חלוקה	חידוש	תחט"ר – 630 קו"א 13/22 ק"ו – פנימי	0.59	MVA
חלוקה	חידוש	תחט"ר – 630 קו"א 33 ק"ו - פנימי	0.91	MVA
חלוקה	חידוש	עלות ק"מ קו מ"ג מוטמן	0.95	ק"מ
חלוקה	חידוש	עלות ק"מ קו מ"ג עילי חד מעגלי	0.59	ק"מ
חלוקה	חידוש	עלות ק"מ קו מ"ג עילי דו מעגלי	0.82	ק"מ

חלוקה	חידוש	עלות ק"מ קו מ"מ תת קרקעי	0.55	ק"מ
חלוקה	חידוש	עלות ק"מ קו מ"מ עילי	0.51	ק"מ

תרומת המיקרוגרید לחיסכון בהשקעות הון ברשת ההולכה והחלוקה (ובמערך ההשנאה)

למערכת המיקרוגרید ישנן תכונות ומאפיינים אשר תורמים לדחייה בהשקעות ההון הדרושות עבור שידורים במקטעי ההולכה והחלוקה. התכונות אשר מאפשרות זאת הן: יכולת הייצור העצמי, דחיית ביקושי שיא מהרשת בעזרת יכולת ניהול חכם ואגירה של המערכת.

1. ייצור עצמי – אפשרות הייצור העצמי של מערכת המיקרוגרید מאפשרת ייצור עבור צרכנים בסביבה קטנה יותר (באזור מסוים), כתוצאה מכך, ישנו צמצום בצורך לבצע השקעות חדשות במקטעי ההולכה וחלוקה ארוכים ובשל כך פוחתת ההשקעה הדרושה בתחום זה.
2. ניהול חכם – המיקרוגרید מספק חשמל מיצרנים לצרכנים בשילוב תקשורת מהירה ודו-כיוונית המאפשרת התאמתה של הצריכה לכושר הייצור והפעלה של תוכניות לניהול צריכה (Demand Side Management). בכך, ניתן להשיג יעול, חיסכון, צמצום עלויות, שרידות, שיתופיות והגברת אמינות. הרשת החכמה מצטיינת ביכולת לנתב את אספקת החשמל בדרך אופטימלית על מנת להגיב למגוון רחב של מצבים, לעודד את המשתמשים לשנות את אופן הצריכה (למשל, עידוד שימוש בשעות השפל) ולגבות פרמיה מצרכנים המשתמשים באנרגיה בשעות השיא. בשעות שיא, המיקרוגרید יכול, בתיאום עם הצרכן, לכבות מכשירים נבחרים על מנת להפחית את הביקוש.¹³³ מערכת הניהול החכם של המיקרוגרید יכולה לתפעל את החיבורים לרשת החלוקה. במצב בו מתרחש חוסר איזון במקטע החלוקה, מערכת הבקרה מסוגלת לנתק את המיקרוגרید מרשת החלוקה בצורה חלקה ובטוחה וללא הפרעה לחלוקת החשמל לצרכנים.¹³⁴
- כתוצאה מדחיית הגידול בביקושי שיא ישנה אפשרות לצמצום השדרוגים במקטעי ההולכה והחלוקה ובכך ניתן לדחות השקעות הון במקטעים אלה.¹³⁵
3. אגירה – אחד האמצעים לטיפול בתנודתיות הרשת הוא אגירת אנרגיה חשמלית. במקטע ייצור החשמל מסייעת האגירה להתגבר על בעיות כגון שיאי ביקוש, ייצוב תדר, רזרבה סובבת ברשת, ואמינות אספקה, במקטע ההולכה תורמת האגירה לייצוב רמות עומסי הביקוש, הקלה על עומסים בקווי ההולכה ועוד. גם בתחום רשת החלוקה יכולה אגירה לתרום להקטנת ביקושים, ביזור, התמודדות עם תעריפים משתנים בשעות שונות ואמינות אספקה.¹³⁶

מתוך:

<https://www.google.co.il/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0ahUKEwiE1ZPUtbDVAhUJCM AKHU2xDz0QFghQMAc&url=http%3A%2F%2Fwww.neaman.org.il%2FNeaman2011%2Fuserdata%2FSendFile.asp%3FDBID%3D1%26LNGID%3D2%26GID%3D6427&usq=AFQjCNF2p3fiQWnppJhBMFBws0XXUiPBOA>

¹³⁴ מתוך: <http://www.theenergytimes.com/derms/self-generation-microgrid-world>

¹³⁵ מתוך: http://assets.fiercemarkets.net/public/smartgridnews/mckinsey_demand_side_mgmtm.pdf

¹³⁶ מתוך: <http://www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1&LNGID=2&GID=4204>

כלומר, כתוצאה מהקמת המיקרוגרید ניתן לדחות את הגידול בשיא הביקוש של הצריכה מהרשת (שיא הביקוש אינו קטן אלא רק שיא הביקוש בצריכה מהרשת) בטווח הקצר והבינוני. אי לכך, קטן הצורך בביצוע השקעות חדשות ובכך ניתן לדחות השקעות הון במקטעי ההולכה והחלוקה.

סקירת ספרות:

תעשיית החשמל פיתחה מספר אלטרנטיבות לחיובו של הצרכן בגין הולכה וחלוקה.

1. Fully Volumetric – באפשרות זו הצרכנים משלמים תשלום יחיד עבור כל קוט"ש אשר מועבר אליהם.
2. Partially Volumetric - אפשרות זו מיועדת בעיקרה לצרכנים תעשייתיים. צרכנים אלה משלמים בדרך כלל את התשלום הוולומטרי ובנוסף תשלום על הביקוש עבור ביקוש השיא הגבוה ביותר בתקופת החיוב. תשלומים אלה מבוססים על גישה המורכבת משני חלקים: הם כוללים בתוכם תשלום וולומטרי עבור שירותי קמעונאות אנרגיה ותשלום עבור קיבולת עלויות מערכת. תשלום הקיבולת מרחיב את רעיון התשלום על הביקוש על ידי תיווך בין ביקוש השיא וייצור השיא וחל על הגבוה מבין השניים.
3. Non Volumetric - אפשרות זו מותאמת לצרכני ייצור מבוזר, היא מדגישה את תשלומי הצרכן ותשלומי החיבור/גיבוי. אפשרות זו כוללת בתוכה את התשלומים עבור הצרכן והקיבולת עבור קמעונאות האנרגיה ושירותי המערכת.

בהתבסס על סימולציות שבוצעו ניתן להגיע למספר מסקנות:

1. חיוב וולומטרי מלא (fully volumetric) יעודד בטווח הקצר את ניהול העומסים על חשבונם של ביקושי שיא דרסטיים ומוחלטים וחוסר יציבות המאקרוגריד. בנוסף, זה עלול להרתיע את הבסיס הרווחי של קמעונאי האנרגיה מכיוון שמפעילי מערכות המיקרוגריד יכולים בקלות לעקוף את התשלומים הוולומטריים על ידי היבוא מהמאקרוגריד.
2. שילוב של תשלומי קיבולת ותשלומי צרכן יבטיחו כי מפעילי המיקרוגריד יציגו תוצאות יציבות של עומסים וייצור תוך הבטחה כי הם משלמים את חלקם בעלויות המערכת הכלליות. באפשרותם של תעריפים אלו להפחית את עלויות מפעיל המיקרוגריד הן עבור החשמל והן עבור המערכת (הולכה וחלוקה).¹³⁷

דחיית השקעות רשת ההולכה:

דחייתן של השקעות ברשת ההולכה יכולה להתקיים רק אם הצורך בהשקעה יכול להידחות על ידי הייצור המבוזר, זאת בשל יכולת הייצור המבוזר להאריך את משך השימוש במתקני ההולכה.

¹³⁷ מתוך: http://ac.els-cdn.com/S0306261917311546/1-s2.0-S0306261917311546-main.pdf?_tid=e2361dd8-9923-11e7-99ec-00000aabb0f02&acdnat=1505376685_2c9bc01606192025d98a9bd87dc97ea4

- גישת שיווי המשקל בטווח הארוך: בגישה זו התועלות מוערכות בהתבסס על השינויים בעלויות הגלומות בהשקעות ההולכה. כל עלייה בקיבולת הייצור המבוזר הינה בעלת פוטנציאל למניעת עלויות קיבולת רשתות ההולכה. בגישה זו, יתרונותיו של הייצור המבוזר מוערכים בהתבסס על השינויים בעלויות ההשקעה בהולכה. בפרט, הגידול בעלויות ההולכה לאורך תקופה של מספר שנים יכול להיות מחולק בעלייה בקיבולת ההולכה על פני אותה תקופת זמן וזה יניב את ההשקעה בהולכה ביחידות: kVA/\$. כמו כן, כאשר מדובר בדחיית השקעות ישנו צורך להכפיל בזמן הדחייה (בשנים).

• גישת תועלות מיקום:

גישה זו מתבססת על תכונות ספציפיות של המיקום ומבינה כי היתרונות מפרוייקטים של ייצור מבוזר מונעים בעיקר ע"י מיקומם, מאפייני הרשת עליה הם מותקנים ותפעולם של המקורות. לכן, כתלות במקומם, פרוייקטים מסוימים יכולים לחסוך בהשקעות הולכה יותר מאשר פרוייקטים אחרים. כך למשל, בהנחה שהשקעות ההולכה אשר ניתנות לדחייה על ידי ייצור מבוזר מושפעות מגידול בעומסים, ניתן להניח כי אזורים אשר לא מאופיינים בגידול בעומסים לא יהיו בעלי היתרונות הללו.

רשת החלוקה:

הקושי בפיתוח מתודולוגיה להערכת ערך דחייתו של הייצור המבוזר מושפע מההיזון החוזר שבין מודל אידאלי של רשת חלוקה לבין הרצון להשפיע על רמת התועלות מהייצור המבוזר.

על מנת ליצור שיווי משקל צריך לקחת בחשבון את העקרונות הבאים:

- חישוב תועלת דחיית ההשקעות ברשת החלוקה צריך לשקף תכנון ומבנה רשת ההולכה וההשקעות החדשות אשר יידרשו בעתיד.
- תועלות הייצור המבוזר הינן מקומיות ותלויות בתנאים האזוריים כגון: ביקושי הצרכנים, מבנה קווי החלוקה באזור, הציוד באזור וכמות מערכות הייצור המבוזר המחוברות באזור.
- החישוב צריך לשקף את כל ההשפעות שיש לטכנולוגיית הייצור המבוזר על הצורך במבנים חדשים.
- ערכו של הייצור המבוזר בתהליך תכנון רשת החלוקה יכול לעלות בשל התחייבויות חוזה וניהולו של מפעיל בלעדי קיים של הציוד הנמצא באזור.
- דחיית השקעות ברשת החלוקה בעזרת הייצור המבוזר צריכות להיות מאוחדות עם העדפות תקציב הצרכנים באזור.
- ערך דחיית ההשקעות תלוי בכמות הייצור המבוזר ביחס למצב הקיבולת.

¹³⁸ מתוך: http://www.ontarioenergyboard.ca/oeb/Documents/EB-2007-0630/report_Power_Advisory_20080922.pdf

סקירה לפי מאמר NYSERDA :

רשתות ההולכה והחלוקה זקוקות לשדרוגים תקופתיים על מנת לספק את הביקוש הדרוש. דחייה בהשקעות ברשתות אלו מתאפשרת בזכות יכולתו של המיקרוגרید לצמצם עומסים שמפעיל המערכת צריך להתמודד עמם באזור. יתרון זה של מערכת המיקרוגרید מאפשר לבצע פחות השקעות קצרות טווח בשדרוג רשתות ההולכה והחלוקה.

פיצוי דחיית השקעות ברשתות ההולכה והחלוקה :

קיבולת הייצור המבוזר של המיקרוגרید יכולה לתרום למפעיל המערכת לדחות שדרוגים נחוצים ברשתות ההולכה והחלוקה. הפיצוי בגין דחיית שדרוגים אלה יכול להיות כחלק מתהליך רכישה של המפעיל. לעומת זאת, עבור הצרכן היכולת לקבל פיצוי בצורה זו אינו אפשרי.¹³⁹

כימות התועלות

סימונים :

- c_0 - מגבלת הקיבולת של תשתית (חלוקה/הולכה) הקיימת.

- p_0 - צריכת השיא (peak) במצב המוצא

- e_0 - "עודף הקיבולת" במצב המוצא $e_0 = c_0 - p_0$

- g - קצב צמיחה התקופתי של צריכת השיא

- s - מחיר יחידת קיבולת (לפשטות קבוע לאורך זמן) מה המחיר?

המודל יפה לא ברור מתי הוא מתנהל ומה התנאים. נראה בהמשך

במצב המוצא $p_0 \leq c_0$ והקיבולת גדולה דיה כדי לעמוד בעומסים של צריכת השיא. בקצב הצמיחה הצפוי,

יהיה צורך להגדיל את הקיבולת ב- g יחידות בכל תקופה¹⁴⁰ החל מתקופה $t(p_0)$ כך שמתקיים $(1) + p_0$

$$g[t(p_0) - 1] < c_0 \text{ ו- } (2) p_0 + gt(p_0) \geq c_0$$

לפשטות נניח כי (2) מתקיים בשוויון ולפיכך

$$t(e_0) = e_0/g$$

בהינתן מקדם היוון $\beta < 1$ הערך הנוכחי של עלות ההשקעה העתידית בקיבולת הוא

¹³⁹ מתוך : <http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf>

¹⁴⁰ לשם הפשטות אנו מתעלמים מכך שבאופן מציאותי הגדלת הקיבולת לא תעשה באופן רציף אלא בקפיצות בדידות.

$$\sum_{t=t(e_0)}^{\infty} \beta^t \cdot gs$$

נניח כעת כי צריכת השיא בנקודת המוצא גדלה מ- p_0 ל- $p_0 + m$, כאשר קצב הצמיחה העתידי נותר ללא שינוי. במקרה זה יש להגדיל את הקיבולת החל מנקודת זמן מוקדמת יותר $t(e_0 - m)$. הערך הנוכחי של הגידול בעלויות ההשקעה הוא לפיכך

$$\Delta I(m) = \sum_{t(e_0-m)}^{t(e_0)} \beta^t \cdot gs$$

כעת נניח שיחידה נוספת של צריכת שיא במצב המוצא. אם הביקוש כולו יסופק על ידי הרשת, הדבר יגדיל את עלויות ההשקעה העתידיות ב- $\Delta I(1)$. אלטרנטיבית, העליה בביקוש השיא יכולה להיות מסופקת בחלקה על ידי יצור מקומי במיקרוגריד (mg). נניח בשלב זה כי המיקרוגריד מסוגל לייצר עד ל- α מצריכת השיא ואת היתרה $1 - \alpha$ הוא מקבל מהרשת. בנוסף לכך המיקרוגריד משתמש ברשת החשמל לצורך גיבוי במקרה של השבתה של יכולת הייצור המקומי. נניח כי במקרה זה הרשת מחוייבת לספק למיקרוגריד אחוז β מתוך צריכת השיא שלו.

צריכת השיא במצב המוצא גדלה במקרה זה ב- $\delta = \max(1 - \alpha, \beta)$ והגידול בעלויות ההשקעה העתידיות $\Delta I(\delta)$ החסכון בעלויות ההשקעה כתוצאה מהקמת המיקרוגריד היא

$$S(\delta) = \Delta I(1) - \Delta I(\delta) = \sum_{t(e_0-1)}^{t(e_0-\delta)} \beta^t \cdot gs$$

נניח כעת כי יחידת הביקוש הנוספת היא של יחידה כלכלית (לדוגמא: קמפוס) המתלבטת אם לבנות מיקרוגריד או לא. כדי שביחידה תפנים את החיסכון בעלויות ההשקעה, התשלום שלה צריך להיות נמוך ב- $S(\delta)$ אם תבחר להקים מיקרוגריד.

הערות:

1. אם הרשת מחויבת לספק למיקרוגריד את כלל צריכת השיא שלו כגיבוי ($\beta = 1$) החסכון בעלויות ההשקעה הוא אפס.

2. מכיוון ש $t(e_0)$ עולה בעודף הקיבולת ההתחלתי e_0 , החסכון $S(\delta)$ כתוצאה מהקמת המיקרוגריד יורד ב-
 e_0 .¹⁴¹

ניתן להרחיב את הניתוח למקרה שבו קיבולת הייצור של המיקרוגריד גדולה מצריכת השיא שלו. במקרה כזה אם המיקרוגריד מייצא חשמל לרשת החלוקה, הוא מביא להורדה בעלויות ההשקעה בקיבולת הולכה (אף לא חלוקה) בהשוואה למצב המוצא.

¹⁴¹ נשים לב כי $t(e_0 - \delta) - t(e_0 - 1) = (1 - \delta)/g$ אינו תלוי ב e_0 .

נספח 4: תועלת המיקרוגרید ברמת הפרט (ליאור אבן-חן)

מהו מיקרוגרید?

בהגדרה כללית ורחבה מערכת מיקרוגריד הינה מערכת לניהול אופטימלי של אוסף האמצעים המשמשים ליצור, אגירה, וצריכת אנרגיה בגבולות גיאוגרפיים ו/או רגולטוריים נתונים (שכונה, מחנה צבאי, בית חולים, קמפוס, אזור תעשייה, קניון, צרכן עם נקודות צריכה) כמערכת סגורה (אי חשמלי) היכולה להיות מנותקת או מחוברת לרשת המרכזית למטרות גיבוי, שרידות ומכירת עודפי יצור. על פי רוב התקנת מערכות מיקרוגריד נועדו ליצור מערך ניהול אנרגיה עצמאי על בסיס כלכלי תוך הבטחת יתירות ושרידות המערכת בממשק עם רשת החשמל. מערכת מיקרוגריד (Microgrid) הינה הלכה למעשה משק חשמל בקנה מידה קטן הכולל את כל המרכיבים של מערכת חשמלית כלל ארצית. לרוב, עדיין קשה לאתר מערכות מיקרוגריד בתצורתן האופטימלית ולרוב מערכות הנקראות מערכות מיקרוגריד הן מערכות המכילות מרכיבים מסוימים של המערכת.

מרכיבי המיקרוגריד העיקריים הם:

4. ייצור מקומי – מציג מגוון סוגים של מקורות לייצור אנרגיה היכולים לשמש את הצרכן. מקורות אלו מתחלקים לשני סוגים עיקריים: מקורות אנרגיה קונבנציונליים (כמו דיזל גנרטור) ומקורות אנרגיה מתחדשת (כמו טורבינות רוח ואנרגיה סולארית).
5. צריכה – מרכיב זה מתייחס לאלמנטים אשר צורכים חשמל, כמו התקני תאורה בודדים, מערכות חימום לבניינים ומרכזים מסחריים וכו'. במקרי עומס, צריכת החשמל ניתנת להתאמה לביקוש ברשת.
6. אחסון אנרגיה – במיקרוגריד כל מתקן אחסון מסוגל לבצע מספר פעולות כמו הבטחת איכות החשמל, גיבוי עבור מערכת המאקרוגריד בעת הצורך והפחתה בעלויות האופטימיזציה של המערכת. מתקני האחסון כוללים: טכנולוגיות חשמליות, מערכות המטפלות בלחץ וכבידה ואחסון חום.¹⁴²

ישנם שני סוגי מיקרוגריד עיקריים: הראשון, מיקרוגריד אשר ממוקם כולו באזור מסוים ומנוהל על ידי צרכן פרטי. והשני, מיקרוגריד אשר נוצר כחלק מהרשת הכללית המשלב מספר טכנולוגיות וממוקם באזורים שונים.¹⁴³

בחינת המיקרוגריד מעידה כי יש לו תועלות הן למשק בכללותו והן ברמת הפרט. כמובן שלעיתים יש זהות בין התועלות בשתי הרמות (למשל בכל הנוגע לאמינות, יעילות כלכלית וכיוצ"ב). ברם, מדובר במהויות שונות. התועלות המשקיות מהותן בתרומה של יישום מערכות מיקרוגריד למשק בכללותו (קידום תעשייה, הפחתת זיהום גלובלית) ולמשק החשמל (חיסכון בעלויות הולכת החשמל ואמינות מערכת החשמל מנקודת מבט כלל משקית) בעוד שהתועלות ברמת הפרט מהותן ביעול צריכת האנרגיה – חסכון או רווח כלכלי.

¹⁴² מתוך: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microgrid>

¹⁴³ מתוך: <http://interestingengineering.com/7-benefits-of-microgrids/>

גם ברמת הפרט ניתן ליצור חלוקת משנה בין תועלות ברמת צרכן/יצרן הקצה לבין יזמי ומפעילי פרויקט המיקרוגרید. במסמך זה נתעלם מהבחנות אלה ולצורך הניתוח נבחר כי התועלות ברמת הפרט מתייחסות לכל שותפי מערכת המיקרוגרید בגבולות הגאוגרפיים או הרגולטוריים.

מה מניע צרכן לשקול שימוש במערכת מיקרוגריד?¹⁴⁴

- **מערכת חשמל אמינה ובטוחה** – בתי חולים, אוניברסיטאות, בתי זיקוק, מפעלים לייצור תרופות, מרכזי נתונים ובסיסים צבאיים תלויים באספקת אנרגיה רציפה ללא הפרעות. כיום, ארגונים אלו משתמשים בגנרטורים פרטיים (רובם פועלים על דיזל) למקרי חירום משום שאפילו ההפרעה הקטנה ביותר באספקת החשמל עלולה לגרום לנזקים. הבקרה האוטומטית של מערכת המיקרוגריד תדע לאזן בצורה טובה יותר את הביקוש לאנרגיה מייצור הגיבוי, הרשת הכללית ומקומות אחסון מקומיים.
- **ביטחון בתחום הפיזי ובתחום הסייבר** – מתקנים פדרליים, צבאיים ושל סוכנויות בטחוניות שמות דגש על הביטחון הפיזי ועל תחום הסייבר. פריצות למחשבים ע"י גורמים שונים מעלים את רמת הסיכון והצורך למקור חשמלי מתקדם, אמין ומאובטח.
- **שינויים מתוכננים** – אירגונים בצמיחה או בשלבי שינויים הם מועמדים אידאליים להשתמש בפתרון המיקרוגריד. הרחבת אוניברסיטה, בסיס צבאי, בניית מבנה חדש וכדומה הם מקרים בהם מומלץ לשקול לעבור לשימוש במערכת המיקרוגריד משום שבכל מקרה שכזה יהיו הוצאות אנרגיה נוספות. לכן, ניתן להשתמש בתזמון זה, של שינויים, על מנת לשקול ולהחליף את המערכת הקיימת במערכת מיקרוגריד אשר תהיה מותאמת לצרכי המקום.
- **מניעים איזוריים** – החלטות רגולטוריות ברמה המקומית, ארצית, אזורית ופדרלית. ברמה המקומית, מאגר התמריצים המדיני עבור יעילות ושימוש באנרגיות מתחדשות. ברמה הארצית, מדינות מסוימות הגדירו יעדים לשימוש באנרגיות מתחדשות וסטנדרטים למוצרים חשמליים אשר בדרך עקיפה מחייבים שימוש באנרגיות מתחדשות. ברמה האזורית, ספקים פרטיים וחברות גדולות משתנות בהתאם לכניסתם של הצרכנים לשוק האנרגיה. כאשר לצרכנים ניתנת האפשרות להיכנס לשוק, נפתחת בפניהם האפשרות הכלכלית של מכירת חשמל לרשת הגדולה. וברמה הפדרלית, ההתמודדות עם רגולציות נוכחיות ועתידיות של (EPA) United States Environmental Protection Agency מהווה אפשרות להימנע מעלויות. גנרטורי דיזל צריכים להיות מוגבלים בזמן בשל סיבות סביבתיות, מה שניתן לשפר בעזרת שימוש באנרגיות מתחדשות. נוסף לכך, ישנו זיכוי מס שניתן לקבל בתנאי שיסנו שימוש בייצור יעיל באזורים שיש בהם מקורות אשר מהווים הכנסה נמוכה מה שיכול להוביל לצמצום בעלויות. כמו כן, בעתיד ישנה אפשרות עבור אירגונים אלו להשפיע על הפחתת פליטות המזמהים.
- **סיבות חברתיות** – אירגונים עם מחויבות חזקה לאנרגיה ירוקה, וראייה עתידית לשימוש באנרגיות מתחדשות וייצור חשמל באמצעות מיקרוגריד. אירגונים אלו יכולים לראות קשיים וסיכונים בצורת

ההשפעותיה של הרשת הכללית על הסביבה. אירגונים אלו ירצו להפחית את הצריכה והתלות שלהם ברשת הכללית.

תועלות מערכות המיקרוגרید ברמת הפרט:

- חסכון והתייעלות אנרגטית
- איכות ואמינות החשמל
- תועלות סביבתיות

חיסכון והתייעלות אנרגטית בעלויות צריכת אנרגיה

צמצום עלויות רכישת חשמל בייצור עצמי – החיסכון מושג באמצעות ביצוע אופטימיזציה כלכלית של רכישת החשמל הזול ביותר בכל זמן נתון. ישנם זמנים בהם ייצור חשמל עצמי זול יותר מאשר רכישת החשמל מהרשת ולהיפך. החיסכון נובע מעלות ייצור נמוכה יותר של הייצור העצמי מאשר רכישת החשמל אשר כוללת למעשה את עלות הייצור (המשקית) ובנוסף עליה גם את עלות ההולכה וההשנאה.

לדוגמא:

1. בשל ירידת מחירי הפאנלים הסולאריים, בשעות היום עלות הייצור של קוט"ש סולארי זולה יותר מאשר רכישת אותו הקוט"ש מחברת החשמל. החיסכון הממוצע לאורך 20 שנה של אמריקאים אשר התחילו בשנת 2011 להשתמש בפאנלים סולאריים, צפוי להיות כ-20,000 דולר.¹⁴⁵
2. ייצור חשמל במתקני קוגנרציה עשוי להיות זול יותר במידה והצרכנים במיקרוגרید צורכים הרבה קיטור.

אופטימיזציה של מתקני הייצור/צריכת החשמל – תועלת זו מתבססת על מרכיב הניטור הרציף המצוי בבסיסו של מבנה מערכת המיקרוגרید. חיזוי הרגלי ומאפייני צריכה מאפשר למערכת להמליץ למנהל המיקרוגרید על תצורה אופטימלית של דפוסי ייצור החשמל כולל אגירתו בצד ההיצע וצריכת החשמל בצד הביקוש. בצד ההיצע, ההמלצות לדפוסי הייצור של מתקני החשמל במערכת מבוססות על ניתוחים סטטיסטיים של הרגלי הצריכה לפי ימות השבוע ושעות היממה ביחס לעלויות החשמל, כמו גם על התנאים הפיזיים של מתקני הייצור השונים. למהדרין אף ניתן לקחת בחשבון בחישוב את עלויות אקסוגניות כגון רמות זיהום. האופטימיזציה ביטויה בייצור/רכישת חשמל על פי קריטריונים וסדרי עדיפות שייקבעו על ידי מנהל המיקרוגרید כגון: מינימום עלות, מינימום פליטות, אמינות מקסימלית, צרכנים קריטיים, שעות עומס וכו'. בצד הביקוש, בהתבסס על ניתוח נתוני העבר, המערכת תוכל להמליץ על צריכה נבונה יותר ולספק המלצות על הסטת עומס מרמת הצרכן הבודד (בית) עד לרמה המוסדית או המפעל. לדוגמא, המערכת תוכל להמליץ לצרכן קצה ביתי לבצע פעולות חיסכון

¹⁴⁵ מתוך: <https://cleantechnica.com/2013/10/08/advantages-disadvantages-solar-power/>

מסוימות בשעות מסוימות אבל החיסכון מותנה בנכונות של משתמש הקצה ליישם את ההמלצה.¹⁴⁶ לרוב, על מנת להגיע לשיעור חיסכון זה יש להשקיע באמצעי בקרה מקומיים ביחידות הקצה.

שיפור תחזוקתיות המערכת – כאשר קיים מידע רציף על המתרחש ברשת ניתן לדעת מה לא תקין במערכת בכל זמן נתון ואף לחזות מראש מה הסבירות של מרכיבים שונים במערכת להיפגע ולהיערך בהתאם. כלומר, לאורך זמן, ניתן לפתח יכולת מעקב וחיזוי תקלות המבוססת על נתוני זמן אמת. המערכת תהיה מסוגלת למדוד זליגות או טמפרטורות שיכולות להצביע על תקלות עתידיות.

העצמת היצרן/צרכן prosumer והמודעות למציאות האנרגטית של משתמש הקצה – משתמש הקצה בין אם הוא צרכן ובין אם הוא יצרן יכול לדעת באופן ברור את מצבו מבחינה אנרגטית. התועלת מתבטאת במודעות בעל המתקן על המתרחש מבחינה אנרגטית ויכולת מעקב ותרגום הנתונים למונחי רווחיות מהפעלת המיקרוגרید.

היבט המודעות: נקיטת פעולות לשם השגת חיסכון אנרגטי הפכו לחלק בלתי-נפרד מחיי היומיום של הרבה צרכנים ביתיים בארץ ובעולם, ולפיכך, קבלת משוב ביחס לשימוש החשמל ומעקב אחריו הם אבני היסוד ביצירת שינוי בהרגלי הצריכה. מחקרים שבוצעו בעולם העלו, שמעקב של הלקוח אחר השימוש בחשמל - באמצעות מכשירים אלקטרוניים לניטור צריכה החשמל בזמן אמת - עשוי להניב חיסכון של 4%-15% בצריכת החשמל הביתית.

היבט העצמת הצרכן: הצרכן הופך להיות חלק משרשרת קבלת ההחלטות במערכת תוך כדי שהוא מבצע שיקולים של עלות ותועלת. לדוגמא, מערכות לניטור צריכה עשויות לסייע ללקוחות לנצל את תעריפי התעו"ז (תעריף לפי עומס המערכת וזמן הצריכה) על-ידי הסטת שעות ההפעלה של מכשירים ביתיים הצורכים חשמל רב, כמו דוד חימום מים, מייבש כלים, מכונת כביסה, מדיח כלים וכדומה, משעות שיא הצריכה לשעות תעריף השפל.¹⁴⁷

הסטת שעות העומס באמצעות אגירת אנרגיה – האגירה הינה כלי לשיפור הכלכליות. הסטת עומסים על ידי אגירה בשעות השפל ופריקה לרשת בשעות העומס יכולה לספק מקור ייצור זול בשעות הביקוש היקרות ובכך להגדיל את הכלכליות של המערכת. לדוגמא, מערכת המיקרוגרید מאפשרת אינטראקציה בין הגנראטורים באופן אוטומטי בזמן אמת וכן שליטה על מתקנים צורכי חשמל והסטת הצריכה שלהם לשעות בהן ייצור החשמל זול יותר. כמו כן, ניתן להחליט כי המערכת הסולארית מטעינה את הסוללות. המערכת מוזנת מהרשת הארצית וכאשר עוברים לשעות פסגה (בצהריים) המערכת הסולארית (הזולה יותר) תשמש לצריכה עצמית וכאשר נגיע לשיא הביקוש (אחר הצהריים) נתחיל להשתמש בחשמל האגור בסוללות על מנת לספק את הביקוש. דוגמאות לחיסכון בצריכת האנרגיה כתוצאה מהפעלת מערכת מיקרוגרید:

¹⁴⁶ ישנן מערכות מיקרוגריד בהן מערכת היחסים בין המנהל לבין צרכני הקצה הינה של יחסי מרות או כפייה (מפעל, בסיס צבאי, אוניברסיטה וכו') במסגרתן ניתן לכפות על צרכן הקצה את החיסכון

¹⁴⁷ מתוך: <https://www.iec.co.il/ElectricityProfessionals/DocLib4/NITUR.pdf>

- ב-2009, בניין האמפייר סטייט בארה"ב הפחית את צריכת האנרגיה שלו ב-30% ובכך חסך יותר מ-2 מיליון דולר בעלויות החשמל השנתיות.
- אוניברסיטת ניו יורק התקינה מערכת combined heat and power (CHP) אשר חוסכת לאוניברסיטה כ-5 מיליון דולר בהוצאות האנרגיה השנתיות.¹⁴⁸

גורמים המשפיעים על החיסכון ברמת הפרט

- דרישה להחלפת הטכנולוגיות הקיימות בטכנולוגיות הפועלות בעלות שולית נמוכה יותר.
- שילוב מערכות combined cooling, heat and power (CCHP) / CHP במערכת המיקרוגרید אשר תגרום לצמצום דרישת האנרגיה מהספקים עם עלייה קטנה (אם בכלל) בעלותה של האנרגיה שיגרמו ע"י מפעיל המיקרוגרید.
- אספקת שירותים נלווים ברמה המקומית (כגון: אגירת חשמל, תמיכה בשעות שיא) בצורה יעילה יותר בהשוואה למקורות הרגילים).

שילוב מערכות CHP במיקרוגרید:¹⁴⁹

מערכות קוגנרציה הנין בעלות פוטנציאל לחיסכון ושימור אנרגיה גדול מזה של כל אמצעי אחר הידוע כיום. מתקני CHP אינם תלויים בקרבה למתקני ייצור חשמל, וניתן למקם אותם במקומות מרוחקים.

לפי תחזית הרשות לשירותים ציבוריים חשמל, בשנת 2020 קוגנרציה עשויה להוות נתח של כ-1 GW מהיקף ההספק המותקן במדינת ישראל, בהיקף של כ-18% מתפוקת משק החשמל. למרות גידול ניכר בהיקף הקוגנרציה בישראל בעשור האחרון, קיימים מספר חסמים המקשים על קידום התחום וביניהם חוסר תיאום בין רשויות רגולטוריות שונות, מחסור באספקת גז טבעי, והתנגדות הציבור החושש מפליטת מזהמים (NIMBY).

דוגמא¹⁵⁰: Burrstone Energy Center הממוקם ב-UTICA בניו יורק מספק אנרגיית חום וחשמל לבית החולים, מרכז האחיות והקולג'.¹⁴⁹

המערכת כוללת: מתקן CHP עם 3 טורבינות של 1100 קילוואט ומנוע גז טבעי נוסף של 334-334 KW המתקן, אשר החל לפעול בשנת 2009 מסוגל לספק:

- 3.6 MW של 13.2 KV חשמל

¹⁴⁸ מתוך: [http://energy.pace.edu/sites/default/files/publications/Community%20Microgrids%20Report%20\(2\).pdf](http://energy.pace.edu/sites/default/files/publications/Community%20Microgrids%20Report%20(2).pdf)

¹⁴⁹ מתוך: דוח רשות החשמל 2015

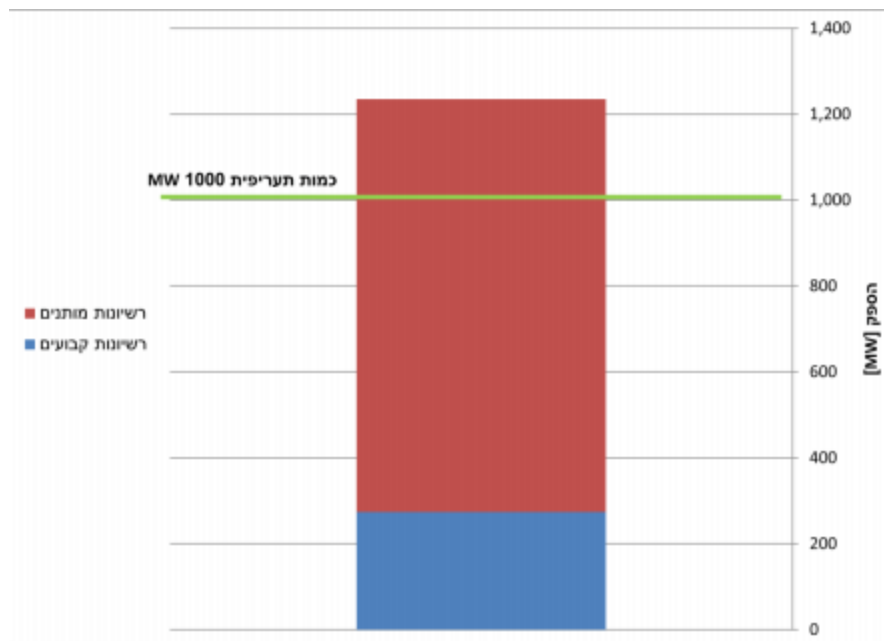
¹⁵⁰ מתוך: <http://www.bostonplans.org/getattachment/5be6cac4-5dbd-42a2-b904-475e95a7782e>

- 7000 lbs/hr של 85 psig קיטור
- 700 gpm מים חמים

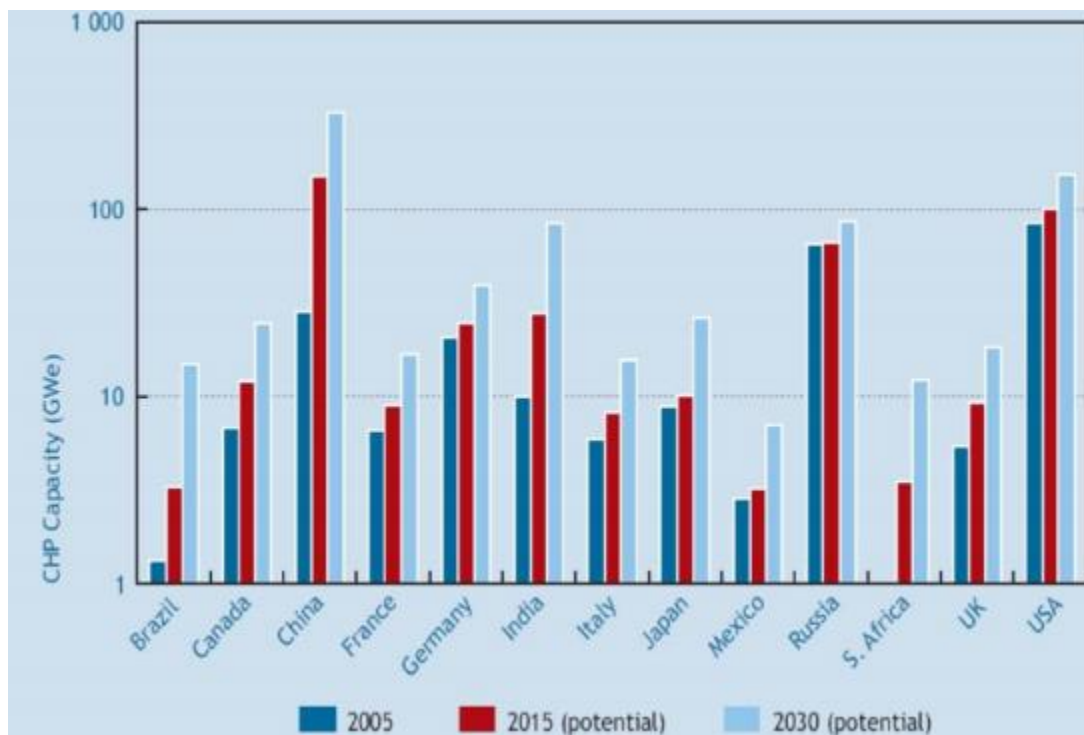
בנוסף, המתקן מסוגל להוציא אנרגיה בחזרה לרשת הכללית.



גרף 10: נתחי שוק בייצור חשמל בטכנולוגיית קוגנרציה



גרף 11: מימוש כמות תעריפית ליצרני קוגנרציה: (ניתנו רישיונות מותנים וקבועים בהספק מצטבר של 1,458 MW)



גרף 12: הפוטנציאל של CHP במדינות שונות בעולם בשנים 2015 ו-2030

מתקן CHP קטן מוגדר כמתקן בעל הספק מותקן הקטן מ-200 קילוואט. מתקנים מסוג זה מיועדים בעיקר לשימוש במבני משרדים, בתי חולים, בנייני מגורים, סופרמארקט, בית מלון וכדו'. במידת הצורך, מתקנים אלו יכולים להעביר אנרגיה לרשת הארצית ובמידה ואף לתרום את אנרגיית חום עודפת לרשת החימום המחוזית (במידה וקיימת).

יתרונות מתקן CHP קטן :

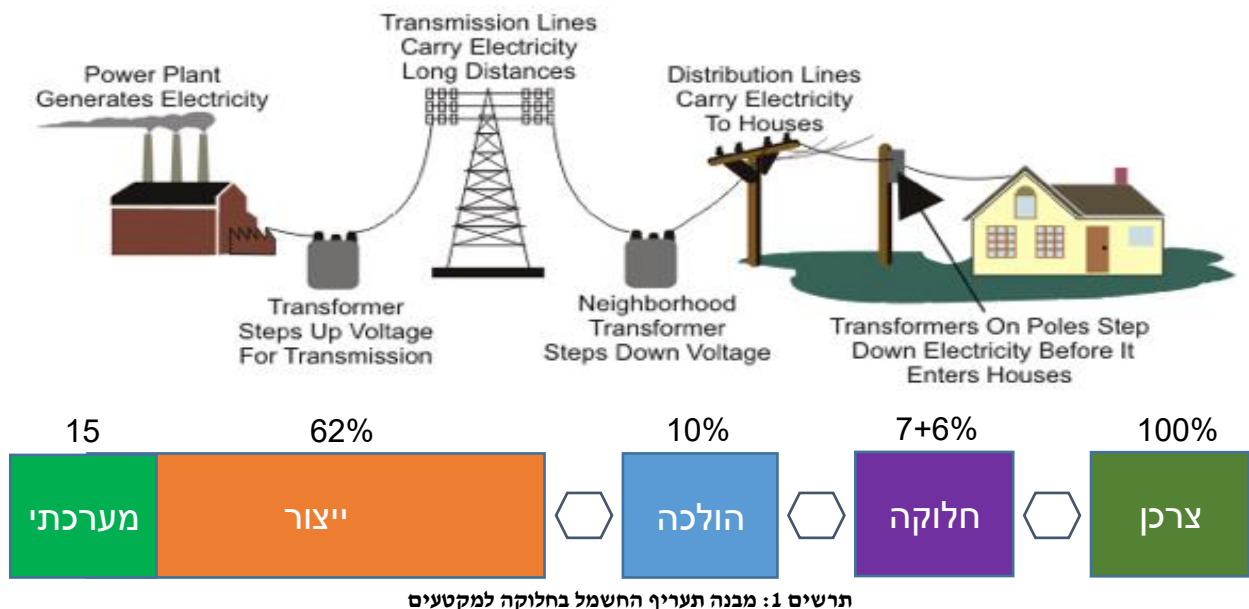
- עלויות מימון מופחתות המאפשרות לרכוש את המערכת בתקציב מוגבל.
- יכולת טובה יותר להתאים להספק של בניינים – בניינים רבים הם בעלי דרישה מופחת לחימום, המתקן הקטן מותאם לדרישות בצורה טובה יותר ומוביל לצמצום בעלויות האנרגיה הכוללות.

חיסכון בעלויות חשמל

מבנה תעריף החשמל בישראל:

בהתאם לחוק משק החשמל (סעיף 31א). תעריף החשמל בישראל משקף את העלויות המוכרות של התשומות המשמשות לאספקת החשמל ואספקתו במקטעי הייצור, ההולכה, החלוקה והאספקה במשק כך שכל מחיר משקף את עלות השירות המסוים בלבד בצורה שמונעת סבסוד צולב של שירות אחד על חשבון השירות האחר. צרכן הקצה משלם תעריף צריכה אשר מחירו משתנה על פי מתח האספקה, עונות השנה, היום בשבוע והשעה במהלך היום. בתרשים 1 להלן מתואר משק החשמל בחלוקה למקטעים תוך ציון חלקו של המקטע בתעריף הכללי.

¹⁵¹ מתוך : <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15453660809509140?needAccess=true>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032104000036>
http://www.theade.co.uk/small-scale--commercial-chp_189.html



מיקרוגרד המייצר חשמל לעצמו מתחרה במחיר האלטרנטיבי של החשמל אותו הוא רוכש. כלומר, במידה ומדובר בצרכן מתח נמוך הוא מתחרה ב-85% מתעריף החשמל (ייצור + הולכה + חלוקה מתח גבוה + חלוקה מתח נמוך), במידה ומדובר בצרכן מתח גבוה הוא מתחרה ב-79% ממחיר החשמל (ייצור + הולכה + חלוקה מתח גבוה) ואילו מדובר בצרכן מתח עליון הוא מתחרה ב-72% מתעריף החשמל (ייצור + הולכה).

מכאן שמערכת מיקרוגרד יכולה להוזיל עלויות, ע"י פעילות יעילה בזמנים יעילים, כאשר כל סוג צרכן יכול להוזיל חלק מסוים מהתעריף בהתאמה אליו.

דוגמא למתקן מיקרוגרד (של חברת סימנס):

סימנס, חברת הנדסה גרמנית, הודיעה על שיתוף פעולה עם Blue Lake Rancheria, שמורת אינדיאנים בצפון קליפורניה ו-Humboldt State University's Schatz Energy Research Center על מנת לבנות מתקן מיקרוגרד מופחת פחמן אשר ישמש את משרדי הממשלה, מפעלים כלכליים ובתי מחסה של הצלב האדום על פני שטח של 100 דונם. תכנית זו מומנה בחלקה ע"י מענק של 5 מיליון דולר מועדת האנרגיה של קליפורניה. המיקרוגרד יופעל ע"י מתקן פוטו וולטאי סולארי של 0.5 מגוואט, מערכת סוללת אגירה של 950 קילוואט, מערכת ביומסה וגנרטור דיזל. המערכת צפויה לפלוט פחמן בהיקף של 150 טון לשנה.

אמינות מערכות המיקרוגרید ואיכות החשמל

אמינות (Reliability) אספקת החשמל מתבטאת בזמינות וברציפות באספקת החשמל לצרכן הקצה, והיא מהווה אחד המרכיבים העיקריים בתכנון מערכות החשמל, בשל חשיבותה וערכה הכלכלי למשק וכן בשל ההשקעות הגבוהות הנדרשות להשגתה. הפרעות חשמל נחלקות בעיקרן לשני סוגים: הפרעות חולפות והפרעות ממושכות. הפרעות חולפות מוגדרות כהפרעות אשר סילוקן מתבצע באופן אוטומטי באמצעות מערכות שליטה ובקרה המותקנות ברשת החשמל והפרעות ממושכות לעומתן דורשות מעורבות אדם בסילוקן. סילוק הפרעה ממושכת כרוך בדרך כלל באיתור מקום ההפרעה באמצעות פעולות מיתוג חוזרות ונשנות ברשת עד לאיתור הקטע בו קיימת הפרעה. לאחר שאותר הקטע בו קיימת ההפרעה נשלחים צוותי עבודה לשטח לצורך סילוק ההפרעה.

פגיעה באמינות אספקת החשמל, כגון אירועים בלתי מתוכננים של הפסקת חשמל, מסבים נזקים כלכליים ואחרים לצרכנים. מערכות מיקרוגרید משפרות את רמת האמינות של צרכן הקצה ומקטינות את מספר ומשך הפרעות החשמל. תועלת האמינות ואיכות החשמל כוללת בתוכה את ההערכה של התועלות הכספיות והלא כספיות אשר מגיעות כתוצאה מהפחתת הסתברות ומשך הפרעות החשמל.

דוגמא

מתקן המיקרוגרید Sendai, הממוקם באוניברסיטת Tohoku Fukushi שביפן. בזמן רעידת האדמה והצונאמי בשנת 2011, כאשר רשת החשמל הכללית נפגעה, המיקרוגרید המשיך לספק חשמל למתקנים השונים תוך שימוש בגנרטורים וסוללות.¹⁵²

רמת אמינות¹⁵³

את רמת האמינות לצרכנים מקובל למדוד באמצעות שלושה מדדים שונים אשר כל אחד מהם מהווה אינדיקציה לרמת השירות המסופקת לצרכן הקצה. כמפורט להלן:

1. **מדד אי אספקה** – מדד זה מציג את ממוצע המשך המצטבר (בדקות) של הפסקות חשמל שהיו ללקוח במשך שנה.

¹⁵² מתוך: <https://www.pwc.com/us/en/technology/publications/cleantech-perspectives/pdfs/pwc-cleantech-the-future-of-microgrids.pdf>

¹⁵³ <https://pua.gov.il/DomesticConsumers/Pages/Handasa5.aspx>
<https://www.iec.co.il/Community/PublishingImages/%D7%A7%D7%99%D7%99%D7%9E%D7%95%D7%AA/%D7%9E%D7%97%D7%95%D7%99%D7%91%D7%95%D7%AA%20%D7%9C%D7%9B%D7%9C%20%D7%9C%D7%A7%D7%95%D7%97.pdf>

השוואת דקות אי אספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל												
2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
272	139	234.4	171.6	132.2	144.9	121.3	123.6	133.5	178.7	134.5	151.1	177.7

2. **מדד תדירות הפסקות החשמל** – מדד זה בוחן את המספר הממוצע של הפסקות החשמל שהיו ללקוח במשך שנה.

השוואת תדירות אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל										
2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	
3.7	2.7	3.2	2.6	2.6	2.7	4	2.9	3.4	3.6	

3. **מדד משך שיקום האספקה** – מדד זה מבטא את משך הזמן הממוצע שארכה כל הפסקת חשמל ללקוח, הוא מתקבל מחלוקת דקות אי האספקה בתדירות האספקה.

השוואת משך שיקום אי האספקה בממוצע ללקוח, בכלל חברת החשמל										
2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	
46.7	48.6	45.9	46.5	47.9	48.8	45.2	46.1	44.2	50	

כפי שניתן לראות קיימת מגמת הרעה בשנים האחרונות גם במדד דקות אי האספקה וגם במדד תדירות אי האספקה על אף הטמעתה של מערכת DMS שאמורה לסייע באיתור ההפרעה ולקצר את זמן הטיפול בה. בין הגורמים למגמה זו ניתן למנות את צמצום ההשקעות ברשת החשמל והתיישנותה.

עלות אי האספקה

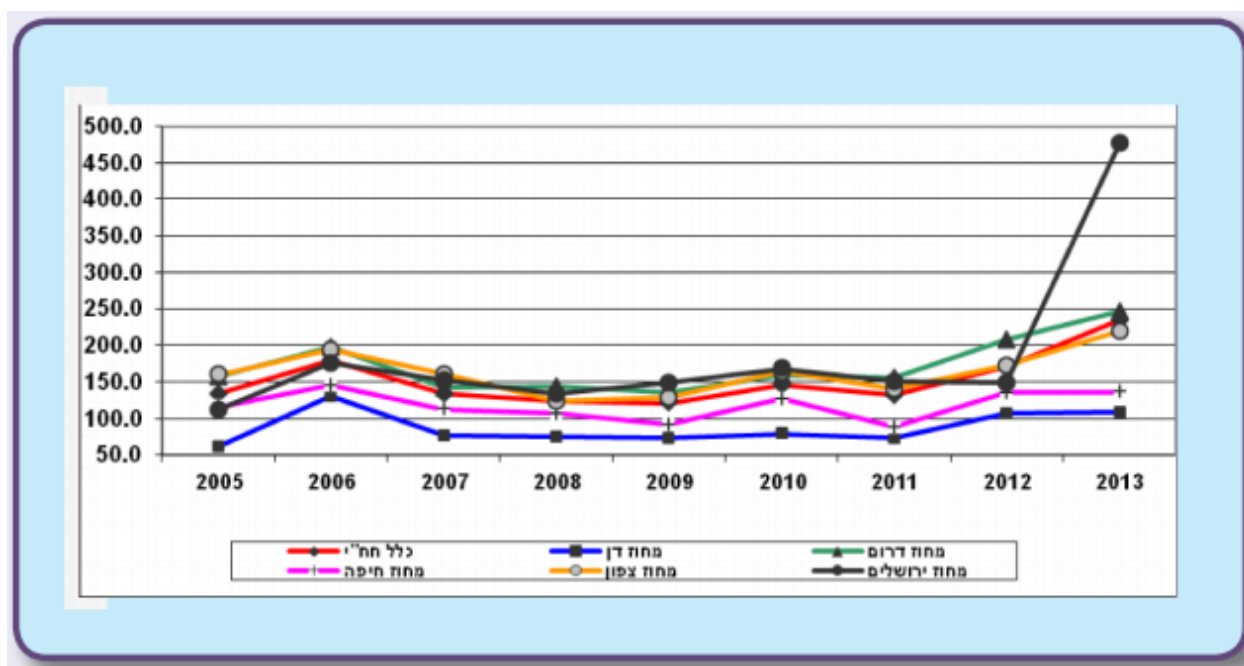
בישראל בוצע מחקר לאמידת עלות אי-אספקת חשמל מצד הביקוש בקרב צרכני החשמל השונים ובו פולגו צרכנים לפי רמות מתח, סוגי צרכנים (צרכני המגזר הביתי, התעשייתי והמגזר המסחרי-ציבורי) וכן לפי עיתוי הצריכה. תוצאות אלה מראות את ההשלכות הכלכליות על צרכני המאקרוגריד בעקבות תקלות.

טבלה 18: עלות אי אספקה משוקללת

עלות לקוט"ש לא מסופק			
שינוי משך הפסקות החשמל	שינוי תדירות הפסקות החשמל	אחוז מסך הצריכה	מגזר
102 ש"ח	111 ש"ח	100%	כלל הצרכנים
70 ש"ח	90 ש"ח	8%	צרכני מתח עליון
60 ש"ח	71 ש"ח	33%	צרכני מתח גבוה
129 ש"ח	136 ש"ח	59%	צרכני מתח נמוך

במגזר הביתי, העלות בגין אי אספקת חשמל לצרכנים ביתיים נקבעה באמצעות אמידת העדפות הצרכן הביתי לשלם או לקבל פיצוי תמורת שיפור או הרעת אמינות אספקת החשמל.¹⁵⁴

מחקר שנעשה עבור משרד האנרגיה האמריקאי מעריך כי הפסקות חשמל ממושכות (מעל 5 דקות) עולות לארה"ב מעל 26 מיליארד דולר בשנה. כמו כן, תועלת זו כוללת בתוכה גם הפחתה בתדירות ניתוקים ופגיעה בצידוד קצה. לאיכות החשמל תפקיד חשוב בכלכלה של היום בגלל הגידול בשימוש במכשירים חשמליים רגישים שעלול להיגרם להם נזק ע"י חשמל באיכות נמוכה. תעשיות הנותנות שירותים פיננסיים ובסיסי נתונים פגיעות מאוד מהפרעות רגעיות באספקת החשמל. צרכני המיקרוגריד נהנים מהאמינות הגבוהה שמספקת מערכת המיקרוגריד בעזרת ייצור אנרגיה פנימי, אחסון הקיבולת והיכולת להתנתק מהמאקרוגריד במקרים של תקלות. נוסף לכך, למערכות המיקרוגריד ישנה תועלת של החזרת אספקת החשמל במהירות כאשר ישנה תקלה במיקרוגריד.¹⁵⁵

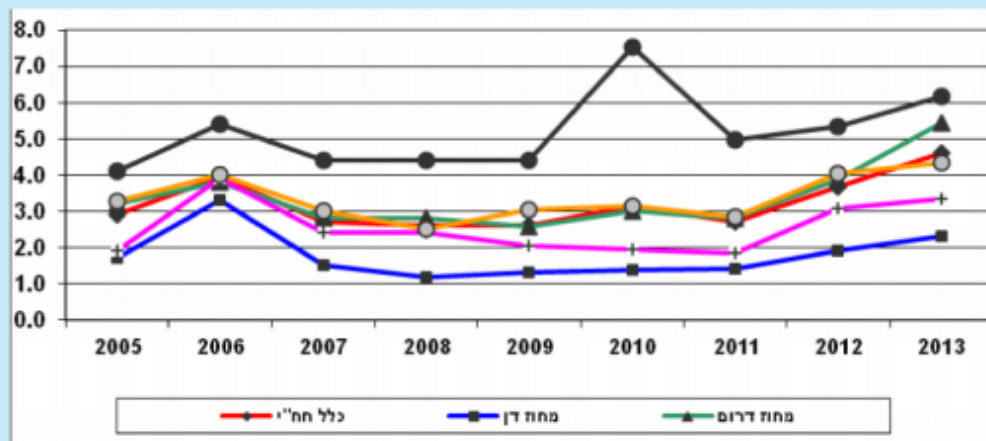


גרף 13: דקות אי-אספקה¹⁵⁶

¹⁵⁴ מתוך: <http://energy.gov.il/gxmsnpublications/aluthashmal.pdf>

¹⁵⁵ מתוך: <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Electric-Power-Delivery/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf>

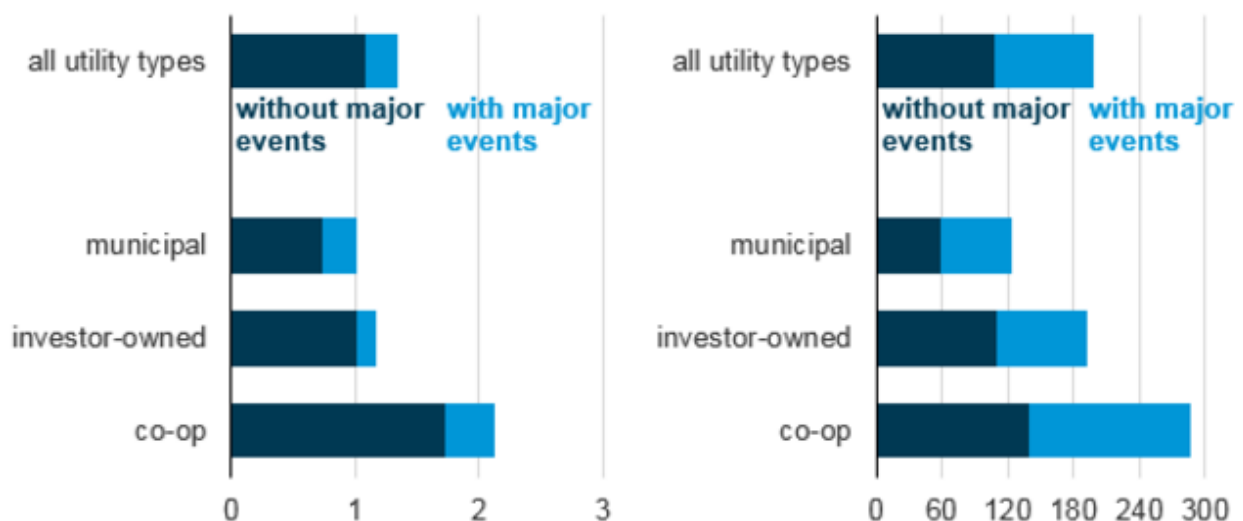
¹⁵⁶ מתוך: https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/doch_reslut_2015.pdf



גרף 14: תדירות הפסקות חשמל

בארצות הברית, שיבושים בשירותי החשמל משתנים לפי תדירות ומשך הפסקות החשמל ברחבי המדינה. שירותי החשמל פרוסים על פני מערכות חלוקה רבות אשר נותנות שירות ל-145 מיליון צרכנים בארה"ב. למרות שלחלק מהצרכנים ישנו גנרטור אשר נותן גיבוי בעת הצורך, מרבית הצרכנים נותרים ללא חשמל כלל בעתות של הפסקת חשמל. הרשויות יכולות לסווג אם הפסקות חשמל אלו התרחשו במהלך אירועים חריגים כגון: סופת שלגים, הוריקן, הצפות או גלי חום, כאשר יש לשים לב שאירוע חריג באזור מסוים יכול שלא להיחשב כחריג באזור אחר (למשל, סופת שלגים באזור מושלג שזה קורה בו פעמים רבות אינה נחשבת כאירוע חריג). אירועים חריגים אלו עלולים לגרום להפסקות חשמל ארוכות.

Average electric power service interruptions per customer by utility type, 2015
frequency (number of instances) total duration (minutes)



Source: U.S. Energy Information Administration, *Annual Electric Power Industry Report (EIA-861) 2015 early release*

גרף 15: ממוצע תדירות ומשך הפסקות החשמל עבור צרכנים מסוגים שונים בארצות הברית¹⁵⁷

גורמים המשפיעים על רמת האמינות

רמת האמינות של רשת החשמל נגזרת מפרמטרים רבים כגון: גיל הקו, אורך הקו, סוג הקו (עילי, תת קרקעי או מעורב) סוג הציוד המותקן בקו, מספר המפסקים המותקנים בקו, מזג האוויר בסביבת הקו וכד'. מבין הגורמים הרבים המשפיעים על רמת האמינות בקו, אורך הקו וסוג הקו הינם הפרמטרים המשפיעים ביותר על רמת האמינות בו.

אורך קווי החשמל

רמת האמינות לצרכנים המחוברים לקווים ארוכים או עיליים באופן אינהרנטי נמוכה מרמת האמינות של צרכנים המחוברים לקווים קצרים או תת קרקעיים.

מדד דקות אי אספקה ללקוח ברמת הישוב/ המחוז (נתוני 2013)

גיל רשת חשמל עילית ותת קרקעית בישראל: ¹⁵⁸

בטבלה אפשר לראות את אורך הרשת בהתאם לגיל ובהתאם לסוג הרשת. מקובל לראות ברשת שהיא בגיל של 30 שנה או יותר, כפוטנציאלית להחלפה. רשת בגיל של 45 שנים ויותר, מיצתה את אורך החיים הפיזי שלה, ועל

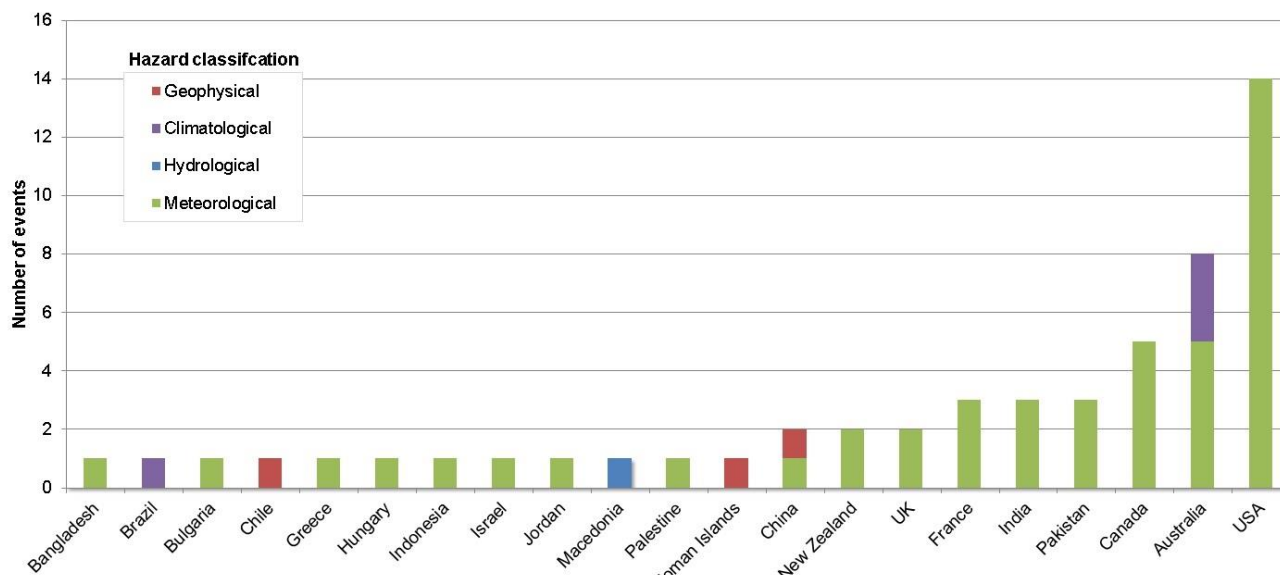
¹⁵⁷ מתוך: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27892>

¹⁵⁸ מתוך: https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/doch_reslut_2015.pdf

כן יש להחליפה. כפי שניתן לראות נדרשת השקעה בהיקף נרחב בעשור הקרוב, לצורך חידוש רשתות חלוקה מתח גבוה ומתח נמוך. השקעה זו צפויה לשפר את רמת אמינות האספקה במשק, ולפיכך, הרשות בוחנת מנגנונים שונים לקביעת יעדים לאמינות אספקה, ובכלל זה מנגנון קנס/פרס לספקי שירות חיוני.

טבלה 19 : גיל רשת חשמל עילית ותת קרקעית

רשת מתח גבוה				רשת מתח נמוך				
עילית		תת קרקעית		עילית		תת קרקעית		
גיל הרשת	אורך רשת (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאלית לחידוש (ק"מ)	אורך רשת (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאלית לחידוש (ק"מ)	אורך רשת (ק"מ)	אורך רשת פוטנציאלית לחידוש (ק"מ)	אורך רשת (ק"מ)	
30 שנה ויותר	11,070	6,640	1,100	1,050	6,740	40,50	2,890	2,750
45 שנה ויותר	7,010	4,210	220	210	4,120	2,470	1,030	980
50 שנה ויותר	5,580	3,350	130	120	3,260	1,950	810	770



גרף 16: אירועים הקשורים למזג האוויר שגרמו להפסקות חשמל בעולם ב-2013¹

שיפור רמת האמינות לצרכנים קריטיים

ביטחון ובריאות- שירותי הבריאות, האבטחה והביטחון הם שירותים קריטיים. שירותים אלו כוללים את הצבא, המשטרה, שירותי הכבאות וההצלה, מענה רפואי דחוף, בתי חולים ומתקנים רגישים נוספים. אספקתם של שירותים אלו משפיעה על כלל האוכלוסייה ובפרט על הצרכן הפרטי בעיקר במקרים של מפגעי טבע או התקפות איבה. תחזוקה של שירותים אלו תתרום להפחתה או מניעה של מקרי מוות, פציעות ופגיעה ברכוש אשר יכולים להתרחש כתוצאה מהפסקות חשמל. מערכת המיקרוגריד המופעלת במצב מבודד מסוגלת להמשיך ולספק חשמל עבור שירותים אלו. לדוגמא: אם פרויקט המיקרוגריד צפוי לספק 50% מהספק בתי החולים, אז התועלות בתחומי בריאות וביטחון הציבור צפויים להיות שווים ל-50% מהנזקים אשר יקרו במקרה של הפסקת חשמל כאשר בית החולים אינו מחובר למערכת המיקרוגריד.¹⁵⁹

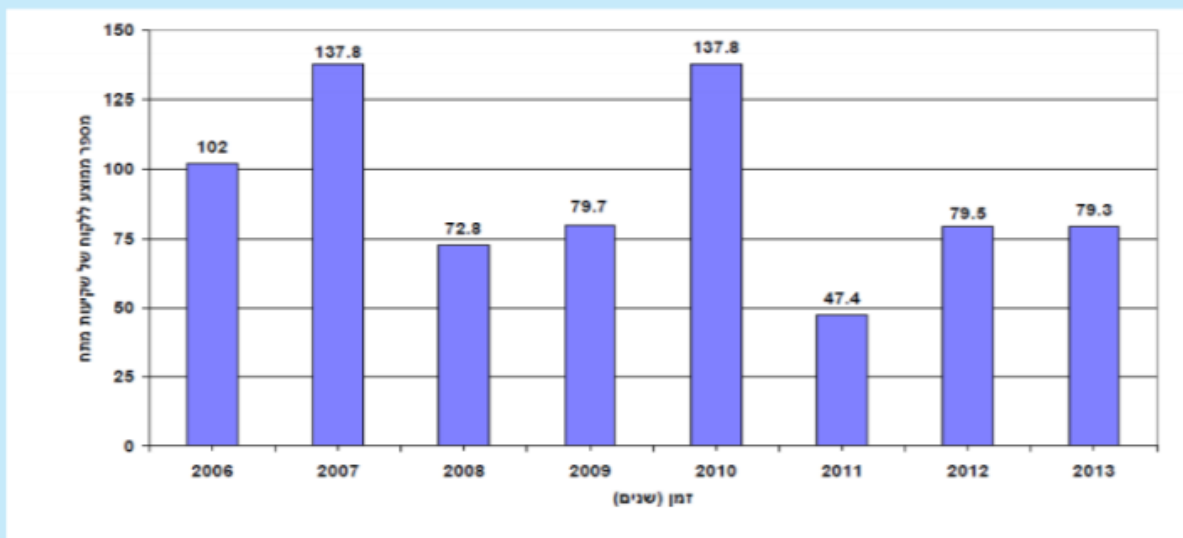
מערכות מחשוב רגישות ומאגרי מידע- מערכות מחשבים והתקנים אלקטרוניים אחרים מכילים מעגלים הרגישים לאובדן נתונים או לנזק לחומרה. מצב זה יכול להיגרם בעקבות אובדן פתאומי של כוח. אלו יכולים לכלול נתונים, ציוד רשתות, מקרני וידאו, מערכות אזעקה ומחשבים. מערכת מיקרוגריד המופעלת במצב מבודד מסוגלת להמשיך ולספק חשמל עבור שירותים אלו.

צבא- הצבא משתמש במכשור טכנולוגיות ומאגרי נתונים רגישים ביותר, אשר פגיעה באספקת החשמל אליהם עלולה לגרום הן לנזק כלכלי (עלותם גבוהה) והן לנזק לפעילות שוטפת ותקינה. מערכת מיקרוגריד המופעלת במצב מבודד מסוגלת להמשיך ולספק חשמל עבור שירותים אלו.

איכות החשמל

איכות חשמל נותנת ביטוי לטיב החשמל ברשת החשמל ולרמת העיוותים בו באספקה רציפה של חשמל. אמות המידה מטעם רשות החשמל מגדירות ערכים חשמליים מינימאליים בהם נדרש ספק שירות חיוני לעמוד, בין היתר בפרמטרים של מתח ותדר הרשת. עיוותים אלה גורמים לאיכות חשמל ירודה כגון, הבהוב של נורות, והם עלולים אף לגרום לנזקים למכשירים ולמתקני חשמל. נתוני איכות החשמל המצויים ברשות החשמל מנוטרים משנת 2005 ברשת המתח העליון וברשת המתח הגבוה. מנתונים אלה עולה כי איכות החשמל בישראל תואמת לתקנים בינלאומיים. לפיכך, החליטה הרשות בשנת 2013 על קביעת רמת שירות מינימאלית של איכות חשמל לצרכן ויצרן, אולם בשלב זה, מבלי לקבוע מנגנון פיצוי. להלן תמונת המצב בפרמטרים שונים של איכות חשמל במשך לשנת 2013

¹⁵⁹ מתוך: <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Electric-Power-Delivery/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf>

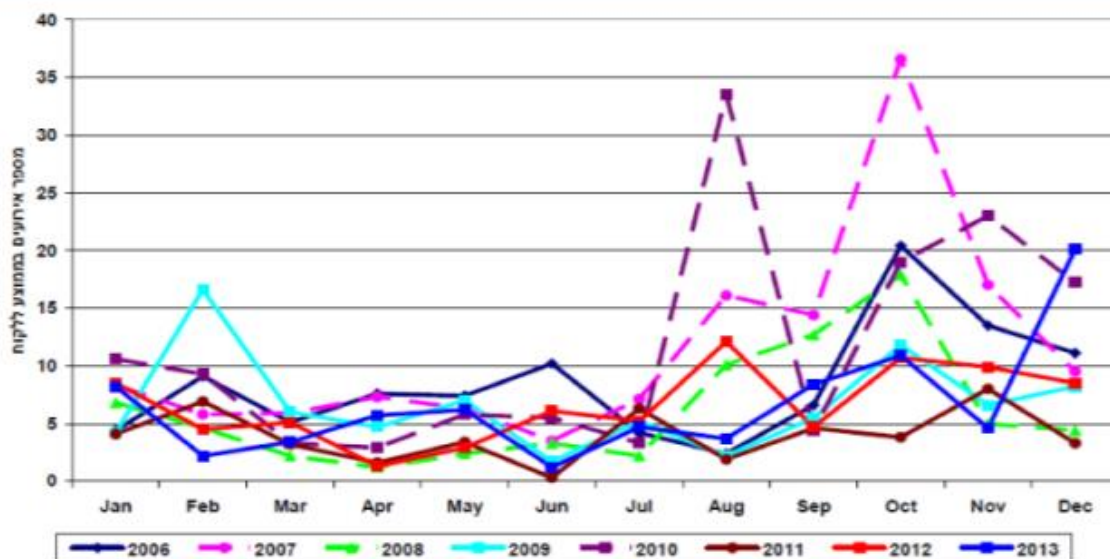


מקור: דוח איכות חשמל לצרכני מתח עליון לשנת 2013 - חח"

גרף 17: התפלגות שנתית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מ"ע

שקיעת מתח הינה ירידה רגעית (עד דקה) ברמת המתח עד ל-5% מהרמה הנדרשת. זהו אחד הפרמטרים לקביעת איכות החשמל. התרשים מציג את ממוצע מספר שקיעות המתח בהתפלגות שנתית לצרכן/יצרן בשנים האחרונות, ומצביע על שיפור משמעותי בין 2010-2011 ולאחר מכן החמרה במספר האירועים בשנה.

גרף 17 מציג את ממוצע מספר שקיעות המתח בהתפלגות חודשית לצרכן/יצרן בשנים האחרונות, ומצביע על החמרות עונתיות בפרמטר זה, המיוחסות לתקופות עומס (חורף וקיץ), ולמבדדים מאובקים (בתחילת הסתיו). ביחס לשנים קודמות מדובר בביצועים דומים, למעט החמרה בחודש דצמבר. התקיימה עמידה בתקנים בינלאומיים וישראליים.



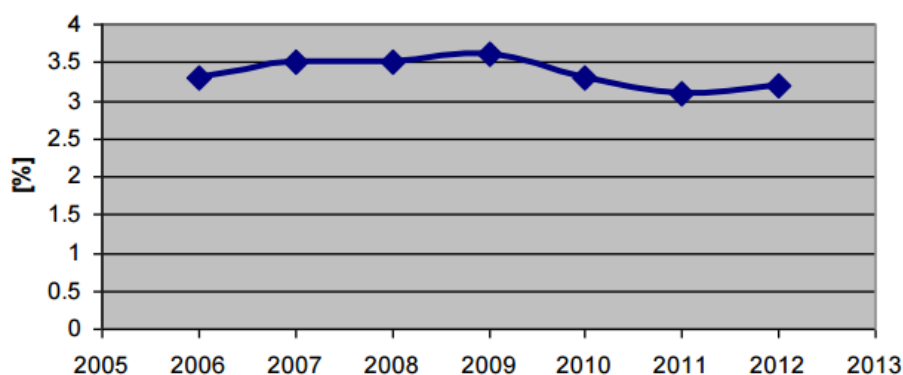
מקור: דוח איכות חשמל לצרכני מתח עליון לשנת 2013 - חח"

גרף 18: התפלגות חודשית של שקיעות מתח בממוצע לצרכן מ"ע

מדדים נוספים לאיכות החשמל:¹⁶⁰

עיוותים הרמוניים במתח (THD) - עיוות הרמוני הינו היחס באחוזים בין גל המתח/הזרם המעוות לגל המתח/הזרם הבסיסי, והוא שווה לשורש של סכום ריבוע הרמוניות המתח/הזרם הבודדות עד להרמוניה ה-40.

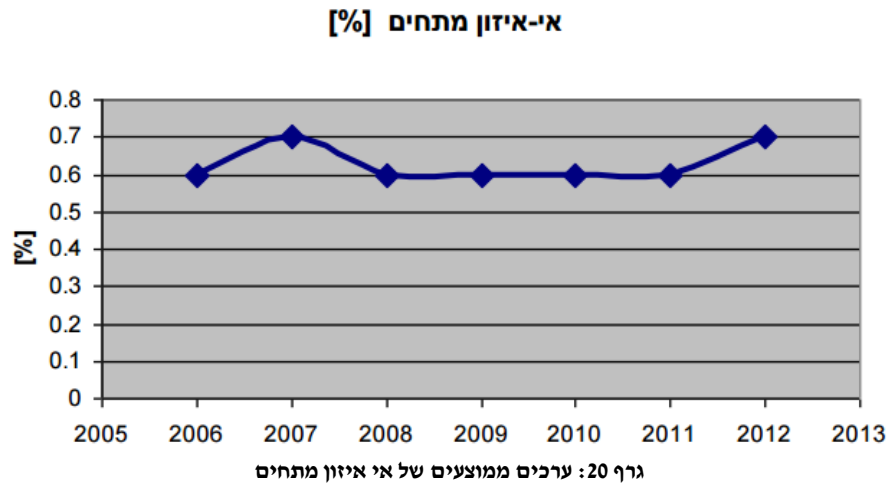
מתח הרמוני THD



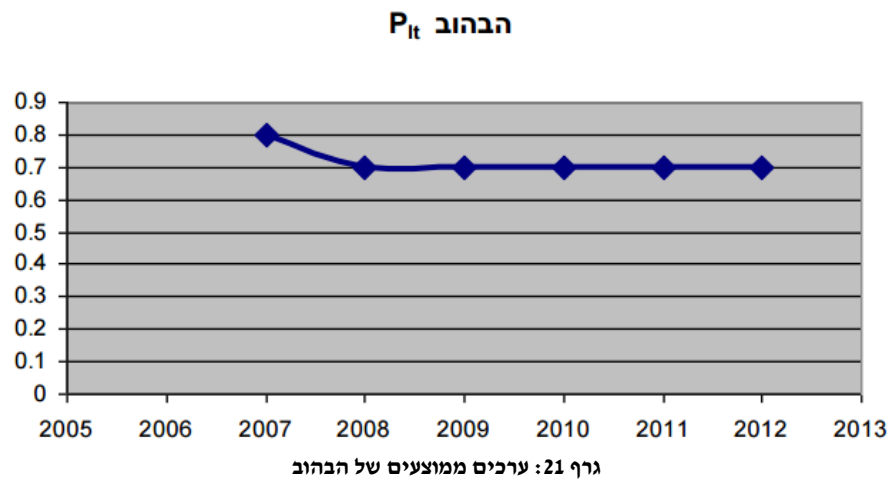
גרף 19: ערכים ממוצעים של מתח הרמוני

¹⁶⁰ מתוך: <http://www.seeei.org/PQ/201307/130711-04.pdf>
<https://pua.gov.il/Standards/Documents/41.pdf>

אי איזון מתח – מצב, במערכת תלת פאזית, בו ערכי ה S.M.R של המתחים השלובים או הפרשי המופע בין פאזות סמוכות אינם שווים.



עוצמת הבהוב – הבהוב מתח הוא אי יציבות חשמלית הנגרמת כתוצאה מסדרה של שינויים מחזוריים במעטפת גל המתח.



ישראל 2012							חברת החשמל חטיבת משאבים אסטרטגיים אגף תכנון פיתוח וטכנולוגיה מעבדת חשמל למ"פ	
ערך מרבי שנתי ללקוח						ערך מרבי לפי המלצת התקן EN 50160	פרמטר	
דרום	דן	חיפה	י-ם	צפון	ארצי			
5.7	5.3	4.7	3.9	6	6	8	סה"כ מתח הרמוני U _{thd} (%)	
1.7	1.1	0.9	0.8	2.8	2.8	2	אי איזון מתחים E (%)	
3.3	0.7	0.9	1.1	1.3	3.3	1	עוצמת ההבהוב P _{lt} [pu]	
						50.5	(max)	תדר (Hz)
						49.5	(min)	
8.5	3.4	8.5	8.8	9	9	+10	(max)	שינויי מתח U (%95)
-5.1	-4.7	-2.9	-7.4	-10.4	-10.4	-10	(min)	
9.5	5	8.9	9.5	9.9	9.9	+10	(max)	שינויי מתח U (%99)
-6.3	-6.9	-6.4	-8.3	-11.1	-11.1	-10	(min)	

תועלות סביבתיות

בתהליך ייצור החשמל נפלטות לאטמוספירה סוגים שונים של תוצרי לוואי משריפת דלק. העיקריים שבהם הינם: גופרית דו-חמצנית (SO₂), תחמוצות חנקן (NO_x), חומר חלקיקי (PM) ופחמן דו-חמצני (CO₂). על פי המשרד להגנת הסביבה, משק החשמל בישראל הוא בין הגורמים העיקריים לזיהום אוויר מפליטת מזהמים הנוצרים משריפת דלק. תחנות הכוח בישראל פולטות כ-65% תחמוצות גופרית, 45% תחמוצות חנקן, 38% חלקיקים, ו-60% פחמן דו חמצני, מסך הפליטה השנתית של מזהמים אלה במדינת ישראל¹⁶¹.

המשרד לאיכות הסביבה פרסם את העלויות החיצוניות הנובעות כתוצאה מזיהום האוויר בעת ייצור חשמל¹⁶²:

טבלה 21: עלויות חיצוניות של זיהום אוויר מייצור חשמל

חשמל		מזהם
1.1.2016	1.1.2015	
ש"ח לטון	ש"ח לטון	
40,776	39,400	SO ₂
23,615	22,818	NO _x
81,643	78,889	PM _{2.5}

¹⁶¹ מתוך: <http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/SvivaAir/Electricity/Pages/default.aspx>

¹⁶² מתוך: <http://www.sviva.gov.il/subjectsenv/svivaair/documents/airexternalcost/airexternalcoast2016.pdf>

58,201	56,238	PM ₁₀
119	119	CO ₂

התועלות הסביבתיות של מערכת המיקרוגריד כוללת הפחתה וצמצום של פליטת מזהמים לסביבה. הפחתה זו נובעת כתוצאה משימוש באנרגיות מתחדשות כגון רוח וסולארי, שימוש יעיל יותר בייצור בדלקים פוסיליים כמו ב-CHP, אמצעים להתייעלות אנרגטית והפחתת צריכת החשמל בין היתר בגין אופטימיזציה של אמצעי הייצור. תועלת זו משפיעה באופן ישיר על הציבור והצרכנים בפרט ע"י צמצום הפגיעה בבריאות ובסביבה. כמו כן, שימוש באנרגיות מתחדשות מקטין את פליטת הפחמן ותורם למיתון השינויים באקלים. בעזרת צמצום הדרישה לחשמל מהמאקרוגריד, המיקרוגריד יכול להפחית את פליטת המזהמים.

רשות החשמל תמחרה את עלות הזיהום הנחסך בעזרת פרמיות ליצרני חשמל באנרגיה מתחדשת (הפרמיה ניתנת כתוצאה מייצור חשמל באנרגיה מתחדשת אשר גורמת להפחתה בפליטת מזהמים).¹⁶³

טבלה 22: פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות

לוח 11.2-11.1: פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות באגורות לקו"ט"ש

פרמיה (אגורות לקו"ט"ש)							
עונה	מש"ב	חלקיקים	תחמוצות חנקן	תחמוצות גופרית	פחמן דו חמצני (למעט carbon neutral)	סה"כ (100% מהפרמיה)	
חורף	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
מעבר	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	
קיץ	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_S * 1.394)$	$2.559 - (P_C * 0.003)$	9.692	
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_S * 1.394)$	$1.734 - (P_C * 0.003)$	6.110	
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_S * 1.394)$	$2.821 - (P_C * 0.003)$	8.162	

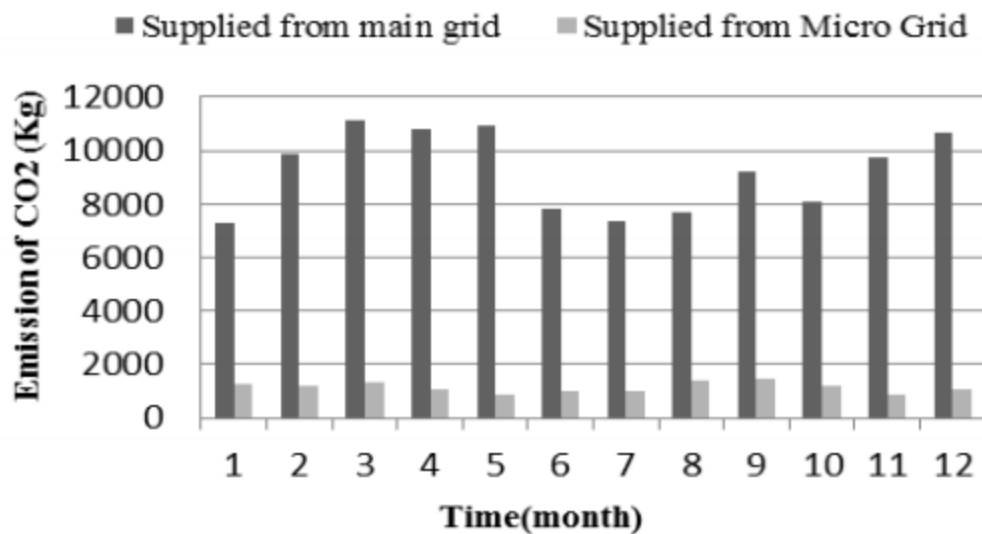
P_p = רמת פליטת חלקיקים ביחידות גרם/קו"ט"ש

P_N = רמת פליטת תחמוצות חנקן ביחידות גרם/קו"ט"ש

P_S = רמת פליטת תחמוצות גופרית ביחידות גרם/קו"ט"ש

P_C = רמת פחמן דו חמצני למעט פחמן נייטרלי ("carbon neutral") ביחידות גרם/קו"ט"ש

¹⁶³ מתוך: <https://pua.gov.il/rates/documents/110102.pdf>



גרף 22 : פליטת CO2 ממערכות מיקרוגרید לעומת מערכות רגילות¹⁶⁴

דוגמא¹⁶⁵

פרויקט א': מיקרוגרید שאינו מחובר לרשת: מתוכנן להגיע למערכת ייצור PV של KWP150 ומתקן אנרגיית רוח של 20 KW עם תצורת אחסון של 100KWx2h סוללות ליתיום. ההשוואה בודקת שתי אפשרויות, האחת כאשר ההספק מחובר לתחנת כוח והשנייה כאשר הוא מחובר למיקרוגרید. ניתן לראות שהוצאות בנייה ותפעול נמוכות יותר כאשר ההספק מחובר למיקרוגרید, כמו כן, עלות החשמל נמוכה יותר במקרה זה.

הספק בחיבור למיקרוגרید	הספק בחיבור לתחנת כוח	
6.595	8.1	עלות בנייה כוללת (במיליוני RMB)
0.193	0.225	עלות תפעולית (במיליוני RMB לשנה)
אחסון מתקן: 1 מיליון RMB ל-5 שנים	עלות ייצור: 0.105 מיליון RMB לשנה	עלויות אחרות
אנרגיית רוח: 2030, פי.וי: 1360	/	שעות ייצור (בשעות)
239	239	קיבולת ייצור שנתית (ב-MWH)
0	7.1	הוצאות חיבור לרשת (במיליוני RMB)
0	0.6	הוצאות בניית של גנרטור/רשת (במיליוני RMB)
0	0	תועלות עקיפות
0	0	Light abandon (ב-MWH)
3.76	4.05	מחיר עלות חשמל (RMB/ KWH)

¹⁶⁴ הגרף לקוח מתוך: http://www.iaeng.org/publication/IMECS2015/IMECS2015_pp626-629.pdf

¹⁶⁵ מתוך: <http://www.ijsgce.com/uploadfile/2015/0831/20150831110021578.pdf>

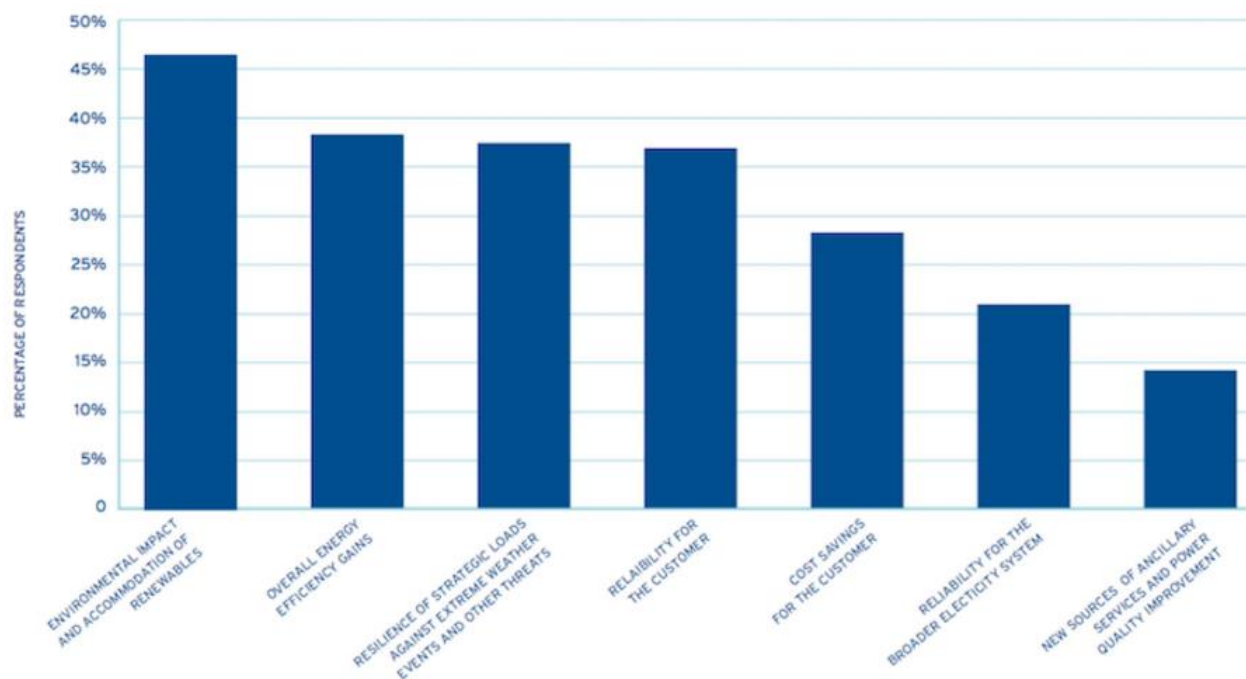
פרוייקט ב': מיקרו גריד המחובר לרשת: מתוכנן לבנות 15 שנאים של 10KV/0.4KV ב-9 אזורים עם קיבולת של 1,250 KVA כל אחד. יכולת הייצור הפוטוולטאית המקסימלית של הפרוייקט היא 13.4 MWP. ההשוואה בודקת שתי אפשרויות, האחת PV המחובר ישירות לרשת והשנייה מיקרוגריד מובנה. ניתן לראות כי העלויות גבוהות יותר במיקרוגריד. (טבלה 23 להלן מציגה דוגמה מאונטריו)¹⁶⁶

מיקרוגריד	פי. וי המחובר לרשת	
432.4	338.4	עלות בנייה כוללת (במיליוני RMB)
6.92	1.09	עלות תפעולית (במיליוני RMB לשנה)
אחסון מתקן: 108 מיליון RMB ל-5 שנים	0	עלויות אחרות
960	1179	שעות ייצור (בשעות)
12960	15800/12640	קיבולת ייצור שנתית (ב-MWH)
1.35	0.45	הוצאות חיבור לרשת (במיליוני RMB)
18.9	86.8	הוצאות בניית של גנרטור/רשת (במיליוני RMB)
שימור אנרגיה: 0.3 RMB/KWH, מס פחמן: 10 RMB לטון	שימור אנרגיה: 0.3 RMB/KWH, מס פחמן: 10 RMB לטון	תועלות עקיפות
2840	0	Light abandon (ב-MWH)
4.7	2.11	מחיר עלות חשמל (RMB/ KWH)

טבלה 23: ערכם של תועלות הקמת המיקרוגריד באונטריו (באחוזים)

¹⁶⁶ מתוך: <https://www.marsdd.com/systems-change/advanced-energy-centre/news/industry-wide-perspective-on-microgrids-in-ontario>

What is the largest source of value to be realized from microgrid development in Ontario?



גרף 23: מה מקור הערך במיקרוגריד באונטריו, קנדה?

תועלת	תועלת כלכלית	תועלת בתחום האישי והשירותי	תועלת סביבתית
תחום האנרגיה	* חיסכון בעלויות החשמל * צמצום הפסדים אשר נגרמים כתוצאה מאיבודי חשמל בזמן הולכה וחלוקה * הגבלת כמות האנרגיה הנצרכת בעזרת מערכת חכמה אשר מייעלת את הצריכה	* אספקת שירותים נלווים בצורה יעילה יותר * יכולת ניהול ומעקב * העצמת הצרכן והגברת המודעות	* שימוש באנרגיות מתחדשות הגורם לפליטת מזהמים מצומצמת יותר
אמינות המערכת ואיכות החשמל	* חיסכון בעלויות הנובע מניתוב יעיל של זרימת החשמל * חיסכון בעלויות אשר היו נגרמות כתוצאה מפגיעה מטכנולוגיות רגישות * חיסכון בעלויות אשר היו נגרמות כתוצאת מאי אספקת חשמל	* הפחתת הסתברות ומשך הפסקות החשמל * החזרת אספקת החשמל במהירות כאשר ישנה תקלה במיקרוגריד * הפחתה בתדירות הניתוקים * צמצום אפשרות הפגיעה במכשירים חשמליים רגישים	
ביטחון ובריאות	* חיסכון בעלויות הנגרמות כתוצאה מפציעות ופגיעה ברכוש	* הפחתה או מניעה של מקרי מוות, פציעות ופגיעה ברכוש אשר יכולים להתרחש כתוצאה מהפסקות חשמל	
סביבה	* חיסכון בעלות של זיהום האוויר * חיסכון בעלויות בשל שימוש באנרגיות מתחדשות אשר מזהמות פחות * תמחור הזיהום – הענקת פרמיות בשימוש באנרגיות מתחדשות	* צמצום הפגיעה בבריאות האוכלוסייה	* הפחתה או מניעה של מקרי מוות, פציעות ופגיעה ברכוש אשר יכולים להתרחש כתוצאה מהפסקות חשמל * מיתון השינויים באקלים

ביבליוגרפיה:

- אמצעים לניטור צריכת החשמל של עומסים ביתיים ומסחריים קטנים, חברת החשמל
<https://www.iec.co.il/ElectricityProfessionals/DocLib4/NITUR.pdf>
- הכירו: הקיבוץ הראשון בישראל עם רשת חשמל חכמה משלו, גלובס, 2015
<http://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001085074>
- הפחתת זיהום אוויר מייצור חשמל, המשרד להגנת הסביבה
<http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/SvivaAir/Electricity/Pages/default.aspx>
- עדכון ערכי העלויות החיצוניות של מזהמי האוויר וגזי חממה ל-1.1.2016, המשרד להגנת הסביבה, 2016
<http://www.sviva.gov.il/subjectsenv/svivaair/documents/airexternalcost/airexternalcoast2016.pdf>
- פרמיות ליצרנים פרטיים באנרגיות מתחדשות באגורות לקוט"ש, רשות החשמל
<https://pua.gov.il/rates/documents/110102.pdf>
- תוצאות מחקר אומדן עלות אי אספקת חשמל על צד הביקוש, משרד התשתיות הלאומיות, 2011
<http://energy.gov.il/gxmsmnipublications/aluthashmal.pdf>
- Advantages & Disadvantages Of Solar Power, [Zachary Shahan](#), 2013
<https://cleantechnica.com/2013/10/08/advantages-disadvantages-solar-power/>
- Community microgrids: Smarter, Cleaner, Greener. Thomas Bourgeois, Jordan Gerow, Franz Litz and Nicholas Martin
[http://energy.pace.edu/sites/default/files/publications/Community%20Microgrids%20Report%20\(2\).pdf](http://energy.pace.edu/sites/default/files/publications/Community%20Microgrids%20Report%20(2).pdf)

Comprehensive benefits analysis and economic evaluation of microgrid, ➤

International Journal of Smart Grid and Clean Energy

<http://www.ijsgce.com/uploadfile/2015/0831/20150831110021578.pdf>

Economic and Environmental Impact Assessment of Micro Grid, Su Youli, ➤

Member, IEEE, 2015

http://www.iaeng.org/publication/IMECS2015/IMECS2015_pp626-629.pdf

Microgrids for Critical Facility Resiliency in New York State, final report- December ➤

2014, nyserda

<https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Electric-Power-Delivery/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf>

The business case for microgrids, Robert Liam Dohn ➤

https://w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/microgrid/Documents/The%20business%20case%20for%20microgrids_Siemens%20white%20paper.pdf

The Future of Microgrids Their Promise and Challenges, 2012 ➤

<https://www.pwc.com/us/en/technology/publications/cleantech-perspectives/pdfs/pwc-cleantech-the-future-of-microgrids.pdf>

7 benefits of microgrids, Interesting Engineering, 2015 ➤

<http://interestingengineering.com/7-benefits-of-microgrids/>

נספח 5: שירותים נלווים

שירותים נלווים הינם תוספות הנדרשות על מנת לתפעל מערכת חשמלית. שירותים אלה מסופקים על ידי מפעיל המערכת, שירות ההפצה המקומי ו/או משתמשי מערכת החשמל.¹⁶⁷

שירותים נלווים מתייחסים לפעולות אשר עוזרות למפעילי הרשת לשמור על אמינות האספקה במערכת החשמל. השירותים הנלווים שומרים על זרימת חשמל בתדר ובכיוון נכון, מאזנים בין הביקוש להיצע ומסייעים למערכת להתאושש מאירועי הפסקות חשמל. במידה ומערכת החשמל כוללת אנרגיות מתחדשות ישנו צורך בשירותים נלווים נוספים על מנת לאפשר יותר אמינות וודאות יותר גבוהה.¹⁶⁸

כתלות במבנה המערכת הארצית, בגודל המיקרוגרید ובגודל נקודת החיבור, המיקרוגרید יכול לספק שירותים נלווים ברמות ההולכה והחלוקה. ברמת ההולכה, השירותים הנלווים כוללים: ויסות, תמיכה בהספקים, ייצוב תדר ושירותי התנעה שחורה. ברמת החלוקה, השירותים הנלווים כוללים בעיקר שירותי עזר בתחומי ניהול הביקושים האזורי.

השירותים הנלווים כוללים:

1. **ויסות מסונכרן (Synchronized Regulation)** - שירות אשר נועד לתמוך ברשת באמצעות תיקון עבור שינויים רגועים (בטווח הקצר) באיזון המערכת אשר עלולים להשפיע על יציבותה של המערכת.
2. **התנעה שחורה (Black Start)** – יכולת התנעת יחידת ייצור חשמל באתר במצב עלטה.¹⁶⁹ אספקת חשמל עבור הפעלה מחדש ושחזור המערכת במקרים חריגים של הפסקות חשמל בכלל הרשת. התנעה שחורה הינה פעולה מסובכת ויקרה אשר עשויה לארוך זמן רב בהתאם לסוג הטכנולוגיה החל ממספר דקות בטורבינות גז גמישות ועד ליותר מ-24 שעות בתחנות פחמיות.
3. **אגירה שאובה (Pumped Storage)** - [אנרגיה](#) הנשמרת בצורה של [אנרגיה פוטנציאלית](#), בדרך כלל על ידי שאיבת מים ממאגר נמוך למאגר גבוה. מתקני האגירה השאובה הינם בעלי זמן תגובה מהיר (90-150 שניות) מאפיין המאפשר למנהל המערכת להגיב במהירות לשינויים בעומס הקיים במערכת.¹⁷⁰
4. **השלת תדר (Load Shedding)** – על מנת לשמור על תפקוד תקין מערכת החשמל נדרשת לשמור בכל רגע נתון על איזון בין הביקוש להיצע. כאשר יחידות הייצור בתחנות הכוח פועלות כסדרן, נשמר איזון בין הביקוש וההיצע במשק ומערכת החשמל שומרת על יציבות התדר (תדר החשמל בישראל הינו כ-50 הרץ). בעת תקלה ביחידת ייצור גדולה, התדר במערכת יורד ועלול לסכן את יציבות מערכת

¹⁶⁷ מתוך: <https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/report-lbnl-4981e.pdf>

¹⁶⁸ מתוך: <http://greeningthegrid.org/integration-in-depth/ancillary-services>

¹⁶⁹ מתוך: רשות החשמל, החלטה 460 (3) קביעת תעריף בגין שירותי התנעה שחורה, 20.4.2015
https://pua.gov.il/decisions/documents/965_460_3_20042015.pdf

¹⁷⁰ מתוך:

https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94_%D7%A9%D7%90%D7%95%D7%91%D7%94

החשמל כולה. על מנת להגיע לייצוב מיידי של המערכת משתמשים בפתרון של ניתוק מהיר של צרכנים באופן אוטומטי, ללא הודעה מראש או בזמן תגובה מינימאליים עד להגעה לאיזון והחזרת התדר לטווח התקין.¹⁷¹

5. רזרבה סובבת (Spinning Reserve) - רזרבת אנרגיה שניתן לחבר לרשת החשמל בהתראה של 10 דקות ולהפעיל לפחות במשך שעותיים ממועד החיבור. מטרת הרזרבה הסובבת היא לפצות באופן מהיר על אי התאמות ברשת בין ביקוש להיצע. תרחיש הייחוס לאירוע כזה הינו נפילת תחנת הכוח הגדולה ביותר הקיימת במשק. אי לכך על מנת לשמור על מרווח ביטחון מספק יש להחזיק רזרבה סובבת בהספק השווה בגודלו לאותה התחנה. בישראל נקבע שיעור הרזרבה הסובבת על 600 MW. ניתן להשאיר את הטורבינות של הגנרטור הרזרבי במצב מסתובב גם כאשר אינן מייצרות אנרגיה, על מנת לצמצם את פרק הזמן הנדרש לחיבורן לרשת. לחלופין, ניתן לייצר אנרגיה בתחנת הכוח בהספק לא מקסימלי (לדוג' 85%) כאשר ההספק הלא מנוצל (15%) משמש כרזרבה סובבת למערכת. ניתן להגיע לסך ההספק הרצוי על ידי צבירת מספר תחנות בהספק לא מקסימלי המחוברות למערכת.¹⁷²

כניסתם של האנרגיות המתחדשות למשק החשמל וחלקם ההולך וגדל כאחוז מהייצור המשקי, הפכו את האנרגיות המתחדשות למשתנה משמעותי המשפיע על הצורך ברכישת שירותים נלווים על ידי מנהל המערכת. לשימוש באנרגיות מתחדשות ישנם שלושה היבטים מרכזיים המשפיעים על השיקולים לרכישת השירותים הנלווים:

4. השינויים התכופים ואי הוודאות בתחום אנרגיות הסרוגיות (הרוח והשמש) מצריכים מגוון רחב יותר וכמות גדולה יותר של שירותים נלווים אשר משפיעים על תימחורם של שירותים אלו.
5. סך ההשפעות של אנרגיות מתחדשות משתנה בהתאם לתנאי המערכת כגון מזג האוויר באזור, שעות היום ועוד, מה שגורם לדרישות לשירותים הנלווים להיות מסובכות יותר על מנת ליצור התאמה לזמנים שונים ומערכות שונות.
6. השירותים הנלווים מאפשרים לאנרגיות המתחדשות לספק יותר אנרגיה למערכת, אך הדבר עשוי להוות אתגר בשל התכונות השונות המאפיינות כל סוג של מקור אנרגיה.

תועלות המיקרוגרید¹⁷³

בנוסף לאספקת חשמל לצרכני המיקרוגריד, יש באפשרותו לספק שירותים נלווים אשר תומכים בפעולות הרשת הארצית. אספקת שירותים אלה עלולה לגרום לעלויות תפעוליות נוספות אך מנגד, בתמחור נכון, עשויה להוות

¹⁷¹ מתוך: <https://pua.gov.il/DomesticConsumers/Pages/Handasa3.aspx>

¹⁷² מתוך: http://ceic.tepper.cmu.edu/-/media/files/tepper/centers/ceic/publications/phd%20dissertations/2006/doug_king_phd_thesis_2006%20pdf.pdf?la=en

¹⁷³ מתוך: <http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf>

מקור להכנסה נוספת לבעלי המיקרוגריד. שירותים אלה כוללים: ייצוב תדר, רזרבה סובבת (אספקה בזמן אמת), תמיכה במתחים, התנעה שחורה והפעלה מחדש של המערכת ותמיכה בביקושי שיא.

1. ייצוב תדר - מפעילי המיקרוגריד יכולים לספק ייצוב תדר עבור הרשת הארצית. על מנת לספק תמיכה זו, המיקרוגריד שומר בצד כמות מסוימת של רזרבות (בין אם במתקן אגירה ובין אם בגנרטור) אשר תהיה זמינה עבור הרשת הארצית בעת הצורך. עלויות המיקרוגריד כוללות את עלות שמירת הרזרבות ואת כל עלויות הדלקים והתפעול הנוספות הדרושות. השימוש במיקרוגריד הינו אלטרנטיבה לשימוש בתחנת כוח קונבנציונאלית ובמתקני אחסון. התוצאות מלמדות על יכולת ניהול ותפעולן של תדירויות המערכות וההספקים במיקרוגריד מבודד במקביל לצמצום כמות ההספק הדרוש על מנת לשמור על התדירות בטווח הרצוי.¹⁷⁴
2. אספקה בזמן אמת (רזרבה סובבת) - מערכת המיקרוגריד לרוב אינה מכילה רזרבה סובבת כמו הרשת הארצית המיקרוגריד מתוכנן כך שייתן מענה לביקוש הקיים תוך העמדת יכולת תגובה מהירה לביקושים והתאמה לרמות זרם החשמל. לרוב המיקרוגרידים ישנה תגובה מאוחרת לייצוב תדר ובקרת מתח, אך מיקרוגרידים בעלי יחידות אחסון נותנים מענה של רזרבה הסובבת (אספקה בזמן אמת).¹⁷⁵
3. תמיכה במתחים - בדומה לתמיכה באספקת החשמל בזמן אמת, המיקרוגריד יכול לספק תמיכה במתחים עבור הרשת הארצית. תמיכה זו מגבירה את איכות החשמל ויציבותו בתוך הרשת. עבור המיקרוגריד, עלותה של תמיכה זו נובעת בעיקר מצמצום תפוקת החשמל.
4. התנעה שחורה והפעלה מחדש של המערכת - המיקרוגריד יכול להפחית את השפעותיהן של הפסקות החשמל על ידי אספקת תמיכה של התנעה שחורה בזמני עומס קריטי ועומסי מערכת נוספים. זה כולל בתוכו אספקת חשמל עבור עומסים מסוימים בזמן שהרשת הארצית עוברת תהליך ההתנעה השחורה על מנת להפעיל מחדש את המערכת. בהינתן הפסקות חשמל בתדירות נמוכה, עלויות התפעול המשתנות הקשורות לפעולת ההתנעה השחורה במיקרוגריד זניחות. לעומת זאת, עלויות אחרות (כמו: הכשרה, טכנולוגיה מתאימה ואחסון דלקים) יכולות להיות משמעותיות.
5. תמיכה בביקוש שיא - על ידי צמצום העומסים ברשת הארצית, בין אם באמצעות הפחתת הביקוש ובין אם באמצעות ייצור עצמי ו/או שימוש באגירה, המיקרוגריד יכול לתמוך במבנה הרשת ולצמצם את הסבירות למחסור בחשמל בזמני שיא הביקוש. כתלות במבנה המיקרוגריד, תמיכה בביקושי שיא עלולה להוסיף עלויות תפעול (רכישת יכולת אגירה יקרה יותר או ייצור בדלקים / אמצעי ייצור פחות יעילים). במידה ומשאבי האנרגיה המבוזרת של המיקרוגריד בצורתו הרגילה כבר כלולים באפשרויות התפעול, אספקת תמיכה זו לא תגרור עלויות נוספות משמעותיות.
6. חיסכון בגיבוי משקי - המיקרוגריד יכול לשלב בתוכו מקורות אנרגיה מתחדשים, מקורות קונבנציונאליים, מתקן אגירה וניהול עומסים על מנת ליצור מצב בו הוא מסוגל לתת מענה כיצורן מקומי

¹⁷⁴ מתוך: https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/value_streams_in_microgrids_a_literature.pdf

¹⁷⁵ מתוך: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5429547>

בנוסף לאפשרות מכירת האנרגיה המיוצרת לרשת הכללית. תזמון האנרגיה והרזרבות במתקני מיקרוגרید עומדים לרשות מנהל הרשת הארצית אודות לגמישות המיקרוגרید ותכונת הניהול החכם.¹⁷⁶

תשלומי השירותים הנלווים¹⁷⁷

במדינות שונות בעולם בהם ניתן למכור שירותים נלווים למנהל המערכת, היכולת של בעל המיקרוגרید להיות שותף בשוק השירותים הנלווים נותנת לו את ההזדמנות לייצר זרם הכנסות נוסף אשר יתרום לשיפור מצבו הכלכלי של המיקרוגרید. לדוגמא, אוניברסיטת פרינסטון מבצעת מעקב אחר מחירי השירותים הנלווים בשוק של פנסילבניה, ניו ג'רזי ומרילנד ומספקת שירותים נלווים כאשר היא רואה שהמצב התפעולי של המיקרוגרید בקמפוס מאפשר לספק שירותים אלה ברווח עבור האוניברסיטה.

עבור בעל מתקן המיקרוגרید, על הרווח הצפוי מאספקת שירותים נלווים כולל בתוכו ניכויים עבור עלויות של שינויים והתאמות תפעוליות, ציוד דרוש ואת עלותה של ההזדמנות לשימוש בקיבולת הייצור של שירותים נלווים שיכולים באותה המידה לגרום לעומס. עבור מיקרוגרידים בעלי קיבולת קטנה, עלויות העסקה עבור ההשתתפות בשוק השירותים הנלווים (עלויות כגון עלויות ציוד) עלולות לגרום להפסד הרווחים הנוספים שיכולים להתקבל מההשתתפות בשוק זה. בשל סיבה זו, מספר מיקרוגרידים בניו יורק תוכננו במיוחד עם ציוד תקשורת והפעלה אשר יספקו את הצרכים התפעוליים הרלוונטיים של הרשת.

ניתן לראות כי כאשר המיקרוגרید מספק שירותים נלווים מרבית רווחיו מגיעים משירות ייצוב תדר (66%) מכאן ניתן להסיק שהוא בעל הערך הגבוה יותר, לאחר מכן מרזרבה סובבת (24%) ומבקרת מתח (10%).

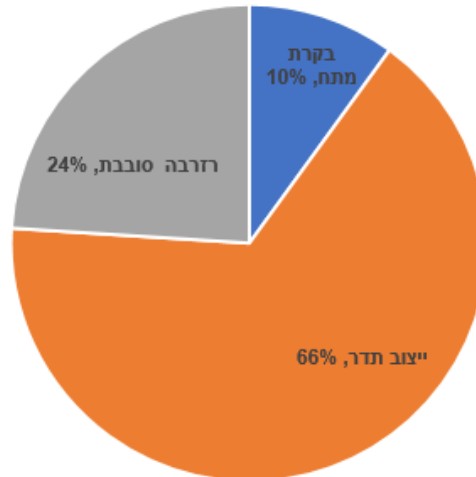
[http://www.jweet.science-](http://www.jweet.science-line.com/attachments/article/26/J.%20World.%20Elect.%20Eng.%20Tech.%204(1)%2036-41,%202015.pdf)

מתוך :

176

[line.com/attachments/article/26/J.%20World.%20Elect.%20Eng.%20Tech.%204\(1\)%2036-41,%202015.pdf](http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf)

<http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/Microgrids-for-Critical-Facility-NYS.pdf> מתוך :¹⁷⁷



גרף 24 : דוגמא לחלוקת הרווחים של המיקרוגריד משירותים נלווים¹⁷⁸

המצב בישראל

שירותי ניהול מערכת החשמל בישראל מתייחסים למגוון שירותים המסופקים כיום על ידי מנהל המערכת בישראל במקטעי הייצור וההולכה, ובכלל זה איזון תמידי בין היצע החשמל והביקוש לו, הבטחת השרידות של מערך הייצור וההולכה, ניהול של העברת האנרגיה מתחנות כוח דרך רשתות החשמל אל תחנות משנה באמינות ובאיכות הנדרשות, תזמון ביצוע של עבודות תחזוקה ביחידות הייצור ובמערכת ההולכה, ניהול הסחר בחשמל בתנאים תחרותיים, שווינויים ומיטביים לרבות ביצוע הסכמים לרכישת יכולת זמינה ואנרגיה מיצרני חשמל ותכנון הפיתוח של מערכת ההולכה וההשנאה.

העלויות המוכרות של שירותי ניהול מערכת החשמל כפי שנקבעו על ידי רשות החשמל:¹⁷⁸

1. **שירותים לאיזון המערכת** – שירותים אלו נועדו להבטיח את יציבות התדר, המתח, שרידות מערכת החשמל ואספקת חשמל באמינות ובאיכות נאותים העומדים באמות מידה שנקבעו מראש. שירותים אלה נועדו לאפשר למערכת החשמל לתפקד במצבים של שינויים לא מתוכננים בביקוש ובהיצע בטווח המיידי, השירותים מבטיחים את יציבות התדר, המתח, שרידות מערכת החשמל ואספקת חשמל באמינות ובאיכות נאותים העומדים באמות מידה שנקבעו מראש.

1.1. **שימוש ברזרבה סובבת לאיזון המערכת** – הפעלת מספר יחידות ייצור בעומס חלקי המסונכרנות לרשת החשמל ואשר מסוגלות להגיב באופן מיידי להוראת מנהל המערכת לצורך איזון המערכת מבחינה חשמלית. כל למשל, בעת הפרת תדר, יחידות אלו מסוגלות לעלות בתפוקת האנרגיה בזמן קצר ביחס להפעלת יחידות שאינן מסונכרנות.

1.2. **רכישת שירותים מיחידת ייצור בטכנולוגיית אגירה שאובה** – טכנולוגיה זו מתאפיינת בזמני תגובה קצרים יחסית של הגדלת הספק או הקטנת הספק ביחס לרזרבה הסובבת. שירותי הזמינות שניתנים

¹⁷⁸ מתוך: https://pua.gov.il/decisions/documents/maarcachti_nnn_melia.pdf

בטכנולוגיית אגירה שאובה יכולים לשמש, בין היתר, לאיזון המערכת. שירותים אלה מהווים שירותים תחליפיים ומשלימים לשירותי הרזרבה הסובבת לצורך איזון המערכת. יצוין כי כיום (2017) טרם החלה הפעלה מסחרית של מתקני אגירה שאובה בישראל. רשות החשמל פרסמה מכסה בגובה 800 MW וכיום נמצאים בהקמה שני מתקני אגירה שאובה מתקן כוכב הירדן בהספק 340 MW ומתקן מעלה גלבע-רשפים בהספק 300 MW.

1.3. הפעלת הסדרים לניהול עומס/איזון המערכת – בהתאם להסדרות שקובעת רשות החשמל

2. **שירותי גיבוי** – שירותים הנדרשים להבטיח שיווי משקל כללי במשק החשמל, ולמזער ככל הניתן אירועי אי אספקת חשמל בגין אי ודאות מצד מערכת הייצור וכן הצורך להבטיח גיבוי של יחידות ייצור הנמצאות בתחזוקה שנתית מתוכננת, בירידת הספק או בתקלות ממושכות. שני האמצעים העיקריים לאספקת שירות זה הם: רזרבה של יכולת ייצור והסדרים לניהול עומסים מצד הביקוש.

2.1. גיבוי באמצעות יכולת זמינה של יחידות ייצור – עלות שירותי הון ועלויות תפעול ותחזוקה קבועות של יחידות ייצור במשק, הבאות לספק את צרכי המערכת במצב של עודפי ביקוש, מתן מענה לתקלות, לתחזוקה מתוכננת ולירידות הספק כתוצאה ממזג אוויר, כל זאת כדי למזער ככל שניתן את העלות לציבור הנובעת מאי אספקת חשמל.

2.2. גיבוי באמצעות הסדרים לניהול מחסור:¹⁷⁹

(1) השלת תדר – הפסקת אספקת חשמל לצרכן בהסדר ללא הודעה מראש. מגבלות עיקריות על הצרכן להצטרפות להסדר: גודל חיבור מינימאלי: 3 מגוואט מוזמן במקדם עומס מינימלי 60% או

$$3 \text{ MW} \leq \frac{\text{גודל חיבור מוזמן} \times \text{מקדם העומס}}{\text{מקדם העומס הכללי במשק} (0.6)}$$

או לצרכן מספר מתקנים שסך גדלי חיבוריהם לפחות 25 מגוואט.

מגבלות עיקריות כלליות על הצרכן בהסדר: סך גדלי החיבורים של הצרכנים המשלמים או עתידים לשלם בשנה העוקבת אינו עולה על 600 מגוואט.

(2) השלה יזומה ע"י הפעלת גנרטור עצמי – הפעלת גנרטור פרטי כחלופה לאספקה חלקית/מלאה של חשמל מהרשת בהתראה של 4 שעות מראש.

מגבלות עיקריות על הצרכן להצטרפות להסדר: לצרכן גנרטור בהספק בין 500 קילוואט ל-5 מגוואט. גודל הגנרטור צפוי לרדת ל-250 קילוואט. נדרשת התקנת מונה רציף על הגנרטור. כמו כן, צפוי להתבטל ההסדר הפתוח לפיו הצרכן מפעיל את הגנרטור על פי שיקול דעתו בהתאם לתעריפי תמריץ שעתיים. נוסף על כך, לאחר תיקון אמת המידה, נדרשת הגשת תצהיר מטעם

¹⁷⁹ מתוך: <https://pua.gov.il/publications/callfor/2442.pdf>

הצרכן כי בידיו כל האישורים הנדרשים לפי כל דין, במקום הבאת אישורים פרטניים מהמשרד להגנת הסביבה.

מגבלות עיקריות על הצרכן בהסדר: הפעלת גנרטור עד 150 שעות בשנה.

(3) השלה יזומה ע"י הסדר פסגה ניידת – לוח תעריפים ייחודי בו קיים תעריף גבוה במיוחד במש"ב פסגה ניידת ותעריף מופחת בשאר השעות. התראה לפחות 4 שעות לפני העומס. מגבלות עיקריות על הצרכן להצטרפות להסדר: צרכנים במתח עליון, גבוה או נמוך בתעריפי תעו"ז. וגם מתקיימת הנוסחה הבאה:

$$173 \leq \frac{\text{גודל חיבור מוזמן} \times \text{מקדם העומס}}{\text{מקדם העומס הכללי במשק}(0.6)}$$

וגם הצרכן צורך במש"ב פסגה קיץ לפחות 4% מסך הצריכה השנתית שלו. וגם נדרשת התקנת מונה רציף.

מגבלות עיקריות כלליות בהסדר: עד 100 שעות בשנה יקבעו כמש"ב פסגה ניידת וגם סך גדלי החיבורים של כלל הצרכנים בהסדר עד 500 מגוואט.

(4) השלה יזומה ע"י הפעלת גנרטור עצמי ומכירת אנרגיה לרשת – הפעלת גנרטור כחלופה לאספקה חלקית/מלאה של חשמל והרשת והזרמת עודפי אנרגיה לרשת, לפי הוראות מנהל המערכת, בהתראה של לפחות 4 שעות מראש.

מגבלות עיקריות על הצרכן להצטרפות להסדר: הספק הגנרטור מעל 500 קילוואט וגם גנרטור המופעל במזוט או בגז מחובר לרשת מ"ע וגם הצרכן אינו בהסדר השלה יזומה או פסגה ניידת, וגם נדרשת התקנת מונה רציף וגם לדרישת סש"ח יותקנו מערכות שונות לרבות להגנה על הרשת, לסנכרון, תקשורת, הכול ע"ח הצרכן.

מגבלות עיקריות על צרכן בהסדר: הפעלה של 150 שעות שנתיות לצרכן (לשנת 2012).

(5) הרחבת תחולת תעו"ז מנדטורי – עידוד צרכנים להסיט צריכה משעות ייצור יקרות לשעות ייצור זולות יותר.

מגבלות עיקריות על הצרכן להצטרפות להסדר: כל צרכני המתח העליון או הגבוה או בעלי חיבור של לפחות 3x200 אמפר. וגם צרכני מתח נמוך שצריכתם השנתית לפחות 40000 קוט"ש. נדרשת התקנת מונה תעו"ז.

עלות שירותי הגיבוי מורכבת ממספר גורמים:

- שעת השיא השנתית – השעה בה הביקוש לחשמל היה הגבוה ביותר ביחס לכל השעות באותה שנה.
- היקף הספק הגיבוי – מחושב לפי ההפרש בין ההספק המותקן (בניכוי ירידת טמפרטורה) הקיים על פני השנה לבין שיא הביקוש השנתי.
- התחנות שיכללו בגיבוי – בהספק הגיבוי נכללו התחנות בעלות העלות השולית הגבוהה ביותר מבין התחנות במשק (עד להיקף ההספק הדרוש).
- עלות הגיבוי – מחושבת לפי סכום העלויות המוכרות של כל אחת מהתחנות אשר נכללו בגיבוי (כולל עלויות הון ועלויות תפעול קבועות).

- עלות ההון והתפעול לרזרבה הסובבת – עלות ההון והתפעול הקבועה של התחנות בעלות העלות השולית הנמוכה ביותר מבין התחנות אשר נכללו בגיבוי. עלות הספק זה תופחת מעלות הגיבוי ותיכלל בשירותי איזון המערכת. כמו כן, עלות הון זו תגרע מעלות הגיבוי.
 - תמחור עלות הגיבוי הנגבית מספקים – עלות הגיבוי הממוצעת לקוט"ש מחושבת לפי חלוקה של סך עלות הגיבוי בסך כמות הקוט"ש המסופקת באותה שנה. התעריף של שירותי הגיבוי יהיה תלויי זמן צריכה, זאת משום שמחירי הצל של שירות זה משתנים עפ"י השעות בשנה בתלות ברמת העומס בשעה נתונה. לכן, התעריף יקבע על בסיס הקצאת עלות הגיבוי הממוצעת לקוט"ש על פני מקבצי שעות הביקוש הקיימים.
3. **שירותים המסופקים לתחנות כוח על בסיס יחידתי** – שירותים המסופקים על פי דרישה של בעל תחנת הכוח או על פי צורך שנקבע על ידי מנהל המערכת כמתחייב מאמות המידה של ניהול מערכת החשמל כדוגמת שירותי יכולת התנעה שחורה.
- 3.1. **התנעה שחורה** – עלות אמצעים להפעלת יחידת ייצור במקרה של עלטה במערכת החשמל.
4. **כיסוי עלויות כלל מערכתיות** – עלויות שאינן קשורות להפעלה של מערכת החשמל מבחינה טכנית או כלכלית אולם נגזרות מאילוצים רגולטוריים, בעבר או בהווה, בכל הקשור לניהול משק החשמל ותפעול המערכת.
5. **עלויות אדמיניסטרטיביות** – עלויות אדמיניסטרטיביות של תשומות תפעול ושירותי הון המשמשים את מנגנון ניהול המערכת לצורך אספקת השירותים הכלולים בניהול מערכת החשמל. עלויות אלו כוללות עלויות הון ותפעול של מנגנון הדרוש לפעילות יחידת ניהול המערכת: פיקוח על העומס, תכנון משק החשמל וסטטיסטיקה.
- בגין עלויות הגיבוי קבעה רשות החשמל תעריף ייעודי הנגבה במסגרת תעריפי ניהול המערכת. מטבלה 24¹⁸⁰ ניתן לראות כי העלות המשוקללת של תעריף הגיבוי הנדרש למשק הישראלי בשנת 2017 הינה 1.4 אג' לכל קוט"ש נצרך ואילו העלות המשוקללת בגין הגיבוי העודף הקיים במשק בשנת 2017 הינה 0.35 אג' לכל קוט"ש נצרך.

¹⁸⁰ <https://pua.gov.il/Rates/8/Pages/801.aspx>

טבלה 24 : תעריפי ניהול המערכת ושירותים נלווים (אג"קוטי"ש) ¹

ס"ח	מערך	איזון המערכת	גיבוי עודף	נדרש	
4.19	2.65	0.17	0.35	1.02	חורף - שפל גבע פסגה
5.15	2.65	0.17	0.35	1.99	
6.63	2.65	0.17	0.35	3.47	
4.04	2.65	0.17	0.35	0.87	מעבר - שפל גבע פסגה
4.28	2.65	0.17	0.35	1.12	
4.60	2.65	0.17	0.35	1.44	
4.03	2.65	0.17	0.35	0.86	קיץ - שפל גבע פסגה
4.57	2.65	0.17	0.35	1.40	
6.80	2.65	0.17	0.35	3.64	
4.56	2.65	0.17	0.35	1.40	

רזרבה במשק החשמל:

הרזרבה במשק החשמל נמדדת לפי ההספק הזמין הקיים במשק מעבר לשיא הביקוש. עד לאחרונה, משק החשמל בישראל התאפיין ברזרבה נמוכה, שכן ההספק הזמין מעל שיא הביקוש עמד על אחוזים בודדים בלבד. בשנים האחרונות חלה עליה חדה ברזרבה כתוצאה משתי מגמות:

- א. האטה של קצב הביקוש - בשנות ה-2000 הביקוש גדל בממוצע בקצב של כ-3.8% בשנה, ואילו בשנים 2013-2014 חלה האטה בגידול הביקוש. בשנת 2015 חל גידול חד בשיא הביקוש כתוצאה ממזג אוויר חריג. לפי תחזית בנק ישראל (כפי שהיא מופיעה בדו"ח רשות החשמל לשנת 2016) קצב צמיחת הביקוש יעמוד על 2.3% ולפי תחזית חברת החשמל קצב צמיחת הביקוש יעמוד על 2.3%-2.8% (ניתן לראות כי מגמת הירידה ממשיכה).
- ב. כניסה של יצרנים פרטיים - זמינות הגז הטבעי ורגולציה תומכת אפשרו כניסה מהירה של תחנות כוח פרטיות למשק אשר הגדילו את ההספק המותקן במשק.

כתוצאה ממגמות אלו, הרזרבה כיום גבוהה באופן משמעותי לעומת הרזרבה שעמדה לרשות המשק לפני שנים ספורות. אם שיא הביקוש ימשיך להתפתח בקצב ממוצע של כ-2.5%, הרזרבה צפויה להגיע לכ-30% מעל שיא הביקוש בתחילת העשור הבא. אולם, שינוי האקלים עלול להביא לאירועי קיצון בהם שיאי הביקוש יהיו גבוהים במיוחד והרזרבה הנותרת תהיה נמוכה יותר.

רשות החשמל קבע המכסה של 800 מגוואט למתקני אגירה שאובה. הרשות העניקה עד כה ארבעה רישיונות מותנים להקמת תחנות כוח הפועלות בטכנולוגיית אגירה שאובה:

1. בצוק מנרה - לחברת "אגירה שאובה-אלקטרה" בהיקף של עד 200 מגה-ואט. הפרשי הגובה בין המאגרים - כ-760 מ'.

2. בגלבו - לחברת "פי.אס.פי השקעות" בהיקף של עד 300 מגה-ואט. הפרשי הגובה בין המאגרים - כ-500 מ'.

3. במחצבת נשר (סמוך לחיפה) - לחברת "כלל תעשיות והשקעות" בהיקף של עד 200 מגה-ואט.

4. בכוכב הירדן, בין מושב מולדת וקיבוץ גשר, על ידי "תהל אנרגיית מים" וחברת הבת שלה לפרויקט זה כוכב אגירה שאובה בע"מ, בהיקף של 340 מגוואט.

מתוך בעלי הרישיונות המותנים הנ"ל סגרו פיננסית והחלו בהקמה שתי תחנות, כוכב הירדן וגלבו.

בתחילת 2017 החליטה רשות החשמל שלא להגדיל את מכסת ייצור החשמל מאנרגיה שאובה, בין השאר מכיוון שהן יקרות מתחנות המותאמות להפעלה לטווח קצר, ובגלל הצפי לכניסת מצברים אוגרי חשמל לשימוש המוני. כיום נותרה מכסה לא ממומשת בהספק של 160 מגוואט.

נספח 6: MICROGRID LESSONS LEARNED (אלעד שביב)

Abstract

With microgrid being such a new and evolving market, much of the lessons learned are not yet documented. It is too soon to get to final conclusions on this market as most of the market is still on the learning curve on almost every aspect that relates to microgrid. We see frequent and continuous updates, especially in the US which is currently leading the market by sponsoring feasibility studies, R&D funds, and support for project deployments.

The goal of this section is to open a window to what we see going on in the market, even if this information is not final and sometimes a bit confusing. We see value in ensuring that the academic study is tightly linked to what is currently evolving in the market.

As this section focuses mainly on less documented information, it was heavily based on interviews of market players and attendance to relevant industry events.

While conducting the interviews and collecting information, we tried to address the 'real life' answers to the following questions:

Main resources used

US Events •

- DistribuTECH, San Diego ▫
- Sustainability Real Estate Conference, New York ▫
- Net-Zero Energy Districts, New York ▫
- Homer International Microgrid Conference ▫

Interviews •

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Siemens ▫ | ConEd ▫ |
| Hitachi ▫ | NYSERDA ▫ |
| ABB ▫ | NYPrize organization ▫ |
| GE ▫ | PIDC, Philadelphia Navy Yard ▫ |
| Cisco ▫ | Hudson Yard, NY ▫ |
| Oracle ▫ | NY Medical Center ▫ |
| Homer Energy ▫ | Willdan Engineering ▫ |
| Microgrid Institute ▫ | Prudential Real Estate ▫ |
| NREL ▫ | Power Engineers ▫ |
| NRG ▫ | Presidio ▫ |
| CEZ ▫ | Research Inst. NREL ▫ |
| Constellation ▫ | |
| NYPA ▫ | |
| University of Albany ▫ | |
| The City University of NY ▫ | |

- Philadelphia Navy Yard project ▫
- NY Prize feasibility studies ▫
- Key Takeaways

The microgrid market is taking front stage in all power market discussions and planning, yet it is still in the chasm phase and clear regulations, standards, and leading players are yet to be defined.

It seems that the fragmented and flexible nature of this market, plays a significant role to make it an industry forces led market, where the regulators follow, rather than what was the typical case in the energy market where the regulators led the way.

Due to the very open definition of what a microgrid is, the actual number of microgrid deployment is unclear and differs significantly based on the exact definition. The current de-facto perception of a microgrid in the developed economies calls for an energy network that can be at least partially self-sufficient, and most of the microgrid deployments are grid tied. The common perception is that there is no financial justification to disconnect from the grid unless during a forced disconnection

There are three market anomalies that are holding the microgrid market back, mostly related to the legacy nature of the energy industry. We see more and more new players getting into the space: technology vendors, service providers, engineering companies, and others. Our belief is that those new players will bring a refreshing thinking to accelerate the resolution of those market anomalies and accelerate the evolution of a new market structure where microgrids will play a major role.

MARKET ANOMALY #1: MARKET LEADERS

The greatest challenge presented by the migration to microgrid deployments is neither technical nor regulatory; rather, it is the change of the leading market shapers. While the energy market was dominated since its inception by the power providers, all eyes were, and in most cases still are, raised to the existing market leaders – the power utilities, to lead the way.

Beside the dependency on governmental incentive programs, the market tends to rely on power utilities to take a leadership, or at least a significant role, in shaping the microgrid market.

Indeed, most power utilities are either already engaged, or have strategic plans to engage with the microgrid market, and power providers are looking carefully at the evolution of that market and most of them are taking pro-active approach to ensure they are not being left out of the game when this market takes off.

Power utilities, whether incumbent or newer competitive ones, certainly understands the power market, have access to the customers, relevant technologies, vendors, and the regulators. Moreover, they have the financial strength to lead a significant change, and their business will be the first to be impacted by a massive migration to microgrid structure.

Yet, Power Utilities, especially regulated utilities, have limited motivation to lead a market disruption through broad adoption of microgrids with an open and competitive market that will eventually impact their current profitable operation. Moreover, their current strength comes from the economy of scale, a factor that by

engaging with multiple small sites becomes a burden rather than an advantage. Their operation is less suitable for an agile, adaptable, tailored, and cost-effective operation which microgrids will require.

There are many contenders to take the leading position to the microgrid market, those include Campus owners (mainly in educational campuses), power equipment vendors (especially energy storage and solar providers), energy management systems' vendors, engineering companies, consultants, municipalities (yet, those still heavily depend on the utilities), and more recently even real estate developers.

MARKET ANOMALY #2: MOTIVATION AND ROI

The motivation to deploy a microgrid is naturally the first step when starting to evaluate a possible deployment, most probably a motivation need to be in place to even trigger any discussion on the topic.

The motivation is closely linked also to the definition of a microgrid. As mentioned previously current the typical perception of a microgrid in the developed economies calls for an energy network that can be at least partially self-sufficient. With this definition, the most commonly accepted motivation for microgrid today is to ensure un-interrupted electricity during power outages.

Power-outage protection is highly appreciated by both the regulators and the microgrid site owners. With almost everything being dependent on energy nowadays, including water supply and communications, un-interrupted electricity has indeed a significant financial and strategic impact. The recent natural disasters in the US, raised the possibility of long power outages and the resulting damages.

Whereas uninterrupted electricity is clearly a justifiable motivation, it requires significant investment in deploying distributed generation resources and sufficient energy storage devices and a proper management systems and controllers.

When getting to measure the financial investment required for to re-commission the energy network it is typically fairly significant. Comparing the cost to the possible lost during power outage, based on statistical number of unavailable minutes of power, quite often results with un-justifiable Return on Investment (ROI). Poor ROI, requires governmental subsidies, which is very limited.

Recent deployments and vendors have started to adopt a different approach which seems to open up accelerated microgrid deployments. The new approach takes into account also the financial gains associated with a smart optimized operation of the site's energy operation. Looking on various OPEX and CAPEX gains, as energy losses, reduced consumption, improved maintenance and other improved elements, changes the ROI making it profitable for the developers without the need of government support.

MARKET ANOMALY #3: OPERATIONS

The last, yet probably most important, market anomaly, is the actual operation of the microgrid. As the name implies, a microgrid is a small scale of the national grid. It has a verity of generation devices (including the grid itself, renewable generation, often CHP, might be some emergency diesel generators), energy storage systems, different loads, and its own infrastructure (cables, transformers, etc.) .

And indeed, most probably microgrid control & automation is the most spoken-of issue, with a focus on controllers and management systems. Yet, little attention was given to the ability of microgrid owners to operate those sophisticated management systems on a day to day basis.

Managing such a complex operation require different management systems, and eventually a Network Operation Center (NOC) with skilled team to operate, react, and manage it all.

Such skilled teams are scarce and expensive and will be beyond the reach of a typical microgrid site does not have such teams, so are at a risk of not taking advantage of the system once it is in place.

Utilities and vendors alike, are now looking at providing remote management services to enable cost-efficient operation for such microgrids.

Market Players and Stakeholders

The microgrid market is currently packed with current and potential players and stake holders, with no current clear market leaders. This causes some confusion with regards to the directions the market will take, and whom should customers approach.

Among the common market players active in the microgrid market today:

- Utilities •
- States/Municipalities •
- Engineering Companies •
- Campus owners •
- Vendors •
- Consultants •

The initial natural candidates to take the lead were the power companies as microgrid is perceived to be an extension or evolution of the grid. Joining the power companies, were the power equipment vendors who identified the opportunity of a large dispersed market, and the requirement for so many engineering projects attracted the large engineering firms.

To this date, most of the leading members of microgrid projects are indeed one of the three traditional power industry players: The power companies themselves, the power equipment vendors, and the large engineering firms.

Microgrids however, presented a completely new approach to energy, beyond just a technological change. It enables the microgrid owners to take ownership of their energy networks. With that, we start to see states and municipalities that are looking at taking the front seat. This trend is still somewhat held back by regulation, but the pressure exists, and in some countries (mainly in Europe), the municipalities are free to run their power network.

Same approach led some Real estate developers, and Educational and other campuses to take the lead, in such closed facilities they do not have the regulatory obstacle and can deploy a microgrid to improve their energy expenses, quality, or as a differentiator for possible tenants.

Another segment of new-comers to the market are Information Technologies (IT) vendors. Operational microgrids require a well-integrated system which is composed of both energy devices, and a set of networking and computing systems. Such microgrids are a great example of the fast growing Internet-of-Things (IoT) market and represents huge new opportunities for the IT vendors.

With such a complicated market and technology structure on one hand, no finalized standards and no clear leaders on the other hands, sometimes consultants who take the lead in microgrid development, as there is a need to perform extensive analysis of the needs and available solutions and possible partners. To the traditional energy consultants, have recently joined microgrid dedicated consultant and microgrid engineering and service firms.

Currently, the most active players in the market are the legacy power vendors on one hand (i.e. Siemens, ABB, GE, Hitachi, etc.), who bring technical and financial capabilities yet maintain a Utility style cost and complication, and new startups (Homer Energy, Spirae, Advanced Microgrid Solutions, and many others) on the other hand, who bring new technical and business solutions yet strive to support a market at its embryonic stage.

The energy and IT system integrator, could have played, and most probably will still play, a major role in the market, yet those players are risk averse by nature and waits for the market to further evolve before taking a major commitment.

PHILADELPHIA NAVY YARD, NEW BUSINESS MODELS & ROI

THE **SMART** MICROGRID SOLUTION

for creating a 1,200 acre smart energy campus



PIDC faced a 200% increase in energy demand, while maintaining The Navy Yard as a national center for energy excellence. Burns developed a Strategic Energy Master Plan to increase capacity, reduce demand, minimize capital investment, improve energy pricing, and reduce carbon footprint. The plan deploys innovative technical solutions that provide a breakthrough model for future microgrids.

COLLABORATIVE APPROACH

- Coordinate 60 stakeholders:
 - Utilities – PECO, DTE, PGW
 - Owners – US Navy, PIDC, Urban Outfitters, GSK
 - Developer – Liberty Property Trust
 - Agencies – PUC, PJM
 - Institutions – PSU, Drexel, EEB HUB
- Analyze thousands of variables: fuel, demand, technology, energy intensity, weather and cost of capital

INNOVATIVE TECHNOLOGIES

- New business model to achieve \$95 million project with cost to owner of \$45 million, with 20% ROI
- Four sub-microgrids within one 70 MW microgrid
- Network operating center (NOC)
- Two-way communication backbone
- Self-healing distribution
- Smart substations and meters



ENERGY MARKET PARTICIPATION

- Capacity markets
- 16.7 MW demand response
- Real time and futures trading
- Rates, tariffs

ECONOMIC DEVELOPMENT

- Lower utility costs to tenants
- "Smart Energy Campus" brand
- 10,000 new anticipated jobs

SUSTAINABLE GENERATION

- 3.2 MW cogeneration
- 1 MW solar photovoltaic and energy storage
- 0.8 MW fuel cells
- 6.2 MW peak shaving
- 20% energy usage reduction equating to 10 MW demand reduction
- 13% greenhouse gas density reduction

"The Navy Yard has established itself as a vibrant, progressive campus leading the region and the nation in high performance design, sustainability and smart energy innovation."

Philadelphia Mayor,
Michael Nutter

An example of adopting a more comprehensive approach to the benefits of a microgrid deployment and operation can be seen at the Philadelphia Navy Yard

microgrid. This, very large microgrid, was designed with financial gains in mind, looking at the various benefits that a microgrid can bring.

The Philadelphia project looked at the following benefits:

- New Revenues •
- Reduced Costs •
- Lower Emissions •
- Greater Resilience •

Details of the business model are yet unclear, but as can be seen on the project publications, claim to generate an impressive 20% ROI.

The business structure of this project is a tailored, complicated model, as it is part of a whole build-up of a new “mini-city” and involved commitment of some of the participating parties (as Alstom) to set up local facilities, long term commitments and various partnerships.

The size and complexity of this project enabled a careful design to reach that comprehensive approach yielding the required results. For smaller microgrids, this approach is not yet applicable, but we see new microgrid players entering the market with more agile and cost-effective solutions to eventually enable also smaller projects to adopt such comprehensive approaches.

The New York Prize (NYPrize) is probably the most comprehensive microgrid initiative take in the US. Its scale and phased approach was designed to generate wide interest among all possible stakeholders. Some criticism was raised on mandatory engagement of power utilities in each project, and on the demand to build power resiliency at each microgrid with secondary focus given to the financial aspect of the project.

Yet, with its drawbacks, the project contributed significantly to the acceleration of microgrids awareness, education, know-how, and partnerships between stakeholders.

The following brief is an extract from “Tackling the Challenge of Smarter Energy Design” an Analysis of the New York State Microgrid Prize Competition written by Kyle Downey, Sam Holmberg, and Michaela Kerxhalli-Kleinfield

“The New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), in partnership with the Governor’s Office of Storm Recovery (GOSR) announce the availability of up to \$40,000,000, under the three stage NY Prize Community Grid Competition (NY Prize), to support the development of community microgrids. The objective of NY Prize is to promote the design and building of community grids that improve local electrical distribution system performance and resiliency in both a normal operating configuration as well as during times of electrical grid outages. NY Prize objectives include empowering community leaders, encouraging broad private and public sector participation including local distribution utilities, local governments and third parties, protecting vulnerable populations and providing tools to build a cleaner more reliable energy system.”

The mission statement identifies the objectives of the NY Prize Competition as improving resiliency, reliability, distribution, and spurring innovation of energy production in New York. The competition also looks to ameliorate community partnerships with utilities, local governments and the private sector. This paper will define resiliency as the ability of power 40 sources to withstand stress. It is most applicable to storm induced outages in the context of the NY Prize Microgrid Competition. Also reliability refers to the consistency of power.

In NYSERDA’s initial request for proposals (RFP), “RFP 3044 NY Prize Community Grid Competition” guidelines they elaborate: “Key NY Prize objectives include empowering community leaders, encouraging broad private and public sector participation, protecting vulnerable populations, expanding the use of locally distributed energy resources, engaging with private sector or third party interests and providing tools for building a cleaner more reliable energy system.”

The first phase sponsored 83 feasibility studies, all of which are open to the public:
<https://www.nyserda.ny.gov/All-Programs/Programs/NY-Prize/Feasibility-Studies>

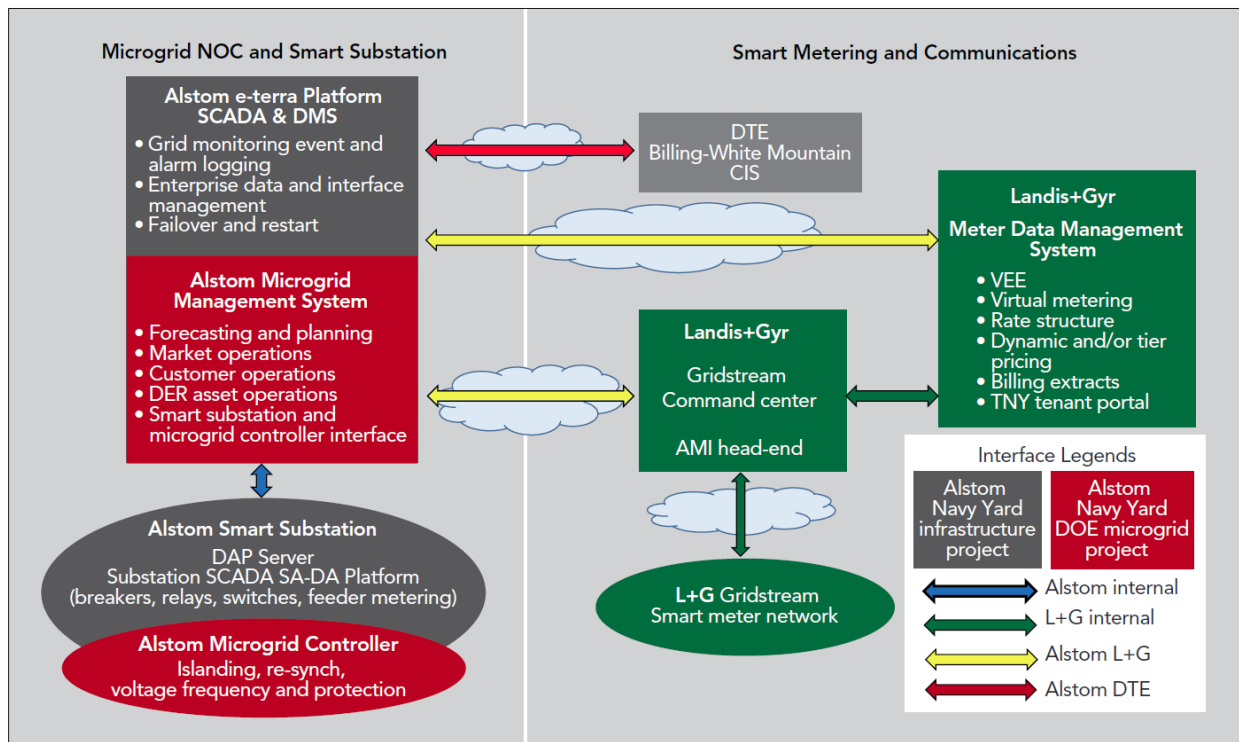
Out of the first phase, 11 projects were granted additional funds to progress with actual design.

Operation & management are at the heart of every microgrid. Without proper, intelligent and somewhat automated operations, the complex structure of a microgrid is doomed to fail.

The schematic requirements of an intelligent microgrid require an integrated approach of different automation, monitoring and control systems at levels, and include hardware products, software systems, integration process, and management services.

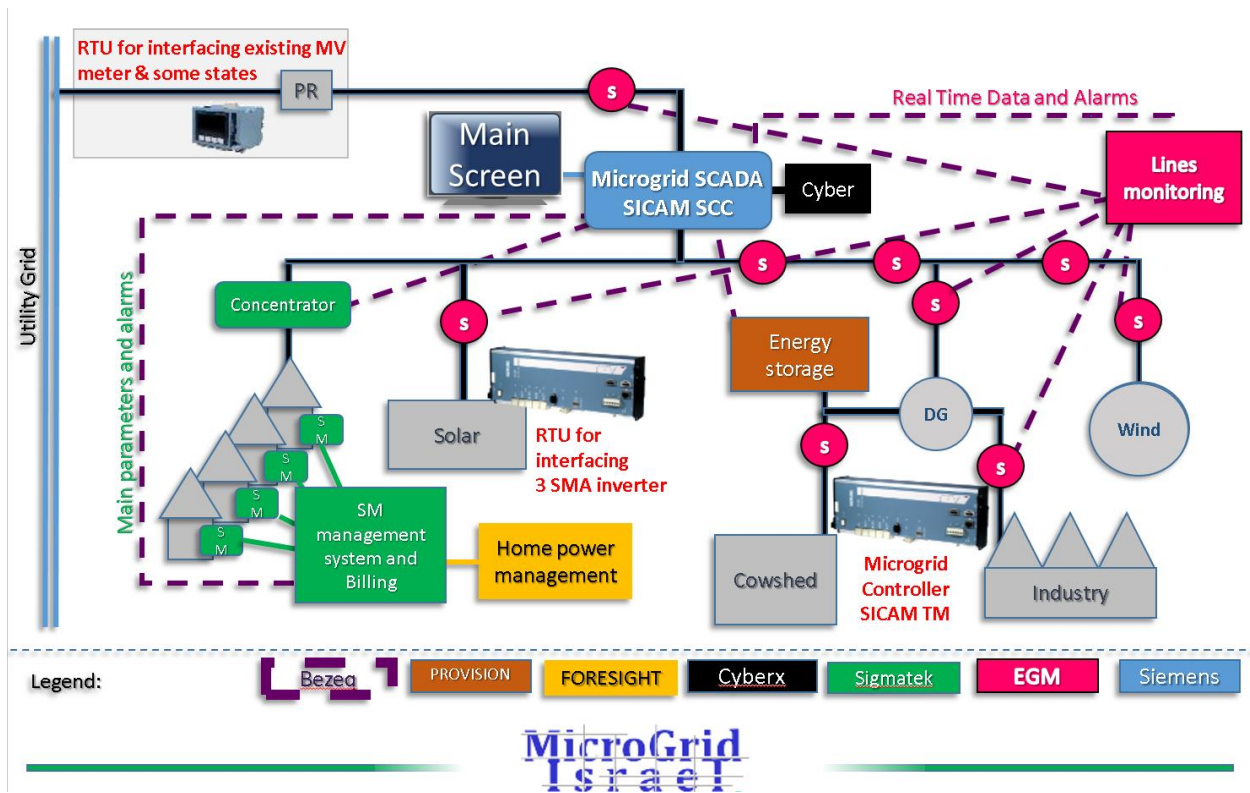
Whereas the hardware and software systems are today commonly available in the market, the challenge lies with the evaluation and design of non-yet-standardized systems from different vendors, and mainly with the integration process and management services.

An example of the complicated structure required by a microgrid, can be seen in the diagram below that represents the management systems built for the Philadelphia Navy Yard project.



Grid monitoring and operations in grid-connected and islanded modes.

The following example, presenting the Israeli Maale Gilboa microgrid management system, shows that even for much smaller microgrids, the complication remains and requires long and costly systems' evaluation to be followed by tailored integration development.



To ensure that the design, implementation, and integration of the microgrid management system result with improved operation, there is a need to ensure that there are skilled personnel that can operate those systems. Most campuses or communities, lack a professional energy team that can dedicate the time to manage those systems. A possible cost-effective solution may be remote management by the system integrator or external consultant.

Training & Education:

Training and education are two separate issues, yet are interlinked one with the other.

Education relates to microgrid owners or users. Whereas the terminology of microgrid is well known in the energy professional space, many of the potential microgrid-owners are non-energy professionals, and are not exposed to the changes in the energy market and to the opportunities they may leverage.

The numerous interpretations of “microgrid” add to the confusion, and with it to the evaluation of possible deployment and relevant solutions.

Some examples of the more common confusions are around the lack of clear understanding of the differentiation between:

Microgrid vs. Distributed Generation ▫

Should campuses with installed distributed generation look into anything beyond such generation and/or storage devices?

What are the minimum characteristics of local energy generation that may justify to evaluate a microgrid structure? (are renewable a must or will thermal storage, boilers etc. sufficient)

Vs. Energy Efficiency & BEMS ▫

There are energy efficiency and Building Energy Management Systems (BEMS), how are those different from microgrid management system? Is there a value in deploying both microgrid and BEMS?

Vs. Utility bills & RTEMS Vs. MG ▫

Real Time Energy Management Systems (RTEMS) and other systems that monitors energy consumption and improve either consumption reduction or participation in demand response programs are quite common and often confused with microgrid management systems.

Lack of trained personnel with adequate design and implementation knowledge in microgrids, adds to the confusion as well as makes it challenging to evaluate comparable solutions and deploy a complete microgrid architecture.

Challenges:

As an outcome of lack of education and trained personnel, there are key challenges that hold the fast proliferation of microgrid deployments, to name the main ones:

Who Gains, especially for RE Developers •

With the main characteristic of a microgrid calls for a portfolio of buildings, there is often the question of who actually pays for the different elements related to energy: CAPEX, OPEX, and Utility bills.

There are education or healthcare campuses where the city or state pays the utility bills, while the campus pays for the OPEX, at commercial real-state campuses it is quite common that the tenants pays their utility bills.

The wide acceptance of the LEED standard is a good example that this issue may be resolved once there are either incentives or “market” demand for a more effective energy operation.

Initial CAPEX investment without a clear ROI •

The current main focus in the US for microgrids to provide full energy operations during power outage, require high deployment costs with questionable return on the investment.

New designs and business models are emerging now and are required to provide a clear, justifiable, ROI

Regulations •

The current regulations in most locations, make it complicated to establish a microgrid if more than a single legal entity is engaged. Engaging the local utility, proved to be very complicated, and in many cases not feasible.

Complexity of design/deployment •

A well operating microgrid requires effective integration of energy devices, energy automation systems, networking infrastructure, and management systems.

Few companies today hold the diversified skills to cover all the needs. Many of the companies that are able to cover all such needs are the large global energy system integrators, yet their current operations are more suitable for utilities and less for relatively small operations as microgrids.

Ongoing Operations & Management •

Microgrid deployment requires the campus to continuously operate and manage a “utility like” operations. In most such campuses, there is no such professional skilled team, nor does it makes economic sense to hire such teams for each microgrid.

Requirements for Proof of Concept (POC)/Testing/evaluation •

Closely related to the education and training, and lack of reference designs. Each microgrid needs to perform complicated and costly evaluation of systems, vendors, implications and benefits. The complication, and cost, are beyond the reach of most potential campuses.

The Market driving Forces:

Probably the most important 'lesson learned' from the US market is that microgrids are top of mind for most relevant stakeholders, gain massive support from states and municipalities, and there is a keen effort to solve current challenges and accelerate microgrid adoption.

There are growing number of conferences and seminar with a main focus on microgrid that contributes to market education.

Projects' funding that by states and municipalities accelerates the formation of partnerships between relevant players, and such partnerships continues beyond those funded projects to further develop the market.

The US Department of Energy and other research organization as NREL (National Renewable Energy Laboratory) and NYSERDA (Research and Development Authority) are supporting initiatives to share knowledge of existing distributed generation deployed, consumption information, potential for energy saving, and ROI calculations tools. All relevant information for microgrid developers to help map potential customers. Some examples can be seen here:

- U.S. DOE Combined Heat and Power Installation Database: <https://doe.icfwebservices.com/chpdb/> •
- NREL's Real-time status of the solar photovoltaic market in the U.S: <https://openpv.nrel.gov/> •
- NREL's The Cost of Renewable Energy Spreadsheet Tool (CREST): •
<https://financere.nrel.gov/finance/content/crest-cost-energy-models>
- NYSERDA's Customer Targeting Tool: •
https://portal.nyserda.ny.gov/CORE_Solicitation_Detail_Page?SolicitationId=a0rt000000BnT1jAA
E

With the understanding that campuses and smaller utilities (as cooperative utilities) may need to drive the market adoption, even with the complication of evaluating new solutions, there are supporting initiatives being formed. NGOs as Second Nature that works with the higher education market, or coop-utilities that join forces to have 'group evaluation' centers.

Last, yet very important is the work of global standard organizations as the IEC on microgrid standards, and the recent Performance Excellence in Electricity Renewal (PEER) rating system that drives market transformation in the power and energy sectors. The program translates the goals of resiliency, sustainable .power delivery and environmental impact reduction into a third-party, metrics-based certification program

נספח 7: רגולציה (אילן סולימן)

רגולציה – בעולם המיקרוגרید

רקע

תחום המיקרוגריד אינו נושא חדש במשק האנרגיה כפי שנוטים לחשוב. יישומים של פעילויות שהינם חלק מתחום המיקרוגריד, ייצור מבוזר, ניהול ביקושים ואופטימיזציה של אמצעי אנרגיה, הינם חלק אינטגרלי מעולם החשמל מזה עשורים מספר. מספר סיבות, תרמו להגברת המודעות לתחום בשנים האחרונות וקידומו למרכז השיח במשק החשמל. בניהן ניתן למנות מודעות סביבתית ומדיניות הפחתת פליטות, התפתחות טכנולוגית ועצמאות אנרגטית במקביל לרגולציה ומדיניות תומכת.

בנוסף, ההבנה כי מערכות מיקרוגריד משקפות תועלת משקית, במקביל להשפעות שנובעות לה על הפחתת פליטות (נושא מרכזי בסדר היום העולמי), ניהול הרשת ומעריך הייצור, העלתה את הצורך לבחון יתר לעומק את המדיניות הראויה. מחקרה של חברת נביגנט על שוק המיקרוגריד משקף מגמה זו וחווה כי השוק צפוי לגדול פי 3.5 בין השנים 2015-2020, בין היתר כתוצאה משיקולים כלכליים.

הפרקים הקודמים שקפו את התרומות המשקיות, במקביל לתרומה ברמת הפרט הבודד, הנובעות למערכות מיקרוגריד. המחקר הראה כי קיימים לפחות מספר תחומים בהם ניתן לשקף בוודאות תרומה משקית ישירה: חסכון בהשקעות תשתית, מניעת אבודים במקטע ההולכה, הגדלת אמינות ושרידות המערכת, שילוב אנרגיות מתחדשות ומניעת פליטות.

הביטוי הרגולטורי לתמיכה במיקרוגריד ברחבי העולם

מחקר שבחן לעומק את מדיניות הרגולציה בנושא מיקרוגריד בארה"ב, אירופה וסין מעיד כי התמיכה בקידום מיקרוגריד מתבטאת בקידום מרכיבי המיקרוגריד כגון ייצור מבוזר, אמצעי התייעלות אנרגטית, ניהול ביקושים ואמצעי אגירה ולא כתחום הדורש התייחסות כוללת. על כן קשה למצוא דוגמאות רבות למדיניות/רגולציה קוהרנטית ומקיפה ליישום של מערכות מיקרוגריד (Overview of current Microgrid, Policies, Incentives and Barriers in the European Union, Unites States and China)

מבחינת הרגולציה הפרטנית במספר מדינות בצפון אמריקה עולה כי תחום המיקרוגריד הגם שלא מקודם כתחום כולל, זוכה לתמיכה רחבה בקידום מרכיבי המערכת. ישנן דוגמאות ספורות לתמיכה ישירה לתחום המיקרוגריד כתחום פעילות כולל. CALIFORNIA ENERGY COMMISSION אשר הפעילה תוכנית מענקים להוכחת הכדאיות העסקית של מיקרוגרידים מתקדמים לצורך עמידה ביעדי גזי החממה של המדינה. סכומי המענקים נעים בין 5-7 מיליון דולר, אבל ניתן היה גם לבקש מענקים גבוהים יותר בהגשת מידע נוסף להצדיק את החרیגה (<http://www.energy.ca.gov/contracts/epic.html#GFO-17-302>)

גורמי הרגולציה במיין שבארה"ב ובפרובנס שבקנדה הסכימו לשתף פעולה כדי לממן פרויקט בשווי מוערך של 12.4 מיליון דולר, כדי להוכיח איך מיקרוגרידים יכולים לתרום לחיסכון כספי ולהטמעת אנרגיות מתחדשות באמצעות תוכנות מתקדמות. התוכנית יועדה לגופים כגון אוניברסיטאות וחברות טכנולוגיות.

<https://microgridknowledge.com/multi-utility-microgrid/>

גם במדינת ניו-יורק בראיה של חזון חדש למשק האנרגיה, תוקצב סכום של כ-11 מיליון דולר לתמיכה בפרויקטים של מיקרוגריד שגופי מימון קונבנציונאלי אינם מוכנים לממן.

באמירה כוללת על הידע שנצבר מפעילות הרגולטורים בתחום המיקרוגריד בעולם ניתן להגיד כי עיקר הפעילות בתחום מבוססת על ראיית המיקרוגריד כמכלול של פעילויות פרטניות ולא כמערכת הוליסטית הגדולה מכלל מרכיביה. רק לאחרונה אנו עדים בעולם לבחינה תחום המיקרוגריד בראיה הוליסטית העולה על סך מרכיביו.

גם בישראל לא ניתן למצוא התייחסות לתחום המיקרוגריד כמערכת ניהול בראיה כוללת. יחד עם זאת, כמו בעולם, נעשו צעדים לא מעטים בתחומי הפעילות. ניתן לראות בפעולות אלו חלק מקידום תחום המיקרוגריד ובכלל זה, הסדרות לייצור מבוזר, אמצעים להתייעלות אנרגטית והסדרות לניהול מחסור, כפי שנפרט להלן. מטרת הפרק הנוכחי להציג את הצעדים שנדרשו ואת התחומים שלדעתנו עדיין נדרשים על מנת לקדם את הרגולציה בישראל בראיה כוללת.

מיקרוגריד בישראל – רגולציה קיימת ונדרשת

כפי שצינו, בישראל כמדינות אחרות בעולם קיימות מספר הסדרות תומכות מיקרוגריד מבלי שקידום התחום נבחן בראיה כוללת. הסדרות אלה כוללות:

ייצור מבוזר

במרכז הפעילות בתחום זה הוא הייצור המבוזר באנרגיות מתחדשות. בשנת 2002, קבעה ממשלת ישראל לראשונה יעד משמעותי לייצור באנרגיות מתחדשות ולפיו, 2% מהחשמל המסופק במשק הישראלי עד 2007 ו-5% עד 2016 יהיו ממקורות אנרגיה מתחדשת. יעד זה גדל בהחלטת הממשלה ב-2017 עת נקבע כי 13% מהחשמל המסופק במשק הישראלי עד 2025 ו-17% עד 2030 יהיו ממקורות אנרגיה מתחדשת. במישור האופרטיבי, מדיניות זו תורגמה על ידי רשות החשמל להסדרות פרטניות שכללו קידום ייצור מבוזר באנרגיות מתחדשות. בישראל, נוכח מאפיינים גאוגרפיים ואקלימיים, מיקוד הפעילות היה בטכנולוגיות פוטוולטאיות. כיום קיימים בישראל אלפי מתקנים בהספקים של מאות מגוואטים של ייצור מבוזר במקטע החלוקה.

הסדרות הרשות שנקבעו הניחו את הבסיס הסדרתי גם למתקנים בטכנולוגיות מתחדשות אחרות ובכלל זה מתקני רוח, ביו-גז והידרו-אלקטרי, על אף שמבחינת ההספק הכולל של המערכות מדובר בעשרות מגוואט בלבד. תחום אחר שמוסדר בימים אלה הינו ההסדרה למתקני ייצור על בסיס גז טבעי במקטע החלוקה. במהלך חודש דצמבר 2017 פורסמה ההסדרה החדשה שמהותה קידום מתקנים אלה תוך דגש על מתקנים בעלי נצילות אנרגטית כוללת גבוהה ואמור ייצור אנרגיה חשמלית ותרמית.

ניהול צריכה

בישראל קיימות מספר הסדרות לניהול צריכה הנובעות מהכרת הרגולטור בצורך למתן מענה לשעות שיא הביקוש. ההסדרות כגון השלה יזומה, השלת תדר, הסדרת צרכנות חכמה וכדומה, הינן הסדרים צרכניים המאפשרים לצרכן לקבל תעריף/תשלום מתמרץ עבור הפחתת צריכתו או תרומתו לצריכת החשמל בשעות בהם המערכת נדרשת להתמודד עם שיאי ביקוש.

התייעלות אנרגטית

גם בתחום זה קיימת מדיניות בעלת יעדים מרחיקי לכת. על פי החלטת הממשלה תצומצם צריכת החשמל בשיעור של לפחות 17% עד שנת 2030 לעומת תרחיש עסקים כרגיל. במהלך השנים האחרונות נקבעו לא מעט תוכניות במשרד האנרגיה ומשרד להגנת הסביבה המעניקות תמיכות והקלות למתקנים ו/או פרויקטים שמטרתם התייעלות אנרגטית. החלטת הממשלה האחרונה מיום 17.12.2017, (החלטה 3269), אימצה את "התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית 2016 - צמצום צריכת החשמל -2030" שהכין משרד האנרגיה, וקבעה יעדים אופרטיביים לביצוע (חלקם אושרו בעבר) של הגופים השונים ובכלל זה הקמת מנגנון למתן ערבויות מדינה לפרוייקטי התייעלות אנרגטית, הפעלת תוכנית מענקים להשקעות בהפחתת פליטות והתייעלות אנרגטית בהיקף של 300 מלש"ח, בנוסף, נבחנה האפשרות לקבוע דירוג אנרגטי לבנייני מגורים ומשרדים חדשים.

מה עוד נדרש

כפי שעולה מהסקירה לעיל הרי שנעשה לא מעט ברמה הפרטנית מבחינת הסדרת מרכיבים בהם ניתן לראות חלק מקידום המיקרוגריד בראיה כוללת. נדמה כי מדובר בצעדים משלמים לא רבים, אולם מהותיים, על מנת שתחום המיקרוגריד יקודם כתחום מהותי אף בישראל.

■ הגדרה וקביעת תחום המיקרוגריד כתחום לקידום

כפי שצינו במסמך לעיל, תחום המיקרוגריד בהגדרתו **כמערכת ניהול שמטרתה להביא לאופטימיזציה של שימוש באמצעי האנרגיה**, אינו מוסכם וברור. כפועל יוצא, לרוב אין התייחסות כוללת לא כל שכן צעדים מעשיים בתחום זה. חשיבות הגדרת התחום היא סוגיה מרכזית בקביעת הרגולציה התומכת שתתמרץ ותעודד את השגת היעד. להגדרת התחום והקביעה הממשלתית כי הוא מהווה יעד לקידום ישנה חשיבות רבה בקביעת הצעדים הרגולטוריים שיאפשרו קידום התחום. שכן, בהינתן שאין הגדרה המתייחסת למיקרוגריד בראיה כוללת, הרי הרגולטור יוכל להבהיר כי די בצעדים שיישם הרגולטור עד עתה לקדם את תחום המיקרוגריד. כלומר, תמיכה לאנרגיות מתחדשות וצעדי התייעלות אנרגטית. אלא שלא די בכך, לשילוב מערכות מיקרוגריד בראיה כוללת, חסרות לא מעט הסדרות רגולטוריות שיאפשרו את מימושה באופן ראוי. בהינתן הצבת יעד קידום תחום המיקרוגריד כמדיניות הרי שיש לבצע/לבחון אף את ההיבטים שיפורטו בנקודות הבאות.

■ קביעת מכסה ייעודית

המציאות הרגולטורית מעידה כי הסדרות שמטרתן קידום תחום חדש נדרשות להסדרה פרטנית הכוללת הסדרים להתנהלות במשק החשמל- אמות מידה והסדרים תעריפיים (כפי שנפרט בהמשך) וקביעת מכסה ייעודית. הגדרת התחום וקביעת המכסה מהווים כר מוגדר וברור ליזמות/צרכנות המבקשת לממש פעילות בתחום המיקרו-גריד. ללא קביעת מכסה יהיה קשה לקדם לפחות בשלב הראשון את התחום בהיעדר ודאות ליזמות/צרכנות של התחום, כמו גם לגוף המממן.

■ מבחן הכלכליות

מסמך זה עמד על התרומות הכלכליות ברמה המשקית שיש להטמעת מערכות מיקרוגריד. אין חולק כי חלק מהתרומות ניתן לייחס באופן פרטני למרכיבי המערכת. למשל הפחתת פליטות או הקטנת השקעות בתשתית כתוצאה מייצור מבוזר. יחד עם זאת, ישנן תרומות פרטניות מעצם ניהול המערכת כמערכת מיקרוגריד, בין היתר כתוצאה מהגברת שימוש במערכות ייצור מבוזר כמו גם מניהול כולל של אמצעי הייצור והצריכה המביאים לאופטימיזציה כלכלית לצרכן ויחד עם זאת מגבירים את רמת האמינות המשקית, חוסכים בהשקעות בתשתית ההולכה והחלוקה ותורמים ליעדי הממשלה בהשגת התייעלות אנרגטית.

אין בכוונתנו במסגרת זו לרדת לניתוח פרטני של התועלות העודפות של מערכות מיקרוגריד כמערכת כוללת, לא כל שכן לבצע בשלב זה מבחני עלות תועלת ביחס למשמעויות הכלכליות הנובעות מההסדרים הפרטניים. מטרתנו היא שעל סמך מסקנות מחקר זה בהיבטים של התרומה המשקית תבחן התרומה הכוללת של מערכות מיקרוגריד ותבוא לידי ביטוי במתן תמריצים, ככל שיעלה כי יש ערך חיובי למערכות אלה, במסגרת מדיניות לקידום תחום המיקרוגריד.

בקשר זה יובהר כי יש לפעול בבחינת התועלות של מערכות מיקרוגריד באופן משולב עם הסדרות קיימות באופן שימצא את האיזון הנכון בין שמירת ההסדרות הפרטניות הקיימות ומחוייבות ליזמות בתחום זה לבין אופן ביטויים בתרומה הכוללת של מערכות מיקרוגריד. בכל מקרה, יש להימנע מפגיעה/שינוי של הסדרות קיימות כחלק מהתהליך.

■ הסדרות למחקרי היתכנות

עמדתנו על העובדה כי אין מספיק ידע ולא כל שכן ניסיון מומחה בתורמתן של מערכות מיקרוגריד כמערכות כוללות. אין ספק, כי מנקודת מבט של הרגולטור יש לבחון משמעויות אלה כחלק מקביעת מדיניות כוללת. בהקשר זה ובהסתמך על מדיניות הרשות כגון בנושא מתקני חלוצי, יש לאפשר קידום התחום, במקביל לפתיחת השוק לכל החפץ בכך באופן פרטני משיקוליו הוא, באמצעות אפשרות לביצוע מחקרי היתכנות למיקרוגריד. בכל מקרה מתן אפשרות למחקרי היתכנות לא יבוא על חשבון קביעת מכסה והסדרות לקידום פרויקטים של מיקרוגריד לכל החפץ בכך.

■ הסדרת פעילות מתחמי מיקרוגריד במסגרת אמות המידה

כיום אין הגדרה ברורה מי יכול ובאיזה אופן ליישם מערכות מיקרוגריד בישראל. כפועל יוצא מתאפשר ביצוע הפעילות רק ברמת הצרכן, ובמקרה הייחודי של ישראל במתחמי "מחלקים היסטוריים". מעבר להיבטים הכלכליים קידום התחום מותנה ביכולת לפעול באופן חוקי ויעיל במשק האנרגיה ולשם כך נדרשת, כמו בכל תחום, הסדרת פעילותם של מתחמי מיקרוגריד ב-4 תחומי פעילות מרכזיים:

5. **רישיון/היתר הפעלה** – קיימת חובה להגדיר פורמלית את הזכות לפעילות יזמית במתחמי מיקרוגריד. אישור זה יכול להיות באמצעות מתן רישיון הספקה, צרכן מאגד או פורמט אחר, ובלבד שיגדיר מי יכול ובאילו תנאים להפעיל מערכות מיקרוגריד.
6. **הגדרת המתחמים** הגאוגרפיים/רגולטוריים בהם ניתן להפעיל מערכות מיקרוגריד – לרוב מקושרת מערכת מיקרוגריד למתחם גאוגרפי פיזי (קיבוץ, מרכז קניות, אזור תעשייה). יחד עם זאת, ניתן לקיים פעילות מיקרוגריד על היבטיה השונים גם בקרב צרכן עם נקודות צריכה שונות שאינן בהכרח רציפות גיאוגרפית, תוך שימוש בתשתית של מחלק. על הרגולציה להגדיר מתחמים אלה. בראיה של קידום התחום על הרגולטור לקבוע את הגבולות המקסימליים המאפשרים יישום מערכות מיקרוגריד ולא להגבילם לאזורים גאוגרפיים בלבד.
7. **התממשקות עם מנהל המערכת ורשת החשמל** – אחת הסוגיות המשמעותיות על מנת לקדם מערכות מיקרוגריד באופן שיביאו לאופטימיזציה מלאה, היא קביעת ככלי התנהלות מול רשת החשמל ומנהל המערכת ובכלל זה בכל האמור להיבטים הטכניים. במסגרת התועלות הכלכליות הצגנו את התרומה שיכולה להיות למערכות מיקרוגריד בהיבט של שירותים נלווים. בנוסף, ניהול אופטימלי של אמצעי הייצור יכול להיתמך באפשרות לסחר בשירותים ואנרגיה בין מערכת המיקרוגריד למנהל המערכת או במסגרת עסקאות בילטרליות עם שחקנים אחרים במשק החשמל (יצרנים פרטיים, צרכנים).
8. **שימוש בתשתית סש"ח** – השימוש בתשתית ההולכה והחלוקה של סש"ח כאמצעי לקידום מיקרוגריד ובכלל זה מיקרוגריד מבזר הינה אמצעי להרחבת השימוש במערכות מיקרוגריד. אין בכוונתנו בשלב זה להידרש להיבטים הכלכליים של שימוש בשירותי תשתית ומול התרומה או התימרוץ שניתן למערכות מיקרוגריד, אלא רק לקבע את הצורך של שימוש בתשתיות סש"ח על מנת לקדם את פעילות המיקרוגריד.

■ אגירה

אין חולק כי נושא האגירה הינו אחד התחומים המהותיים ברמה המשקית בכלל ובתחום המיקרוגריד בפרט. אמנם קיומן של מערכות מיקרוגריד אינו מותנה בקיומה של מערכת אגירה אולם אין ספק שיצירת מתחמי ייצור וצרכנות עצמאיים, בשילוב עם האפשרות לסחר באנרגיה על בסיס כלכלי תקודם באופן משמעותי עם קידום תחום האגירה. נכון להיום אין הסדרה פרטנית לא כל שכן מתמרצת לאגירה בכלל. יש לבחון במקביל לקידום תחום המיקרוגריד קידום תחום האגירה.

נספח 8: ניתוח כמותי/איכותי של השלכות סביבתיות וחברתיות מפריסת מיקרוגרید (מלקולם אינספן)

1. רקע

הגדרה מקובלת למונח "מיקרו-גריד" הינו " קיבוץ מקומי של צריכת, ייצור, ואגירת חשמל המסוגל לפעול במקביל עם רשת החשמל הארצית או במשטר "איי".¹⁸² העבודה הזאת מתייחסת לשני נושאים:

(1) ביצוע ניתוח כלכלי כמותי על תרומות פריסת מיקרוגרידים שונים על הפחתת פליטות גזי חממה וזיהום אוויר. הניתוחים יתבססו על שיטות כימות מקובלות בספרות מחו"ל ויתואמו לנסיבות המשק הישראלי.

(2) ניתוח כמותי ואיכותי על ההשלכות החברתיות של יישום מערכת המיקרוגריד. ההתייחסות הכמותית תכלול ניתוח השפעות כלכליות נלוות, כולל, בין היתר, תעסוקה, תרומה לתקציב הציבורי, גמישות בפני אי-וודאויות עתידיות, ושיפור בגישה לחשמל באיכות ובטיחות משופרות

מספר המדינות והממשלות המקומיות שמכירות את התועלות הכלכליות הנובעות מיצירת מקומות עבודה הולך וגדל. המיקרו-גריד מגדיל השקעה מקומית באמצעות התייעלות אנרגטית, השקעה בשדרוגים ברשת, והטמעת טכנולוגיות אנרגיה מבוזרת וטכנולוגיות חכמות אחרות. היתרון הבולט של מיקרו-גרידים חכמים הינה הגמישות לתת מענה לצרכים עתידיים שאינם ידועים כעת. אחד מהצרכים האלה הינו השגת יעדי המדינה לאנרגיות מתחדשות, גם כדי לספק את הגידול הצפוי בצריכת חשמל וגם להחליף תחנות כוח מאובנות. המיקרו-גריד יכול לעודד חדשניות בטכנולוגיות בהתייעלות אנרגטית ובאנרגיה מתחדשת בקצב שבו כולל אינו ישים בחברות חשמל מפוקחות המתמקדות במימון והקמת מערכות ייצור ומסירה מרוכזות.¹⁸³

העבודה הזאת תיחלק לשני נושאים עיקריים:

- תרומה סביבתית: ניתוח כלכלי כמותי על תרומת פריסת מיקרוגרידים שונים על הפחת פליטות גזי חממה וזיהום אוויר, כאשר הניתוחים האלה יתבססו על שיטות כימות מקובלות בספרות מחו"ל ויתואמו לנסיבות המשק הישראלי.
- ניתוח כמותי ואיכותי על ההשלכות החברתיות של יישום מערכת המיקרוגריד. ההתייחסות הכמותית תכלול ניתוח השפעות כלכליות נלוות, כולל, בין היתר, תעסוקה, תרומה לתוצר המקומי, גמישות בפני אי-וודאויות עתידיות, ושיפור בגישה לחשמל באיכות ובטיחות משופרות.

¹⁸²<http://www.nvc.vt.edu/lmili/docs/Chiara-Energy-July%202011.pdf>
¹⁸³<http://www.galvinpower.org/resources/microgrid-hub/smart-microgrids-faq/benefits>

II. סקר הספרות – תועלות סביבתיות

התועלת הסביבתית העיקרית הינה היכולת להשתמש בייצור מקומי והחום השיורי הנובע ממנו כדי להחליף ייצור מאובן, ובעיקר יצור מתחנות כוח פחמיות. אותו המיקרו-גריד יכול להשתמש באנרגיה המיוצרת תוך ייצור חשמל לצורכי חימום וקירור מבנים, חימום מים, ואפילו קירור באמצעות צילרי ספיגה. הגברת כוח הצרכן בבחירת טכנולוגיות מבוזרות הכלולות במיקרו-גריד עשויה להוריד את התלות בדלקים מאובנים, לספק את הגמישות הנדרשת כדי לתת מענה לאי-רציפות של אנרגיות רוח ושמש, והורדת גזי חממה^{184,185,186}. בכל אופן, כימות ערכי התועלות הסביבתיות של המיקרו-גריד חייבת לקחת בחשבון את הקצב המתמשך בירידות בעלויות הטכנולוגיות, מאנרגיה מתחדשת ועד אגירה ותשתית חלוקה מתקדמת. כמו כן, יש לכלול גם כן את הקלת הגישה של משאבים חלופיים כולל ניהול ביקוש, אגירה, ומתחדשות שעשויה להשתקף בהורדת עלויות מימון המשאבים האלה. יש לכלול את יצירת המחזור ההטבה (VIRTUOUS CYCLE) הזה בתועלות הסביבתיות של הטמעת המיקרו-גרידים.

בדרך כלל, הצעד הראשון בהערכת תועלות הסביבתיות הינה הערכת התרומה להורדת גזי החממה. בישראל, רשות החשמל ומשרדים ממשלתיים משתמשים בהנחות של משרד הגנת הסביבה, שהן מבוססות על נתוני הארגון האירופי EXTERNE. נתוני EXTERNE הינם הנתונים מיוון המפנימים בתוכם את העלויות החיצוניות של הפליטות. הנתונים נלקחו מיוון) מכמה סיבות: (1) התוצרת הלאומי הגולמי (להלן, "תל"ג") דומה לתל"ג בישראל; (2) מאפיינים אקלימיים; ו- (3) מאפיינים דמוגרפיים (צפיפות ופזור אוכלוסין), שהם הגורמים להערכת נזקים בריאותיים הנגרמים מהיזום. ל-EXTERNE יש מאגר מידע עם כל העלויות החיצוניות של מזהמים שונים, וניתן להשוות את ישראל לכל מדינה עבור NOX, CO2, חלקיקים (PM), ו-SO2. העלויות כוללות נזק סביבתי, בריאותי, וכמה אפשר לחסוך אם נמנעים מהפליטות האלו¹⁸⁷.

להלן נתוני EXTERNE כפי שהם מקבלים ביטוי בתעריפים הנקבעים על-ידי רשות החשמל.¹⁸⁸

¹⁸⁴ <https://certs.lbl.gov/initiatives/certs-microgrid-concept>

¹⁸⁵ http://www.energy.ca.gov/research/epic/documents/2016-09-06_workshop/presentations/02%20California%20ISO%20Microgrid%20Roadmap.pdf

¹⁸⁶ Ibid.

¹⁸⁷ www.neaman.org.il

¹⁸⁸ <https://pua.gov.il/Rates/Documents/Hoveret010117.pdf>

טבלה 25: עלות זיהום לטון מזהם

לוח 1-11.2: עלות זיהום בדולר לטון מזהם

סוג	דולר לטון מזהם	סנט לגרם
חלקיקים	9,500	0.95
תחמוצות חנקן	2,400	0.24
תחמוצות גופרית	3,190	0.319
פחמן דו חמצני	7	0.0007

טבלה 26: פרמיות ליצרנים פרטיים

לוח 2-11.2: פרמיות ליצרנים באנרגיות מתחדשות באגורות לקווי"ש

P_p = רמת פליטת חלקיקים ביחידות גרם/קווי"ש
 P_N = רמת פליטת תחמוצות חנקן ביחידות גרם/קווי"ש
 P_s = רמת פליטת תחמוצות גופרית ביחידות גרם/קווי"ש
 P_c = רמת פחמן דו חמצני למעט פחמן נייטרלי ("carbon neutral") ביחידות גרם/קווי"ש

פרמיה (אגורות לקווי"ש)						
עונה	משי"ב	חלקיקים	תחמוצות חנקן	תחמוצות גופרית	פחמן דו חמצני (למעט carbon neutral)	סה"כ (100% מהפרמיה)
חורף	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_s * 1.394)$	$2.559 - (P_c * 0.003)$	9.692
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_s * 1.394)$	$1.734 - (P_c * 0.003)$	6.110
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_s * 1.394)$	$2.821 - (P_c * 0.003)$	8.162
בועבר	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_s * 1.394)$	$2.559 - (P_c * 0.003)$	9.692
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_s * 1.394)$	$1.734 - (P_c * 0.003)$	6.110
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_s * 1.394)$	$2.821 - (P_c * 0.003)$	8.162
קיץ	שפל	$0.371 - (P_p * 4.152)$	$2.594 - (P_N * 1.049)$	$4.133 - (P_s * 1.394)$	$2.559 - (P_c * 0.003)$	9.692
	גבע	$0.475 - (P_p * 4.152)$	$1.197 - (P_N * 1.049)$	$2.680 - (P_s * 1.394)$	$1.734 - (P_c * 0.003)$	6.110
	פסגה	$0.532 - (P_p * 4.152)$	$3.117 - (P_N * 1.049)$	$1.653 - (P_s * 1.394)$	$2.821 - (P_c * 0.003)$	8.162

הפרמיות למניעת נזקים סביבתיים מתורגמות ממחיר לגרם לתעריף לקווי"ש. התעריף לקווי"ש משקף את חלוקת הפרמיה למקבצי שעות כפונקציה מתמחיל תחנות הכוח העוללות לייצר חשמל בכל מקבץ שעה ("משי"ב") נתון. למשל, הפרמיה בשעות השפל גבוהה יותר, מכיוון שרוב החשמל בשנת הבוחן של התעריף מיוצר בתחנות הפחמיות.

אולם, מודגש שבחוו"ל, נתוני ה-EXTERNE נחשבים כמושנים, ויש להשתמש בנתונים של ה-NEEDS¹⁸⁹ PROJECT. לכן, בניתוחים שלנו, נשתמש גם בהנחות של משרד הגנת הסביבה, בנתוני ה-NEEDS PROJECT, ובמחירי הפליטות הסחירות. השיטה הזאת גם תואם לגישה של מדינות אחרות בחו"ל, שמשתמשות גם במחירי שוק לפחם וגם בעלויות נמנעות לפחם המומלצות על-ידי יועצים וצוותים המקצועיים של הרגולטור ו/או משרדי הממשלה (שאמורות לשקף את המחיר ארוכת-הטווח של גזי החממה). יצוין שגם EXTERNE וגם NEEDS PROJECT אומדים כמה נזקים כולל: נזק לבריאות; אובדן גיוון ביולוגי; נזק ליבול חקלאי, ונזק לחומרים גולמיים לתעשייה. שיטות הכימות של EXTERNE וה-NEEDS PROJECT כוללות הערכות לערך הממוצע של חיי בני-אדם, מבוסס על כוח ההרווחה שלו על פני משך חייו. התועלות גם כן כוללות את עלויות הרפואיות בתי חולים, תרופות, ביקורים רפואיים, וכדומה).

אחד מהיתרונות של שיטת ה-NEEDS PROJECT הינו שיטות ההיוון ושיקולי שוויון (EQUITY WEIGHTING). לעומת השיטות ההיוון ה"מסורתיות" שמשקפות רק עדיפויות להחלפות צריכה בין-זמנים, ה-NEEDS PROJECT גם כולל מרכיבים של עדיפויות בלקיחת סיכון והתועלת השולית לצריכה. לפיכך, שיעורי ההיוון נוטים להיות גבוהים משיעורי ההיוון חברתיים מקובלים אחרים. למשל, ה-NEEDS PROJECT הינם בטווח של 4.5-5.5%, לעומת 2.5-3.5% במחקרים אחרים.

שיקולי שוויון משקפים את העובדה שמפני שהתועלת השולית לצריכה שונה כפונקציה, בין היתר, של הון הצרכן, יש לשקל את הנזק הסביבתי בהתאם לאי-יכולתו של הצרכן העני להימנע מהנזק הזה (שערך הנזק הזה ביחס להון שלו גבוה) כלומר, שיטת ה-NEEDS PROJECT מאפשרת מידול גורם ממשלתי שדואג לסילוק אי-השוויון הזה ועלות מדיניות הסילוק. יצוין שה-EQUITY WEIGHTING גורם לטווח מאוד רחב, ואפילו צוות ה-NEEDS PROJECT ממליץ על זהירות רבה בשימוש בתוצאות האלה. בכל אופן, לצורך עבודה בעתיד, יש לעקוב אחרי פיתוח השיטה הזאת, כדי לאמוד את הנזק הסביבתי והחברתי מהמשך תרחיש "עסקים כרגיל"¹⁹⁰.

¹⁸⁹http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1a%20D6_1%20External%20costs%20of%20reference%20technologies%2024032009.pdf

¹⁹⁰<http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1b%20D5.4-5.5.pdf>

להלן טבלה של סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות :

טבלה 27: השוואת סקרים שונים להערכת העלות הסביבתית של פליטות מסוימות

מקור	סוג פליטה	עלות לטון (דולר ארה"ב)	מתודולוגיה	שימוש
EXTERNE	פחם	7	ניתוח תשואה/תפוקה	משרדי ממשלה בישראל כולל רשות החשמל בתעריפים
NEEDS PROJECT	פחם	7	אמידת עלות חברתית – GENERAL EQUILIBRIUM	משרדי ממשלה באירופה
NEEDS PROJECT	פחם	32	עלות מניעת נזקי פחם שולית (MARGINAL) (ABATEMENT COST	משרדי ממשלה באירופה
מחירי CAP AND TRADE	פחם	13	מחירי שוק	עלות נמנעת – תכנון של CPUC ¹⁹¹ שימועים על אנרגיה מבוזרת.
דו"ח קנדל ¹⁹²	פחם	14		עלות קנדל בפועל
דו"ח קנדל	פחם	35	עלות הנזק לפי בקר	נתון למשרד להגנת הסביבה
אומדן חברת איסקון	פחם	22		
חברת ייעוץ SYNAPSE	פחם	25	אמידת עלות חברתית	עלות נמנעת – תכנון של הרגולטור בקליפורניה CPUC
EXTERNE	NOX	2400	אמידת עלות חברתית	משרדי ממשלה בישראל כולל רשות החשמל בתעריפים
NEEDS PROJECT	NOX	8581	אמידת עלות חברתית – GENERAL EQUILIBRIUM	משרדי ממשלה באירופה

¹⁹¹CALIFORNIA PUBLIC UTILITIES COMMISSION

¹⁹²<http://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2013/07/%D7%93%D7%95%D7%97-%D7%95%D7%A2%D7%93%D7%AA-%D7%A7%D7%A0%D7%93%D7%9C.pdf>

ממשלה	משרדי	אמידת עלות חברתית	3190	SOX	EXTERNE
בישראל כולל רשות					
החשמל בתעריפים					

עוד יצוין שיש לאמוד את כמויות הפליטות הנמנעות הקשורות לכל מרכיב של המיקרו-גרید. במסגרת עבודת על קידום ייצור חשמל מבוזר, צוות ה-ENERGY DIVISION בקליפורניה העריך את ההשפעה הזאת כדלהלן¹⁹³:

טבלה 28: הערכת כמות הפליטות למרכיבי המיקרו-גרید

טכנולוגיה	ירידה בפליטות CO2 (טון למוט"ש)	ירידה ב- NOX (גרם למוט"ש)
ניהול ביקושים	0.32	60
אגירת אנרגיה (60% גז טבעי)	0.28	60
אגירת אנרגיה (100% גז טבעי)	0.10	55
מתחדשות מבוזרות. /התייעלות אנרגטית	0.62	90

מוצע שלתרחיש בסיס, נשתמש בהנחות כדלהלן:

- שימוש בעלויות נורמטיביות נמנעות הכרוכות בעמידת מתקנים מרכזיים מאובנים ביעדים סביבתיים¹⁹⁴;
- 20 דולר לטון כתוספת GHG (עלות החברתית לפחם);
- תרחישים לגבי עלויות פליטות, שיעורי היוון, וכמות החשמל המאובן הנמנעת (ראה להלן).

עוד יצוין שקיימת מעגליות בין מחיר לפחם לבין ההשקעה במיקרו-גרید. כלומר, בדיקת ההשפעה של כל מגהוואט נוסף למיקרו-גרید (בהינתן עלות פחם מסוימת) חייבת לקחת בחשבון שהספק המיקרו-גרید הכדאי אמור להשתנות כפונקציה של מחירי הדלקים המאובנים, בעיקר פחם¹⁹⁵.

¹⁹³ <http://www.cleangroup.org/wp-content/uploads/RPP-webinar-slides-11.2.16.pdf>
¹⁹⁴ [http://www.wisconsin.gov/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20\(10.10.14\).pdf](http://www.wisconsin.gov/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20(10.10.14).pdf)
¹⁹⁵ <http://escholarship.org/uc/item/8rc8k33w>

III. סקר הספרות – תועלות חברתיות

הטמעת מיקרו-גרידים עשויה להציע תועלות חברתיות, אשר רק חלק מהן הינן כמיתות – ואפילו רק חלק מהתועלות הכמותיות הינן גם תועלות ישירות.¹⁹⁶ ישנם מספר סוגי התועלות עיקריים:

- נגישות שוויונית לחשמל איכותי ואמין
- השפעת הבעלות ושליטה על החלטות ניהול המיקרו-גריד על קיימות חברתית
- הרחבת הזדמנויות הכלכליות לציבור הרחב.
- שימוש בתוכנה ובמערכות בקרה מתקדמות שמאפשר ניהול יעיל במשאבי ייצור וניהול ביקושים, כך שעלות החשמל יורדת ונותנת לאזור יתרון מובנה במשיכת חברות וליצור מקומות עבודה נוספים.¹⁹⁷

יצוין שבכימות התועלות האלה, אין ניסיון משמעותי מחו"ל כבסיס לבניית מתודולוגיה. בכל זאת, יש כבר ניסיון בכימות התועלות יישום תכונות של מיזמים כמו COMMUNITY SOLAR¹⁹⁸. בנוסף, לאחרונה חברת LADWP, חברת השירותים הציבוריים המוניציפלית הגדולה בארה"ב פרסמה את הדו"ח EQUITY METRICS DATA INITIATIVE, כדי למדוד, לבצע מעקב, ולדווח על אספקת תכניתיה לכלל הצרכנים והתושבים בעיר לוס-אנג'לס. ה-EMDI מהווה את המאמץ הראשון של ה-LADWP להשתמש בנתונים בפועל כדי לתכנן עתיד אנרגטית השומר על שוויון ומזער סיכונים כלכליים וסביבתיים לכל תושב ביחס לבייסליין מוגדר - בעוד שהחברה עוברת למשק אנרגיה מבוססת נקייה יותר¹⁹⁹. ה-EMDI כולל מדדים על אמינות החשמל (SAIDI, SAIFI, וכדומה), משרות פנויות ב-LADWP, וזמינות שוויונית לעובדת קבלנות עם ה-LADWP, והכול בנוסף לגישה שוויונית לאנרגיה מתחדשת ושיפור באמינות ובאיכות החשמל האמורים לנבוע מיישום המיקרו-גריד²⁰⁰. אולם, יש לציין שבדיקה מעמיקה לאמינות המדדים ושכפול הגישה בחברות חשמל ובמדינות אחרות טרם בוצע²⁰¹.

מסקרים שבוצעו בקליפורניה, עולה שאחד מהמדדים לגבי תועלות חברתיות הינו קירבת האוכלוסייה בעלי הכנסה נמוכה לתחנות הכוח המזהמות ביותר. מנתונים משנת 2016, עולה שכ-84% מתחנות הפיקריות בקליפורניה ממוקמות ליד שכונות של עוני ומיעוטים²⁰². התחנות הפיקריות פולטות כ-30% יותר CO2 למוט"ש

¹⁹⁶ <http://drpwg.org/wp-content/uploads/2016/07/CSFWG-Sub-Team-2a-Summary-Conclusions-and-Recommendations.pdf>

¹⁹⁷ <https://microgridknowledge.com/white-paper/guide-to-community-microgrids/>

¹⁹⁸ http://base.socioeco.org/docs/1851_social_acceptance_and_social_innovation_in_wind_power_technology.pdf

¹⁹⁹ https://www.ladwp.com/ladwp/faces/ladwp/aboutus/a-financesandreports/au-fr-corporateperformance/au-fr-corporateperformance-emdi?_adf.ctrl-state=1d603y3ruv_4&_afLoop=129740653661000

²⁰⁰ http://www.myladwp.com/ladwp_makes_fairness_and_equality_in_services_and_operations_a_top_priority

²⁰¹ <http://microgridknowledge.com/microgrids-for-social-justice/>

²⁰² <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516302798>

ו-400% יותר NOX למוט"ש מתחנות מסוג מחזור משולב ("מחז"מ")²⁰³. מערכות מיקרו-גריד מבוססות על שילוב מחז"מים ומתחדשות עשוי לשפר את מצב הבריאות ואיכות החיים של האוכלוסיות האלה – וגם להוריד את הנטל על כלל הציבור להוצאות הבריאותיות עבור האוכלוסייה הזאת.

מצד שני, בהקמת מיקרו-גרידים באזורים ממוקדים, יש להכיר בעובדה שהקמת ותפעול מערכות מיקרו-גריד שתומכות במיזמים סוג זה מצריכות משטרי ריבונות שמעודדות שיתוף פעולה בין משתמשים. כמו כן, המיקרו-גריד כמשאב משותף (COMMON POOL RESOURCE) סובל מהקושי למנוע שימוש, כולל העובדה ששימוש על-ידי משתמש אחד עלול להוריד את זמינות המשאב למשתמש אחר (SUBTRACTABILITY). יש כבר ניסיון רב בטיפול יעיל בבעיית המשאבים המשותפים, אבל הצעד הזה כרוך בעלויות נוספות.²⁰⁴ יצוין שהאתר הזה קיים אפילו קביעת תעריפי חשמל, שהרי מערכות ההולכה והחלוקה הינן משאבים משותפים והרגולטור צריך לבחון איך להקצות את העלויות האלה בין סוגי צרכנים. ההבדל העיקרי הינו שחברות חשמל מתכננות ומקימות תשתיות כאלה עם מרווח מסוים כדי לטפל בהסתברות של אי-יעילות במשאבים המשותפים – ולקבל הכרת העלויות האלה בתעריף. לעומת זאת, בעלי המיקרו-גריד לא יוכלו להסתמך על העברת הסיכון הזה לכלל הצרכנים כמו חברות חשמל מפוקחות.

עוד יצוין שאפשר לכלול השפעות סביבתיות במסגרת התועלות החברתיות. למשל, כתוצאה ממזג אוויר קיצוני כמו הוריקן סנדי²⁰⁶, התברר שרוב הנזקים הסביבתיים התרחשו באזורי תחנות כוח, מתקני טיפול בפסולת מוצקה, שבהם יש ריכוזים של משקי בית בעלי הכנסה נמוכה. בנוסף, אי-הוודאות הכלכלית בתקופת שיקום האזורים האלה עלולה לגרום למשפחות "גבוליות" להיכנס למאבק כלכלי, בעיקר בגלל הריכוז המשמעותי של משרות במשקי השירותים באזורים העלולים להיעלם במשך תקופת השיקום. הגידול במספר משקי הבית האלה גרם לא רק לעליה חדה במענקים של ה-FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, אלא גם לעלויות בתקציבי הרווחה ובמסים שגרמו להאטה נוספת בשיקום אחיד בכלכלה האזורית אחרי המשבר הכלכלי. לפיכך, יש לקחת בחשבון את ההדדיות בין תועלות הסביבתיות ותועלות החברתיות בניתוח השלכות יישום המיקרו-גריד בישראל.

ישנן כמה שיטות לכימות התועלות החברתיות. שיטה אחת שפותחה בקליפורניה הינה "מבחן העלות החברתית", שפותחה על-ידי הצוות המקצועי במחלקת האנרגיה ב-ENERGY DIVISION של הרגולטור המדיני CALIFORNIA PUBLIC UTILITIES COMMISSION (להלן, "ה-ED"). בעבודה הזאת, נתמקד בהשפעות על רווחת הציבור עם דגש על צדק חלוקתי, ובעיקר בצמצום הפער במעמד הכלכלי של

²⁰³ <http://www.cleanelectricgroup.org/wp-content/uploads/RPP-webinar-slides-11.2.16.pdf>

²⁰⁴ <http://steps-centre.org/wp-content/uploads/Rural-Electrification.pdf>

²⁰⁵ <http://dare.uva.nl/search?identifier=b5ed77bf-d12d-421f-8d39-d684e8844eb6>

²⁰⁶ <http://www.esa.doc.gov/sites/default/files/sandyfinal101713.pdf>

אוכלוסיות שונות ונגישות לחשמל אמין וגם התרומה ולתוצר הלאומי הגולמי. אולם, לא נתייחס לתועלות חברתיות הנובעות ממיזמים לשיתוף פעולה בינלאומי בטכנולוגיות אנרגיות בעלת טביעת-רגל פחמית נמוכה²⁰⁷.

לעומת זאת, יש לקחת בחשבון את העלות העיקרית הנובעת מפריסת המיקרו-גריד – כלומר, הפגיעה בהכנסות של חברות הולכת/חלוקת החשמל והעברת ההכנסות האלה – שהן המוכרות בתעריפים – לצרכנים שאינם עוברים למיקרו-גריד וממשיכים לקבל מלוא אספקת החשמל מחברת החשמל המכהנת.. בהרבה (אם לא ברוב) המקרים האלה, אין לצרכנים האלה את האמצעים כדי לנצל את פריסת המיקרוגריד, דבר שעלול להרחיב את הפער בין צרכנים במעמדי רווחה שונים. יש לציין שיש כבר ניסיון מצטבר – גם בישראל וגם בחו"ל – בהתייחסות להשפעות רפורמות בתעשיות חיוניות שונות על אוכלוסיות חלשות והחובה לשמור על "רף צדק חלוקתי מינימלי". למשל, ברפורמות במשק החשמל בחו"ל, רגולטורים טיפלו באי-שוויון הטבעי בשווקים תחרותיים באספקת החשמל (כאשר צרכנים תעשייתיים נחשבים כאטרקטיביים יותר וכפועל יוצא, משקי בית עלולים להישאר עם חברות החשמל הנוכחיות ולשלם עבור העלויות "הנטושות" הנשאות בחברות החשמל). ישנן כמה דרכים כדי לשמור על הלקוחות הנשארים – וגם על האיתנות הפיננסית של חברות החשמל – נגד הנטייה ל-CHERRY PICKING של הלקוחות האטרקטיביים, כאשר רובן מתייחסות לשינוי במדיניות תעריפית²⁰⁸, אולם, קיימות דרכים חדשות בקליפורניה ובניו-יורק כדי למזער את אי-השוויון הנוסף העלול להיגרם ביישום המיקרו-גריד.

להלן כמה דוגמאות של יישום מיקרו-גריד בעיקר מסיבות כלכליות:

- GREEN MOUNTAIN POWER – בשנת 2015, חברת החשמל המפוקחת הגדולה במדינת ורמונט יישמה מיקרו-גריד שכולל 770 פנלים סולריים (2 מגהוואט) מגובים על-ידי מערכת אגירה בסוללות (4 מגהוואט) בשם STAFFORD HILL SOLAR FARM, לצורך פיתוח כלכלי בעיר רטלנד שבמדינת ורמונט (16 אלף תושבים) כיעד ליזמות באנרגיה מתחדשת²⁰⁹. בקיץ 2016, המיקרו-גריד חסך לצרכני החברה כ-200 אלף דולר בתשלומים לחברת ניהול המערכת ISO NEW ENGLAND כתוצאה מהורדת תרומתן לשיא הביקוש שלה²¹⁰.
- NYSERDA (חברה בבעלות ממשלתית חלקית לקידום מחקר ופיתוח בתחומי התייעלות אנרגטית ואנרגיה מתחדשת). הפרויקטים של NYSERDA כוללים, בין היתר:

- יישום מיקרו-גריד בעיר סירקיוז שבניו-יורק (כ-140 אלף תושבים). הפרויקט כולל אספקת חשמל ל-2300 צרכנים סופיים, כולל מוסדות חינוך, מטות למשטרה וכבאי אש, כ-1700 משקי בית, וכ-600 צרכנים מסחריים ותעשייתיים. מטרת המיקרו-גריד כוללת, בין היתר, שיפור אמינות החשמל כדי לשפר את התחרותיות הכלכלית של העיר ובמרכז מדינת ניו-יורק

²⁰⁷ http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Captur_the_MultiplBenef_ofEnergyEfficiency.pdf

²⁰⁸ <http://www.srpnet.com/prices/priceprocess/pdf/DGRateReview.pdf>

²⁰⁹ <https://microgridknowledge.com/vermont-builds-microgrid-revitalize-city/>

²¹⁰ <http://www.cleangroup.org/ceg-projects/resilient-power-project/featured-installations/stafford-hill/>

בכלל²¹¹. המיקרו-גריד מבוסס על מערכת פסולת-לאנרגיה שכוללת מערכת גיבוי מטורבינות גז.

■ תחרות NY PRIZE, כאשר קריטריון מהותי בקבלת החלטות על הזכייה הינו תרומת המיקרו-גריד לציבורים בעלי הכנסה נמוכה. המיקרו-גרידים האלה מתמקדים בתשתית חיונית לאוכלוסיית בסיכון ובעיקר בסופות, הוריקנים, וכדומה. המיקרו-גרידים האלה כוללים, בדרך כלל, בנייני דירות ממונים על-ידי הציבור, בתי חולים, ומקלטים להומלסים, וגם תשתיות כבאי אש, משטרה, ושירותים חירום אחרים.²¹² המיקרו-גרידים הזוכים כוללים, בין היתר,

- אזור המרכז הרפואי בעיר בפאלו (סמוך לשכונה ביתית בסיכון)
- עיר ג'ימסטון, שהיא עיר קטנה ובעלת שיעור משמעותי של תושבים מתחת לקו העוני
- וחשופה לסופות רבות והפסקות חשמל בתדירות גבוהה)²¹³.
- מנהטן – מיקרו-גריד 100% מתחדשות + אגירה בסוללות לפרויקט דיור ציבורי ע"ש מרקוס גרבי ממומן על-ידי חברת החשמל CONSOLIDATED EDISON והלוואות מה-NYCEEC (חברה ציבורית להתייעלות אנרגטית)²¹⁴.

- מדינת ניו-ג'רסי: ה-BOARD OF PUBLIC UTILITIES, בסמכותו כרגולטור על משק החשמל, מיישם מדיניות הממשלתית לקידום משאבי אנרגיה מבוזרים (להלן, "DER"), כאשר פיתוח כלכלי הינו בין הקריטריונים העיקריים בתקצוב וקידום פרויקטים. חברות החשמל המפוקחות מבצעות את הפרויקטים האלה ומקבלות הכרה תעריפית בעלויות הכרוכות בהם. התועלות הכלכליות כוללות, בין היתר, מיקום מפעלים לפיתוח וייצור טכנולוגיות התומכות במיקרו-גריד באזורי אוניברסיטאות פרינסטון ורטגרס, ושיפור בתחרותיות של מגזר הייצור במדינת ניו-ג'רסי²¹⁵, ובעיקר בחברות שמצריכות רמת אמינות גבוהה יותר מאשר הרמה המוצעת על-ידי חברות החשמל הנוכחיות²¹⁶.
- סן-פרנסיסקו: פרויקט ה-HUNTERS POINT²¹⁷ ממוקם באזור שסובל מעוני ופסולת מורעלת כבר עשרות שנים. כחלק מתכנית פיתוח הכלכלי של האזור, השכונה מפתחת מיקרו-גריד לכ-20 אלף צרכנים ביתיים ומסחריים/תעשייתיים. רוב היכולת המותקנת של המיקרו-גריד הינו ממתקנים סולריים על גגות וחניונים (כ-50 מגהוואט).

²¹¹ http://oneidalakewatershed.org/RFPs/CNY_RPDB_Microgrid_BCA.pdf

²¹² <http://microgridknowledge.com/microgrids-for-social-justice/>

²¹³ <https://microgridknowledge.com/ny-prize-stage-1-awards-who-why-and-whats-it-mean-for-community-microgrids/>

²¹⁴ <http://www.demand-energy.com/2017/04/13/demand-energy-brings-pioneering-solar-plus-storage-microgrid-to-new-york-city/>

²¹⁵ http://www.bpu.state.nj.us/bpu/pdf/reports/20161130_microgrid_report.pdf

²¹⁶ http://ceic.tepper.cmu.edu/-/media/files/tepper/centers/ceic/publications/phd%20dissertations/2006/doug_king_phd_thesis_2006%20pdf.pdf?la=en

²¹⁷ <http://microgridknowledge.com/make-many-community-microgrids-hunters-point-model/>

○ NREL וחברת החשמל COMMONWEALTH EDISON. מיקרו-גריד שמשלב מתקנים סולאריים ואחסון בסוללות בשכונת ברונזוויל שבשיקגו (שכונה "גבולית" מבחינה כלכלית)²¹⁸. הפרויקט צפוי לתרום כ-233 מיליון דולר לכלכלה המקומית, למנוע כ-80 מיליון דולר בעלויות הולכה, ולהפחית את גזי החממה בכ-30 מיליון ק"ג²¹⁹.

במקרה שלנו, מוצע לבדוק את השפעת הטמעת מיקרו-גריד באזורים בפריפריה כמו אזור הנגב, כאשר גם רמת האמינות הצפויה, החשיפה למזג אוויר קיצוני, שיעור העוני, והזדמנויות תעסוקה מוגבלות גורמים לכך שהתועלות מהטמעת מיקרו-גרידים עשויות להיות גבוהות מהממוצע הארצי. לכן, בכימות התועלות בישראל, יש לקחת בחשבון את השונות הדמוגרפיים והכלכלית בין אזורים (בעיקר נתוני הלמ"ס) וגם נתוני אמינות (בעיקר מרשות החשמל).²²⁰

a. דוגמה לכימות תועלות חברתיות – מכפיל כלכלי

בכל הדוגמאות הנ"ל, תועלת נוספת הינה הצורך לקדם עובדים מקומיים כדי להקים ולתחזק את המיקרו-גריד. כפועל יוצא, התוצרת המקומית תעלה, ובמידה שיש לגייס עובדים חיצוניים, מגזרי השירותים גם עשויים לגדול, דבר שעשוי ליצור מקומות עבודה נוספים ולהגדיל את התוצרת המקומית באמצעות "השפעת המכפיל הכלכלי" (MULTIPLIER EFFECT). מצד שני, יש לקחת בחשבון את העלויות הקשורות להכשרת העובדים האלה. לא ברור עד כמה הניתוחים הכלכליים התומכים בפרויקטים האלה לקחו את סך העלויות והתועלות האלה. בכל אופן, הגידול הכלכלי עשוי להיות שוויוני, שהרי הגידול בהון האנושי המקומי אינו בהכרח נובע לבעלי ההון הפיזי הקיים²²¹.

מוצע שהניתוח הכמותי שישקף את ה-MULTIPLIER EFFECT יתבסס על המתודולוגיה מקובלת של IRENA²²², שלוקח בחשבון גם מקומות עבודה ישירים ועקיפים, אם כי יש גם להתאים את הצורך "לייבא" עובדים או להכשיר עובדים קיימים לנסיבות הקיימות בישראל. עוד יצוין שמכיוון שקיימים יתרונות לגודל במיקרו-גרידים, הניתוחים האלה יתבצעו על פני כמה תרחישים שכוללים מספר גדלים שונים עם מרכיבים שונים (אגירה, מתקנים סולאריים, ניהול ביקושים ועוד). יצוין שהמכפילים האלה מתייחסים להקמת מתקני אנרגיות מתחדשות בלבד, ובעיקר PV ורוח. אולם, תועלת נוספת של הקמת מיקרו-גרידים נובעת מכך שמיקרו-גריד הוא פרויקט תשתיתי שיוצר

²¹⁸ <http://www.utilitydive.com/news/comed-pushes-ahead-with-bronzeville-microgrid-despite-lack-of-legislative/432689/>

²¹⁹ <http://microgridknowledge.com/make-many-community-microgrids-hunters-point-model/>

²²⁰ יודגש שהעבודה הזאת כבר בוצעה בהערות הכלכליות של קידום אנרגיה סולארית בישראל, ראה <http://www.greenpeace.org/israel/Global/israel/file/2005/7/greenpeace-solar-report-for-is.doc>

²²¹ https://dusp.mit.edu/sites/dusp.mit.edu/files/attachments/project/EMS_Microgrid.pdf

²²² <http://www.irena.org/rejobs.pdf>

מקומות עבודה בתחומי הבנייה, הנדסה אזרחית ותחזוקת תשתיות משולבות, שמצריכים פיתוח הון אנושי. לכן, אפשר לטעון שמכפילים המשמשים כהערכת השפעת אנרגיה מתחדשת חדשה על הכלכלה המקומית הינם נמוכים מדי.

לאור סקר השיטות לעיל, להלן המתודולוגיות שבהן מקבלי החלטות בעולם משתמשים לצורך אמידת התועלות הסביבתיות והחברתיות. יצוין שבישום המתודולוגיות, קיימים ליקויים בסדרות נתונים שאינם קיימים במחקרים הנ"ל שבוצעו מטעם האיחוד האירופי.

להלן הליקויים העיקריים:

- חוסר תכנית האב למשק האנרגיה – ובעיקר למשק החשמל מאושר. ולכן יש לקבל החלטה על תרחיש בסיס. למשל, בתרחישים שהוצגו למשרד האנרגיה במסגרת תכנית האב, אין מיקרו-גרידים מעבר לפיילוטרים הקיימים בשנת 2015. מוצע להשתמש כתרחיש הייחוס של תכנית האב המוגש למשרד האנרגיה ולהוסיף תרחישים מקובלים על-ידי משרד האנרגיה. בינתיים, מוצע להשתמש בקצב פריסת המיקרו-גרידים שפורסם על-ידי חברת נביגנט (תרחיש נמוך, בסיס, וגבוה)²²³.
- מכפילים כלכליים של השקעות בקידום טכנולוגיות חלופיות טרם חושבו לישראל באופן רשמי ומקובל על-ידי מקבלי החלטות ממשלתיות. בשלב מסוים, על הממשלה לבצע את העבודה הזאת (למשל, באמצעות מודלי שיווי משקל כללי וניתוחי תשואה/תפוקה). בינתיים, יש להסתפק בתוצאות מקובלות בעולם לאנרגיה מתחדשות, ולהתאים אותן לישראל. יצוין שמכפילים כלכליים מיוחסים לקידום מיקרו-גרידים טרם פורסמו.
- שימוש בנתונים מאירופה על-ידי משרדי ממשלה במקום לבצע אמידת הנזק הסביבתי השולי המקומי. לצורך המידול הנוכחי, משתמשים בנתונים מאירופה, אבל מוצע שהמדינה תקבע שיטת אמידה לישראל ולאמץ אותה במקום השימוש בנתוני ה-EXTERNE.
- הגדרת מיקרו-גריד יציגה. לעומת מערכות חשמל מבוססות על תחנות כוח מרכזיות, כמעט ואין דמיון בין מיקרו-גרידים – כלומר, התייחסות למיקרו-גרידים הינה מבחינת "כל מקרה לגופו". בכל אופן, לצורך כימות התועלות והעלויות הסביבתיות והחברתיות

²²³ <http://www.neaman.org.il>

של כניסת מיקרו-גרידים ברמה הארצית, יש להגדיר סוגי מיקרו-גרידים ולשקל אותם לפי ההספק הנקוב שלהם.

b. תועלות סביבתיות

בהערכת תועלות סביבתיות, יש גם לקחת בחשבון לא רק את הדלקים המאובנים המוחלפים על-ידי מיקרו-גריד מבוסס על מתחדשות, גז טבעי, וניהול ביקושים, אלא גם החיסכון בעלויות הנובעות ממערכת שיגור והעמסה מרכזית בידי מנהל מערכת ההולכה הארצית. במערכת הקיימת, מנהל המערכת חייב להשקיע זמן ומשאבים בהסטת תפוקת תחנות הכוח המופעלות כדי להתמודד עם התנודתיות של אנרגיות מתחדשות מרוחקות. במיקרו-גרידים, אפשר להתמודד עם אי-רציפות התפוקה מהשמש והרוח באופן פשוט יותר²²⁴. מוצע בשלב הזה לכמת את החיסכון באמצעות נתונים זמינים מרשות החשמל לגבי עלות ניהול המערכת והערכת התדירות שיש לבצע REDISPATCH המערכת הארצית כדי להכיל את האנרגיה המתחדשת. יצוין שבעולם יש הערכות העלויות האלה, אולם יש לקחת בחשבון את הנסיבות המיוחדות של ישראל כ"אי-בודד" חשמלי.

לגבי עלויות הפליטות הנמנעות. יש להסתמך על נתוני רשות החשמל המבוססים על נתוני EXTERNE עבור יוון. מוצע לבצע חישובים על בסיס מיקרו-גריד ישראלי שהוא 80% גז טבעי ו-20% סולארי כדוגמה בסיסית. אולם, יש להתייחס לעובדה שהמיקרו-גריד גם מאפשר שילוב ניהול ביקושים פעיל ואגירת אנרגיה בשיעורים שאינם קיימים במערכת המרכזית. לכן, אפשר להוריד את אחוז גז הטבעי ל-60-70%, ולאמוד את עלויות הפליטות הנמנעות מחשמל לא-נצרך או חשמל מתחדש שנאגר. אולם, ללא מודלים מורכבים (PLEXOS וכדומה), כל הערכה תבוסס על חישובים "בקירוב".

להלן ריכוז הנתונים המוצעים לצורך ביצוע הניתוחים הכלכליים:

- גידול שנתי בגידול במיקרו-גרידים:
 - נמוך: 4% לשנה עד שנת 2025
 - גבוה: 17% לשנה עד שנת 2025 (מבוסס על נתוני חברת נביגנט לארה"ב)
 - גבוה: 25% לשנה עד שנת 2025 (גם מבוסס על נתוני נביגנט)²²⁵
- מכפיל כלכלי:
 - נמוך: 1.5 (מכפיל השמרני של IRENA ועבודת אקו-אנרגי בישראל)

²²⁵ <https://www.navigantresearch.com/newsroom/identified-microgrid-capacity-has-tripled-in-the-last-year>

○ גבוה: 2.0 (מכפיל מניתוחים של IRENA וה-CPUC)

טבלה 29: עלויות מרכיבי המיקרו-גרید

סוג עלות	עלות	הערה
סוללה	10 סנט לקוויט"ש ; ירידה שנתית 10% (LEVELIZED COST)	ממוצע של סקר שוק (בעיקר ENERGY STORAGE (ASSOCIATION
תא דלק	15 סנט לקוויט"ש	נתוני LBNL
מיקרו-טורבינה	1500 דולר לקוויט"ש	נתוני LBNL ונביגנט
מיקרו-טורבינה מתקדם	400 דולר לקוויט"ש	נתוני LBNL ונביגנט
דיזל גנרטור	40 סנט לקוויט"ש	
שיעור היוון – פרמיה על עלות ההון של 7.5%	2.5 – 3.0% (תלוי בגיול הטכנולוגיה)	נתונים מ-IRENA
שילוב/חיבור (GRID) (TIED INTEGRATION	1150 דולר לקוויט"ש	נביגנט ²²⁶
עלות מותקנת PV	3100 דולר לקוויט"ש	נביגנט
עלות מותקנת רוח	3400 דולר לקוויט"ש	נביגנט
עלות מותקנת אגירה	2100 דולר לקוויט"ש	נביגנט
הטסת אנרגיה מתחדשות הנובעת מאגירה	230-400 דולר לקוויט"ש על פני 10 שנים	
עלות גז טבעי	4.5 – 6.0 דולר ל- MMBTU	
עלות פחם	95 – 110 דולר לטון לטווח הארוך	
עלות מזוט לחבית	60 – 100 דולר (טווח ארוך)	
עלות פחם	EXTERNE או ציטוט WEO (הקטן ביניהם)	

להלן, העלויות הממוצעות על פני זמן (LEVELIZED COSTS) של מרכיבי מיקרו-גריד יציג :

c. תועלת חברתית- מכפילים כלכליים

מכפילים כלכליים מצביעים על השפעת השקעה מסוימת על כלל המשק. למשל, אם המכפיל הינו 1.5, אז השקעת דולר אחד במיקרו-גריד תגרום ל-\$1.50 נוסף לפעילות המשקית. במחקרים קודמים, המכפילים הכלכליים נעים בין 1-4, כאשר טווח שמרני ומקובל הינו בין 1.5 ל-2.0.^{227,228,229} מניתוחי נתונים מקליפורניה, נאמד כי מספר מקומות עבודה עולה בכ-5.7 שנות עבודה לאדם (PERSON YEARS) על פני 10 שנים עם כל מיליון דולר מושקע באנרגיות מתחדשות.²³⁰

טבלה 30: אמידת מכפילים כלכליים קשורים למרכיבי מיקרו-גריד

מקור	סך מקומות עבודה למגהוואט (ישירים + עקיפים)	טכנולוגיה
REPP	7.41	PV
גרינפיס	10.56	PV
REPP	0.71	רוח
גרינפיס	2.79	רוח
REPP	0.95	גז טבעי

יצוין שהמכפיל תלוי באופן מהותי בתמהיל המשאבים במיקרו-גריד. למשל, השקעה במגהוואט נוסף בפוטוולטאי תורמת ליותר מפי שנים מספר מקומות עבודה מאשר השקעה במגהוואט נוסף בתחנה שמייצרת בגז טבעי.²³¹ עוד יצוין שהמכפילים האלה אינם משקפים השפעות משניות כמו שיפורים בהשקעה בהון אנושית (בריאות וחינוך) ; אולם, אפילו IRENA שמובילה את שיטות חישוב מכפילים כלכליים בתחום המתחדשות

²²⁷http://www.bcit.ca/files/ir/pdf/economic_impact_report_2015.pdf

²²⁸<http://www.westhawaiiforum.org/wp-content/uploads/2016/01/HECO-HELCO-Power-Supply-Improvement-Plan-Update.pdf>

²²⁹[http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Measuring-the-](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf)

[Economics_2016.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf)

²³⁰ Daniel Kammen, *Putting Renewables to Work; How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate?*

²³¹http://rael.berkeley.edu/old_drupal/sites/default/files/very-old-site/renewables.jobs.2006.pdf

: ²³¹<http://www.westhawaiiforum.org/wp-content/uploads/2016/01/HECO-HELCO-Power-Supply-Improvement-Plan-Update.pdf>

והרשת החכמה, מתכוונת להכליל את החישובים האלה רק בעתיד. בנוסף, IRENA וחברות אחרות אמדו את המכפיל באמצעות מודלי "תשואה-תפוקה" מורכבים; בשלבים הבאים, מומלץ לבנות מודל מסוג זה לצורך חישוב מכפילים כלכליים, ולא להסתמך על נתונים בעולם בלבד.

טבלה 31: הגדרת מיקרו-גריד יציג לצורך כימות העלויות והתועלות

מרכיב המיקרו-גריד	הנחה	הערה
גודל המיקרו-גריד (הספק מותקן)	10 מגהוואט (6.2 ממוצע בשימוש)	נתון יציג – חברת נביגנט
הספק מותקן – רוח	6 מגהוואט עלות 4.5 מיליון דולר	2 מתקנים בעלי הספק 3 מגהוואט
תשתית אחר	129 אלף דולר	
משק חי המיקרו-גריד	20 שנים	נתון יציג – חברת LBNL
שיעור היוון תועלות האלה	3.5%	סקרים לעיל וקבילות אצל רגולטורים בחו"ל שמקף את ערך הזמן של תועלות ועלויות סביבתיות ארוכות-הטווח)

IV. תיאור מודל כימות ההשפעות הסביבתיות והחברתיות

על סמך הנתונים הנ"ל, בנינו מודל לכימות ההשפעות הסביבתיות והחברתיות. יצוין שהמודל הזה חייב להיות מודל משלים למודל שמכמת את היתרונות והחסרונות של המיקרו-גריד למערכת החשמל. למשל, המודל הזה לוקח בחשבון שאנרגיות מתחדשות לא-רציפות תהיינה חלק מהותי במיקרו-גריד, אבל המודל אינו מתחשב ביתרונות של המיקרו-גריד על המערכת הארצית בהטמעת המתחדשות האלה.

להלן ההנחות העיקריות לתרחיש הבסיסי של המודל:

נתון	הנחה	בסיס ההנחה
עלויות סביבתיות	נתוני משרד הגנת הסביבה (מבוסס על EXTERNE)	
LCOE מרכיבי המיקרו-גריד	EIA	
עלות אי-אספקה (דולר למוט"ש)	2500 (ביתי); 10,000 (מסחרי); 25,000 (תעשייתי) – ממוצע = 8250	סקר נתונים מחו"ל
מכפילים כלכליים	1.13	

יחס - משכורת ביחס למשכורת הממוצעת	1.60 (מקומות עבודה ישירים) 1.37 (מקומות עבודה עקיפים)	סקר נתונים מחו"ל
עלות מוכרת - ייצור חשמל בישראל	רכיב ייצור בתעריפי החשמל	רשות החשמל
מקדמי אספקה (CAPACITY FACTORS)	20% (PV); 26% (רוח); מיקרו-טורבינה (60%); סוללות (4%) ניהול ביקוש (2%).	סקר נתונים מחו"ל

להלן תוצאות לעלויות ותועלות שנתיות: תרחיש הבסיס כאשר הספק הנקוב של המיקרו-גריד = 10 מגהוואט:

תועלות	מיקרו-גריד	קובנציונלי	הפרש
אמינות	\$ 412,500	\$ -	\$ 412,500
כלכלית/חברתית	\$ 14,184,873	\$ 1,168,460	\$ 13,016,413
סה"כ תועלות	\$ 14,597,373	\$ 1,168,460	\$ 13,428,913
עלויות			
ייצור	\$ 8,223,252	\$ 2,065,271	\$ 6,157,981
סביבתיות	\$ 86,048	\$ 375,989	\$ (289,941)
סה"כ עלויות	\$ 8,309,300	\$ 2,441,260	\$ 5,868,040
תועלות (עלויות) נטו	\$ 6,288,073	\$ (1,272,800)	\$ 7,560,873

V. סיכום

המסמך הזה משמש כבסיס לכימות התועלות הסביבתיות והחברתיות. בשלב הזה, השיטה אינה מושלמת משתי סיבות: (1) חוסר מחקרים מקומיים על התועלות האלה בקשר לאנרגיה מתחדשת ושימוש במשאבי צד-ביקוש (כולל התייעלות אנרגטית) שדומים לאלה מאירופה ומארה"ב; ו-(2) חוסר עבודות דומות על פריסת מיקרוגרידים עצמם. אף במדינות כמו ניו-יורק וקליפורניה שמובילות את כניסת המיקרו-גרידים במשק, כימות התועלות החברתיות והחברתיות עדיין נושאים לדיונים ותהליכים רגולטורים שעלולים להימשך לפחות עד שנת 2020. לכן, לצורך סיום העבודה הנוכחית, נסתמך על נתונים ושיטות מהעולם לגבי אנרגיות מתחדשות, סוללות, וניהול ביקושים ולשקף אותן במסגרת מיקרו-גרידים שגם יכללו את המרכיבים האלה.

הנושא של מכפילים כלכליים שנוי במחלוקת מכמה סיבות, כולל: (1) אי-יכולת לסחור בשירותי המיקרו-גריד שהם בעיקר מקומיים; ו-(2) קושי באמידת הגידול ברווחה הכלכלית האזורית בפריפריה, כאשר רוב ייצור

התשתיות והתקנתן יתבצע על ידי אנשי מקצוע מחוץ לאזור המיקרו-גריד. עד כה, הנושא של מכפילים כלכליים קיבל ביטוי ביישומי מיקרו-גרידים ממקודים בלבד במסגרת בדיקת כדאיות ליישום מיקרו-גרידים בבתי-חולים, בסיסים צבאיים, ואוניברסיטאות. לצורך הניתוח שלנו, השתמשנו במכפילים הכלכליים השמרניים ביותר ליישום מיקרו-גריד "ציבורי" (כלומר, לא מוגבל למוסד מסוים).

נושא שאינו מקבל ביטוי בעבודה הזאת הינו כושר המערכת להתאושש בעצמה (RESILIENCE). עד כה, התועלת הזאת קיבלה התייחסות רק במקרים הקיצוניים ביותר, כמו הוריקן סנדי. אולם, בתפעול מערכות הייצור והמירה השגרתיות, קיים ערך ליכולת להתאוששות עצמית בפני גורמים בלתי-צפויים. אמנם אמידת ערך ההתאוששות הזאת תלויה מהותית בנסיבות שגרמו לירידה ב-RESILIENCE, אבל כבר יש מדגם מספיק גדול ומהותי (מבחינת סטטיסטיקה) של מיקרו-גרידים ופתרונות דומים כדי לבצע את הצעד הראשון בחישוב העלויות מול התועלות האלה.

1. ABSTRACT

In countries with established centralized electricity systems, policy makers, electrical utilities, and citizens are evaluating whether the current dominant utility paradigm of one-way electricity flow from large generating plants to far away end users is the best approach to meeting their societies' needs and aspirations. The vertically-integrated monopoly model of massive generating plants and extensive transmission systems is starting to show its age and reveal vulnerability to natural disasters, congestion, cascading outages, environmental concerns, and competition from nimble distributed resources. At the other end of the scale, developing countries that lack reliable power are trying to improve lives by increasing access to reliable electricity. Interestingly, rich and poor nations are converging on the same solution to their respective dilemmas: the microgrid. This review paper covers a broad scope including the trends driving deployment of microgrids, what microgrids are and how they function, their potential benefits, the major barriers to their adoption, and possible solutions to these challenges. The goal is to give readers a general up-to-date understanding of important technical and non-technical aspects of microgrids and the role microgrids can play to help provide safe, resilient, affordable, clean, and accessible electricity to citizens from remote rural areas all the way to the world's biggest cities. The paper focuses mainly on the situation in the United States but includes observations from across the globe including examples and lessons learned from microgrids operating today.

2. INTRODUCTION

2.1. Background

This review paper focuses on modern microgrids being developed and deployed today in the context of a mature “macrogrid” that features gigawatt scale generating units, thousands or even hundreds of thousands of miles of high voltage transmission lines, minimal storage, and that is predominantly fueled by fossil energy sources. Today’s grid is not a static entity, though; we are traveling a historic arc that began with small-scale distributed generation in the late 19th century, followed by consolidation and centralization driven by growing demand, and now experiencing the beginnings of a return to decentralization. From the 1920s through the 1970s, the increased reliability afforded by connecting multiple generating units to diverse loads, decreased construction costs per kilowatt (kW), and ability to draw power from distant large generating resources like hydropower drove the development of the grid we see today (Barker, Johnson, & Maitra, 2001; Lovins & Rocky Mountain Institute, 2002). However, those advantages seem to have reached their limits, and seem to be eroded by environmental and economic concerns. Driven by utility restructuring and improved distributed energy resource (DER) technologies in the context of economic risks that accompany the construction of massive generating facilities and transmission infrastructure, companies that generate electricity have been gradually shifting to smaller units over time (Lovins & Rocky Mountain Institute, 2002). This transition is driven by a range of DER benefits that have been studied in detail (Gumerman, Bhavirkar, LaCommare, & Marnay, 2003; Iannucci, Cibulka, Eyer, & Pupp, 2003), such as deferral of generation, transmission, and distribution capacity; voltage control or VAR supply, ancillary services, environmental emissions benefits, reduction in system losses, energy production savings, enhanced reliability, power quality improvement, combined heat and power, demand reduction, and standby generation. These benefits accrue not only to smaller versions of existing fossil-fueled plants – they even accompany deployment of intermittent renewable generating sources, as shown by a

foundational study of a 500 kW distributed generation PV plant in California (Farmer, Wenger, Hoff, & Whitaker, 1995; Hoff, Wenger, & Farmer, 1996).

Some of the decentralization is driven by challenges to siting additional transmission infrastructure and the capital cost of adding traditional generation; utilities are now exploring ways to add capacity to the grid at strategic distribution system chokepoints through a combination of energy efficiency, demand response, and distributed energy resources. Another driver is vulnerability of the grid to natural disasters, physical and cyber-attacks, and cascading power failures. Recognizing the importance of uninterrupted high quality power to their economies and critical services, governments are increasingly willing to put money into supporting smart, decentralized grid architectures that are thought to be more resilient to these threats. The challenge of radically decreasing greenhouse gas emissions to mitigate serious climate disruption have led to policies that incentivize deployment of carbon-free generating sources, many of which lend themselves to distributed applications.

Cost savings; improved resilience and reliability; integration of clean generating sources needed to dramatically reduce greenhouse gas emissions: the case for distributed generation seems compelling; however, it is not without its challenges (J.A. Peças Lopes, Hatziargyriou, Mutale, Djapic, & Jenkins, 2007). The move from a one-way electricity flow from large synchronous generators to customers to a complex flow of energy between a multitude of power-electronics based distributed energy resources and end use loads is a profound paradigm change for the industry; it therefore must clear multiple legal, regulatory, and technical hurdles. One small example is safety: distributed generating units introduce special safety considerations since they continue to inject electricity when the grid is down, putting line workers at risk unless they are taken off line. Many renewable resources are variable and non-dispatchable, leading to concerns about the impact of widespread adoption on grid management and stability (Liu & Bebic, 2008). How will the new

grid manage thousands – or tens of thousands – or hundreds of thousands – of distributed energy resources to match supply and demand for electricity at all points in the system, at all times?

Microgrids, which can operate while connected to or disconnected from the main electricity grid, are poised to handle a rapid introduction of distributed energy resources including intermittent renewable generation in a way that is safe for line workers and transparent to distribution system operators, while delivering superior resiliency advantages compared to other smart grid architectures. The microgrids being discussed today in industrialized nations, echoing their U.S. university campus antecedents, emerged in the mid 1990s as a way to mitigate the challenges of distributed generation (whether renewable or fossil-fueled), capture economic benefits, and tailor power quality and reliability (and in the case of military microgrids, energy security) to end user needs. Today's microgrids even evoke comparisons to Thomas Edison's original power stations installed in the late 19th century, not least in the emergence of all-DC power systems and in the use of batteries to help balance generation and demand (João Abel Peças Lopes, Madureira, & Moreira, 2013).

Despite the appeal of the microgrid concept, proof of its capabilities in the laboratory, and demonstration by early adopters, all of which will be described below, uptake today is still slow, for several reasons. There are four main challenges, along with some possible paths forward to resolving them that will be discussed in this paper. The first is that the regulatory and legal framework undergirding the electricity market reflects a century of growth under a centralized generation, transmission and distribution system with a one-way flow of electricity, so that a great deal of time and expense is required to gain legal approvals for microgrid projects and interconnect them to the grid. The second is that the benefits of microgrids are manifold but many of them are not easily calculated and there is no market for them. The third

challenge is that many of the technologies proposed for microgrids and their deployment as an integrated system are still fairly new and unfamiliar in the market, leading to cost premiums, interoperability challenges, and perceived risks that may deter potential investors. The last challenge is simply inertia – aside from special cases, customers may generally be fairly satisfied with the status quo and lack motivation to seek a new utility model, especially if they fear it will result in higher electricity costs or a new set of poorly understood risks. At the same time, while barriers may still remain, it is important to recognize that microgrid technologies are rapidly maturing and the regulatory environment is showing a flexibility that is helping microgrids move from the pilot project and R&D phase into the next phase of project deployment (Asmus & Lawrence, 2016a). This transition is being driven by standardization of technology, communication, and interconnection requirements, proven contract structures, successful pilot projects, and identification of key value streams. Further market uptake will depend on a clear statutory and regulatory microgrid definition (specifically whether a given microgrid qualifies as an electric corporation or not), clarification of franchise rights across public streets, liability for service quality issues, tariff issues for energy buyback and ancillary services, and other customer service issues that will arise as the energy market evolves (Jones, Bartell, Nugent, Hart, & Shrestha, 2013).

The more than 1 billion people on the planet that currently lack access to reliable electricity –

or to any electricity at all – face a separate set of challenges from those who may face just hours without electricity each year (Schnitzer et al., 2014). In many places, they face a situation where nights are dark, water carries disease, critical medicines cannot be preserved, and even small-scale industry is impossible. Often, the limited electricity that is available is generated using expensive diesel fuel and light is provided by unhealthy and dangerous kerosene. Remote microgrids combining clean generation and storage, in some cases facilitated by innovative mobile

payment platforms, provide a lifeline to people in poor and remote areas, allowing children to study at night, medical systems to provide reliable service, and entrepreneurs to improve their livelihoods. These remote microgrids are leveraging the same advances in power electronics, information and communications technologies, and distributed energy resources that are driving changes in the grid in industrialized countries, allowing developing nations to potentially leapfrog to a world of smart microgrids, in the same way that mobile communications allowed them to connect to each other and the outside world without building up extensive landline networks.

Several broad review articles have been published that cover recent developments in microgrids, from technical (Basak, Chowdhury, Halder nee Dey, & Chowdhury, 2012; Parhizi, Lotfi, Khodaei, & Bahramirad, 2015), legal and regulatory (Basso, 2014; Jones et al., 2013; Kroposki, Basso, & DeBlasio, 2008; 2008; Qu, 2014), and economic (Basu, Chowdhury, Chowdhury, & Paul, 2011; Schwaegrl et al., 2009; Michael Stadler et al., 2015) perspectives. Some authors have provided good multidisciplinary reviews of the topic cutting across these three categories and explore barriers to microgrid deployment (Del Carpio Huayllas, Ramos, & Vasquez-Arnez, 2010; N. Hatziaargyriou et al., 2006; João Abel Peças Lopes et al., 2013; Soshinskaya, Crijns-Graus, Guerrero, & Vasquez, 2014). Readers are encouraged to consult these valuable contributions and the articles cited therein. This paper aims to build on previous efforts by synthesizing important conclusions across these multiple disciplines, so that readers gain a broad understanding of microgrids from multiple perspectives.

2.2. Foundational Microgrid Work

Research on microgrids began in earnest in the mid-1990s in the United States and Europe, as part of an effort to evaluate the benefits of distributed generation

(including distributed renewables) for alleviating transmission and distribution system capacity constraints and to improve electric grid operation (Farmer et al., 1995; Hoff et al., 1996). Early examples of remote (Nayar, 1995) and grid-connected microgrids (Hoff, Wenger, Herig, & Shaw Jr, 1998a) in the literature from 20 years ago resemble systems being discussed today, in many ways. The advantages of hybrid diesel-renewable remote microgrids (often called “mini-grids” in the literature) for improving system efficiency, reducing fuel costs, and improving reliability were recognized early on. In the case of residential grid-connected systems, the potential of cogeneration of heat and power to radically improve system efficiency was highlighted in the literature, as was the ability of the microgrid to combine renewables and dispatchable fossil-fueled resources like fuel cells. However, the relatively high cost of solar photovoltaic panels at that time – which have since declined dramatically (Feldman, Barbose, & Margolis, 2015) – and lack of mass-produced micro-generation fuel cells were cited as barriers to market uptake.

Systematic research and development programs began with the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) effort in the United States (R. Lasseter et al., 2002) and the MICROGRIDS project in Europe (N. Hatziaargyriou et al., 2006). CERTS, formed in 1999 and funded in 2001 by the U.S. Department of Energy and California Energy Commission (McGowan, 2011), has been recognized as the source of the modern grid-connected microgrid concept (João Abel Peças Lopes et al., 2013). CERTS envisioned a microgrid that could incorporate multiple distributed energy resources (DERs), yet present itself to the existing grid as a typical customer or small generator, in order to remove perceived challenges to integrating DERs (R. Lasseter et al., 2002; R. Lasseter & Piagi, 2004; Chris Marnay & Bailey, 2004). Emphasis was placed on seamless and automatic islanding and reconnection to the grid and passive control and protection strategies such as reactive power versus voltage, active power versus frequency, and flow versus frequency droop controls (Piagi & Lasseter, 2006). The goals of these strategies were to: 1) remove reliance on high-speed communications and master controllers,

yielding a “peer-to-peer” architecture; and 2) create a flexible “plug-and-play” system that would not require extensive redesign with the addition or removal of DERs, in order to lower system first costs and provide the freedom to locate cogeneration facilities near thermal loads. The droop-based controls are critical for seamless isolation from the main grid and for stable, autonomous control in an islanded situation (João Abel Peças Lopes et al., 2013). CERTS emphasized the role of cogeneration of power, heat, and cooling, recognizing an opportunity for cost savings and peak load reduction that could drive market uptake. The CERTS microgrid concept has been deployed in a test bed setting (Eto & Others, 2009; R.H. Lasseter et al., 2011) to test innovative strategies for automatically islanding and resynchronizing microgrids, providing electrical protection within the microgrid, and controlling energy sources autonomously in the microgrid during islanding; it has also been deployed in real microgrid projects (Alegria, Brown, Minear, & Lasseter, 2014; Panora, Gehret, Furse, & Lasseter, 2014). While the initial motivation of CERTS was to improve reliability rather than to reduce greenhouse gas emissions, per se, CERTS microgrids can incorporate renewable microgeneration sources.

European efforts to stimulate microgrid adoption seem to have been largely driven by climate change concerns (N. Hatziargyriou et al., 2006). That said, the EU MICROGRIDS project explored technical challenges that were similar to the CERTS effort such as safe islanding and reconnection practices, energy management, control strategies under islanded and connected scenarios, protection equipment, communications protocols. Research findings included (N. Hatziargyriou et al., 2006):

- Development and enhancement of microsource controllers to support frequency and voltage using droop-based strategies;
- Development of microgrid central controller economic scheduling functions;

- Analysis of the communication requirements of the microgrid control architecture;
- Investigation of alternative market designs for trading energy and ancillary services in a microgrid and development of methods to quantify reliability and loss reduction benefits; and,
- Measurements from an actual low voltage microgrid installation.

2.2.1. Definitions

Two similar microgrid definitions are cited repeatedly in the literature and seem to represent the consensus definition of the modern microgrid. The first, developed for the U.S. Department of Energy by the Microgrid Exchange Group, an ad hoc group of research and deployment experts, defines a microgrid as:

“A group of interconnected loads and distributed energy resources within clearly defined electrical boundaries that acts as a single controllable entity with respect to the grid. A microgrid can connect and disconnect from the grid to enable it to operate in both grid-connected or island mode (Ton & Smith, 2012).”

The second slightly more detailed but essentially similar definition was developed by the Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE, translated into English as “the International Council for Large Electric Systems”) working group 6.22:

“Microgrids are electricity distribution systems containing loads and distributed energy resources, (such as distributed generators, storage devices, or controllable loads) that can be operated in a controlled, coordinated way either

while connected to the main power network or while islanded (Chris Marnay et al., 2015).”

The CIGRE working group added three qualifiers to this definition:

“Generators covers all sources possible at the scales and within the context of a microgrid, e.g. fossil or biomass-fired small-scale combined heat and power (CHP), photovoltaic modules, small wind turbines, mini-hydro, etc.

Storage Devices includes all of electrical (e.g. superconducting magnetic energy storage), electrochemical (e.g. batteries), mechanical (e.g. flywheel) and heat storage technologies. While the microgrid concept focuses on a power system, thermal storage can be relevant to its operation whenever its existence affects operation of the microgrid. Similarly, the precooling or heating of buildings will alter the load shape of heating ventilation and air conditioning system, and therefore the requirement faced by electricity supply resources.

Controlled loads, such as automatically dimmable lighting, building pre-cooling or delayed pumping, are particularly important to microgrids simply by virtue of their scale. Inevitably in small power systems, load variability will be more extreme than in utility-scale systems. The corollary is that both load control and storage can make a particularly valuable contribution to a microgrid.”

While the electrical capacity of a microgrid may have practical implications for interconnection and regulation, there is no universally accepted minimum or maximum size for a microgrid (Soshinskaya et al., 2014); rather, microgrids are defined by their function. At the same time, microgrids are generally recognized to be low or medium

voltage systems. Fully grid tied systems with distributed generation that cannot separate from the main grid operate in island mode are typically referred to as active distribution networks (Soshinskaya et al., 2014) or virtual power plants (Asmus, 2010; “Navigant Research,” 2014); these systems are compared and contrasted with microgrids below.

In thinking about microgrids, it may be helpful to think of them as a topology for aggregating distributed energy resources within a smart grid – a decentralized network with 2-way energy flows enabled by advanced information and communications technologies – into virtual power plants – multiple resources are managed to behave as a single controllable load or source of energy and ancillary services – that have the ability to operate in isolation from the main utility grid. Currently there is some debate about whether society would be better served in its pursuit for reduced electricity costs, reduced environmental impact, and improved resiliency by pursuing a decentralized architecture or doubling down and seeking a centralized “super-grid” approach enhanced with improved conductors, sensors, and information technologies. However, it is safe to say that microgrids are now seen as being a viable competitor to earlier, more centralized conceptions of the smart grid (Chris Marnay & Firestone, 2007).

3. Motivation for Microgrids

3.1 Power Quality and Reliability/Security

Public and governmental interest in microgrids has spiked following a series of recent major grid disruptions. In many of these situations, microgrids have demonstrated their ability to provide valuable continuity of service while the rest of the grid was without power. Examples include, but are certainly not limited to, the Northeast U.S. Blackout (2003), Japan Earthquake (2011), Hurricane Irene (2011), and Superstorm Sandy (2012). In Superstorm Sandy, for example, microgrids at New York University, Princeton University, and the United States Food and Drug Administration were able to provide service during multiple days of utility grid downtime (LaMonica, 2012). Grid outages related to severe weather in the United States from 2003-2012 have been estimated to have cost \$18 billion to \$33 billion per year, on average (President’s Council of Economic Advisers & U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2013). In 2012, the year that included Superstorm Sandy, the cost

due to weather-related outages in the U.S. was estimated to be \$27 billion to \$52 billion, due to lost output and wages, spoiled inventory, delayed production, and damage to the electric grid. Sandy alone took out electricity for more 8.5 million people, with 1.3 million still without power a week after the storm hit. There is a growing concern that weather-related disruptions will become more frequent and more severe over time across the United States due to climate change, lending a sense of urgency to addressing grid resilience (President's Council of Economic Advisers & U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2013). In the United States, so-called "critical facilities" and infrastructure such as transportation, communications, drinking water and waste treatment, health care, food, emergency response are receiving the most attention regarding resiliency (the ability to bounce back from a problem quickly) and reliability (the fraction of time an acceptable level of service is available). New York City, hit hard by Hurricanes Irene and Sandy, has begun evaluating the economics of connecting multiple dispersed critical facilities on a single microgrid in comparison to the business-as-usual approach of having separate backup generators for each facility (New York State Energy Research and Development Authority, New York State Department of Public Service, & New York State Division of Homeland Security and Emergency Services, 2014). The authors note that this scenario is a challenging case in the current regulatory environment because it would involve installing distribution infrastructure across public rights of way and would likely require regulatory reform. The study concluded that microgrids in this scenario may not be justifiable on a purely economic cost-benefit basis if back-up generation is already installed, though the economics improve with the amount of time the microgrid is operating versus just providing emergency backup. At the same time, municipalities are starting to show a willingness to share microgrid ownership with private entities in recognition of the social value of secure power for critical facilities (Trabish, 2016), often entering into innovative public-private partnerships for project financing.

The United States Northeast Blackout of August, 2003 was a so-called cascading power outage, where a seemingly innocuous problem in a small part of the system leads to a

domino effect that can take down an entire electrical grid. Cascading outages have been diagnosed as an intrinsic grid phenomenon because it is a complex electro-mechanical machine increasingly run near the edge of its capacity (Newman, 2015). Part of the situation stems from increased generation caused by utility deregulation combined with a recent lack of investment in transmission capacity (U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004). There is also no appreciable storage in the macrogrid today to buffer sudden mismatches between electricity supply and load, although states like California are now investing heavily in these technologies. Unplanned generation outages and increasingly large peak summer cooling loads can take the system even closer to the edge where there is no tolerance for error. Outages can occur at individual generating plants or be due to broader scale issues, like the massive natural gas leak at California's Aliso Canyon storage facility at the end of 2015 that threatened fuel shortages for generating plants in the region. Sometimes decreases in generation are correlated with increases in demand, such as the impact of drought in California which lowers the level of reservoirs serving hydroelectricity generating plants while also raising peak demand.

Cascading outages often are triggered by issues out in the transmission or distribution system; when one transmission line trips in a situation near critical capacity – in the case of the 2003 outage due to a tree getting too close to a 345-kV transmission line – the entire system is at risk as the load from the failed line is transferred to other parts of the system that are already overloaded. The 2003 situation was compounded because of a problem with the decision support software used by the regional independent system operator used to understand the state of the system (it had been temporarily disabled and not returned to running automatically). The impacts of the 2003 outage were severe, affecting an estimated 50 million people and 61,800 megawatts (MW) of electric load in the Northeast U.S. and the Canadian province of Ontario. Economic costs in the U.S. were estimated to be between \$4 billion and \$10 billion U.S. dollars and Canada experienced a 0.7% decrease in gross domestic product due to decreased work hours (U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004). The 2003 outage

subsequently led to a great deal of thinking about how to decrease the likelihood of a repeat situation. Some commentators have responded by calling for a centralized “Smart Supergrid” (Minkel, 2008) with larger capacities and greater interconnection combined with stricter reliability standards and improved sensors. However, others have invoked the microgrid concept as a way to compartmentalize and therefore more easily contain and manage local problems (Walton, 2014). Microgrids have even been mentioned as a possible pathway to a “self-healing” smart grid of the future (DeBlasio, 2013b).

While classic cases of cascading grid outages have been triggered by accidental causes, the vulnerability of the macrogrid to localized disturbances has led to a heightened concern about intentional actions to take down the system, whether by physical means (Smith, 2014, 2016) or cyber-attack (W. Wang & Lu, 2013). Of particular concern are very large transformers, of the sort attacked at a major California substation in 2013, which serve a critical function and yet are in limited supply because of their custom construction and sheer size. Because of an increasing dependence on information and communications technology to manage the grid, modern electrical infrastructure across the globe is also vulnerable to the types of attacks seen recently in the Ukraine in 2015 that crippled a grid serving hundreds of thousands of customers (Perez, 2016) and in Israel in 2016 that was successfully thwarted (Times of Israel, 2016). Targeted or large-scale threats from either natural (Baker, Balstad, Bodeau, Cameron, & Fennell, 2008; Maize, 2011) or man-made (Foster Jr et al., 2004; Maize, 2013; Miller, 2005; Wilson, 2008) electromagnetic pulse (EMP) events have also been recognized as having potentially catastrophic results. The solar storm event of March 1989 that incurred severe damage on the Canadian grid is often cited as being a small-scale preview of the damage that extreme solar activity akin to the 1859 Carrington Event could inflict on today’s extensive and critical yet unprotected electrical systems.

The States of Connecticut, Maryland, Massachusetts, New Jersey, and New York in the Northeastern U.S., an area of aging infrastructure and frequent severe weather events, have been exploring the feasibility of adopting microgrid architectures for their electrical systems beyond just serving critical facilities, the. Several states have publishing their findings in comprehensive reports (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010; KEMA DNV, 2014) and have even begun funding pilot projects (Tweed, 2015; Wood, 2014). Planning at the state level has extended to encompass so-called “community” microgrids which would serve entire neighborhoods up to the substation level, perhaps up to the level of tens of megawatts of load. The most notable example of state support for community microgrids is New York State’s “New York Prize”, a \$40M competition administered by the New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) to help communities from feasibility evaluation through implementation.²³² Evaluation of the technical and economic case for microgrids has even the national level for the United Kingdom (Abusharkh et al., 2006). That study, which also provides a good review of the regulatory environment in the U.K., found that residential micro-CHP/PV hybrid microgrids with some storage would provide a good balance between supply and demand of electricity at a price competitive with centralized utility generation. The conversation about microgrids at city, state, and national levels is also spurring a rethinking of policies and regulatory frameworks around the ownership structure of the electricity distribution system, the way investor-owned utilities are paid for providing electricity to customers, and the utility franchise model itself; these considerations are covered in more detail below.

3.2 Infrastructure cost savings

In addition to avoiding the costly disruptions caused by grid failure, microgrids promise to deliver several types of well understood economic savings. It is widely recognized that investment in the U.S. electricity grid has not kept pace with generation. As a result,

<https://www.nyserda.ny.gov/All-Programs/Programs/NY-Prize>²³²

capacity is constrained in many areas and components are quite old with 70% of transmission lines and transformers now over 25 years old; the average power plant age is over 30 years (Campbell, 2012; President's Council of Economic Advisers & U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2013). The need to replace infrastructure and add capacity in constrained areas presents an opportunity to compare the costs and benefits of shifting to a more decentralized architecture versus a more business-as-usual approach. It is not uncommon to see reports about microgrid projects designed to offset large investments in additional substation capacity, such as Consolidated Edison's efforts to use microgrids to defer construction of a \$1B substation in the Brooklyn and Queens area of New York (Tweed, 2014).

Adding distributed generation in the form of microgrids may also be preferable to extending transmission lines to remote areas. It is straightforward to evaluate – for a given microgrid design – what length line extension makes economic sense before building a microgrid. Since it can cost in the range of \$40,000 to \$100,000 per mile (depending on design, terrain, and labor costs) to build new primary distribution systems, microgrids may be cost competitive in some cases (Barker et al., 2001).

3.3 Fuel savings

Microgrids offer several types of efficiency improvements. The first area for consideration is reduced transmission and distribution losses, which are estimated to fall somewhere between 5-10% of gross electricity generation (Barker et al., 2001; Lovins & Rocky Mountain Institute, 2002). The second area of opportunity lies in the potential efficiency gains of distributed combined heat and power (CHP) applications. While the electrical generating efficiency of distributed combustion turbines, microturbines, internal combustion engines, and fuel cells generally fall below the peak efficiency of new central-station combined-cycle generating plants, the distributed systems may win out if they are operated at very high capacity factors and the reused waste heat supply is well matched to the thermal loads. If the theoretical efficiencies of combined heat and power systems of 80-90% can be reached in practice, the fuel

savings can help make microgrids more economically competitive (Barker et al., 2001). If CHP is used to replace old generating technologies, the savings are even greater, since the average efficiency of the grid is only on the order of 30-40% (Barker et al., 2001; U.S. Department of Energy & U.S. Environmental Protection Agency, 2012). Using waste heat to generate cooling using absorption technology would be especially valuable since cooling contributes significantly to summer critical peak electrical demand (Chris Marnay et al., 2015). While cogeneration of electricity and thermal energy can be deployed without microgrid capabilities, it is often pointed to as a sensible choice to provide dispatchable generation for microgrids, especially where natural gas is plentiful.

Another area for savings lies in direct current (DC) microgrids. Since most distributed energy resources (including fuel cells, solar PV, and batteries) provide or accept DC electricity and many end loads, including power electronics, lighting, and variable speed drives for heating, ventilation, and air conditioning, can be powered by direct current, all-DC microgrids have been proposed to avoid losses from converting between DC and AC (and often again back to DC) power (Barker et al., 2001; Dragicevic, Vasquez, Guerrero, & Skrlec, 2014; John, 2008; Justo, Mwasilu, Lee, & Jung, 2013; Liang Che & Shahidehpour, 2014; Patterson, 2012). These losses can waste from 5-15% of power generation depending on the number of back-and-forth conversions. Additionally, faults in DC systems can be isolated with blocking diodes and issues of synchronization and harmonic distortion are alleviated; the need for reactive power compensation is mitigated and problematic circulating reactive currents are reduced (Liang Che & Shahidehpour, 2014). Native DC renewable resources like solar PV have zero fuel costs, protecting against long term price volatility. Lastly, a grid-tied DC-based, non-synchronous architecture simplifies interconnection with the AC grid and permits straightforward plug-and-play capabilities in the microgrid, allowing addition of components without substantial re-engineering (Asmus & Lawrence, 2016a).

3.4 Clean Energy Integration

To avoid a global average temperature rise exceeding 2 degrees Celsius over pre-industrial levels, currently accepted as the threshold between “safe” and “dangerous” climate change, human society needs to reduce the proportion of electricity produced by burning fossil fuels to from 70% (in 2010) to under 20% by 2050 (Pachauri et al., 2014). While there are many candidates for filling in this gap, many of the promising options like solar PV and wind are variable and non-controllable, which can cause challenges for the existing grid if deployed in large quantities. One concern centers on the impact on voltage control for distribution feeders (Hoke, Hambrick, & Kroposki, 2012; Liu & Bebic, 2008); at high enough penetrations, renewable resources can cause voltage rise on distribution feeders that exceed ratings. The second concern is systemic and related to the ability of the grid to handle fast shifts in renewable output, commonly referred to as “ramping” (California Independent System Operator, 2016; Denholm, O’Connell, Brinkman, & Jorgenson, 2015). Ramping concerns come in two flavors depending on whether the renewables are increasing or decreasing their power output, for example related to sharp meteorological transitions. If the net load is dropping rapidly, large base load generating plants may be unable to ramp down sufficiently to make room for the renewable energy entering the grid. This situation would force the renewable generators to curtail their output, which is economically unfavorable and a waste of clean energy. This situation is referred to as “over-generation” (Denholm et al., 2015). On the other hand, if there is a sharp drop in renewable generation at a time when the electrical load is increasing rapidly, there may be insufficient ramping reserves to make up the difference. In locations like California, Texas, and Germany, situations have already arisen where electricity prices have become negative, reflecting an imbalance between supply and demand (Martin, 2016a, 2016b).

Microgrids address the feeder-level and system-level challenges of integrating renewable generation because they are designed to locally balance generation with flexible loads, so that the impact of distributed generation at the point of common coupling with the utility grid is very small. Rather than, for example, injecting 100 kW of solar-PV generated electricity directly onto the grid, it can be paired with the right amount of demand and storage in a microgrid so that only a small amount is imported

from or exported. The small residuals between generation and demand can be exchanged with the utility grid or managed with distributed storage technologies embedded in the microgrids, if necessary.

3.5 Government goals

Policy goals at the state and national level aimed at improving energy efficiency, increasing renewable energy deployment, and making the energy system more resilient have direct and indirect impacts on microgrids. Direct impacts come in the form of grants for microgrid projects themselves while indirect impacts include support for clean generation and storage technologies that could be deployed in a microgrid architecture, many of which are related to political commitments made to reduce greenhouse gas emissions that drive climate change.

In the case of the United States, The Department of Energy has goals for microgrid development specifically: to develop commercial scale microgrid systems (capacity <10 MW) capable of reducing outage time of required loads by >98% at a cost comparable to non-integrated baseline solutions (represented by an uninterrupted power supply plus diesel generator set), while reducing emissions by more than 20% and improving system energy efficiencies by greater than 20%, by 2020 (Ton & Smith, 2012). In 2012, the U.S. Department of Energy and U.S. Environmental Protection agency declared a goal of adding 40 GW of combined heat and power generation by the year 2020, equivalent to an increase of 50%. Interestingly, microgrids were not mentioned in the U.S. Government document stating its combined heat and power goals. By 2016, only 2 GW of new CHP capacity had been installed according to one source, lagging behind the government target (Walton, 2016). The United States has also pledged to reduce greenhouse gas emissions by between 26 and 28% compared with 2005 levels by 2025, as part of the Paris Climate Agreement, and to reduce economy-wide emissions by 80% by 2050, as stated in its “intended nationally determined contribution” or INDC submitted to the United Nations. Unfortunately, different parties to the U.N. Framework Commitment on Climate Change use different baselines and target dates, making it

somewhat challenging to compare the U.S. commitment with, for example, Europe's commitment of a 40% reduction below 1990 levels by 2030 (see <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC>).

Many U.S. states have also committed to either renewable portfolio standards (RPS), greenhouse gas reductions, or both. For example, 29 states and Washington D.C. have committed to renewable generation targets and major studies have been done to evaluate the impact of these programs on solar PV deployment, greenhouse gas emissions, and electricity costs (Wiser et al., 2016). The state of Hawaii deserves special mention for its commitment to move to 100% renewable energy by 2045. Massachusetts has committed to reducing greenhouse gas emissions by 25% from 1990 levels by 2020 and by 80% by 2050 (KEMA DNV, 2014). California is aiming to reduce emissions to 1990 levels by 2020 and also to drop emissions by 80% from 1990 levels by 2050, consistent with the Intergovernmental Panel on Climate Change's assessment of mitigation required to stabilize global CO₂ concentrations at 450 parts per million (Williams et al., 2012). In addition, greenhouse gas emissions trading markets have been established in California, the Northeast U.S. and in Europe. While renewable portfolio standards and greenhouse gas reduction goals do not imply support for microgrids per se, they do suggest movement of energy-related policies in a direction that is consistent with a future that microgrids are well suited to support through their ability to manage a high penetration of variable renewable resources. A recent compilation of international programs supporting microgrid research, development, and deployment also includes barriers to microgrid adoption and lessons learned from existing programs, to help future microgrid planners and developers (Romankiewicz, Marnay, Zhou, & Qu, 2014). A sampling of other commitments from around the globe relevant to microgrids include:

- Canada - Goal of 90% non-fossil electricity generation by 2020. In 2009, non-fossil generation stood at 77%, mostly from hydro, nuclear, biomass, wind).

- Europe - 20% RPS, 20% increase in energy efficiency, 20% drop in GHG emissions by 2020. Goal of 80-95% reduction in GHG emissions by 2050.
- Japan - 2010 plan calls for RPS of 20%
- China - goal of 15% of generation from non-fossil sources by 2020. Plans for 100 “New Energy City” pilots and 30 microgrid pilot projects.
- Israel (currently about 2.5% electricity produced by renewables): goals of 10% renewable generation by 2020 and 17% by 2030, and a 26% reduction of per capita GHG emissions by 2030, versus a 2005 baseline.

4. Legal and Regulatory Issues

This section includes a general overview of policy areas with legal and technical considerations considered to be relevant to microgrid deployment and which, in several cases, have represented a barrier to more widespread adoption. Several states in the United States have evaluated the costs and benefits of microgrids in the context of the current legal and regulatory framework pertaining to electricity generation, transmission, and distribution. For the most part, the motivation for these studies has centered on grid resiliency; however, they do cover other benefits from distributed energy resources in general and microgrids in particular. The resulting reports should be a starting point for any government body considering the merits and challenges of microgrids (Burr et al., 2013; Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010; KEMA DNV, 2014; Maryland Resiliency Through Microgrids Task Force, 2014). More recently, review articles have been published that give a good global overview of so-called “smart grid” policies that impact microgrids (Brown & Zhou, 2013).

4.1. Interconnection Policy

Following deregulation in the United States in the late 1990s, there were no nation-wide standard requirements for small independent power producers to interconnect to the grid. Manufacturers and project developers had to deal with a patchwork quilt of requirements that varied from utility to utility (DeBlasio, 2013a), adding substantial cost and time to the microgrid development process. The development of IEEE 1547, released in 2003, was an important step for integrating distributed energy resources to the macrogrid in a safe manner (Basso, 2014), with rules around critical voltage and current thresholds for taking DERs offline. IEEE 1547 covers distributed resources with an aggregate capacity of 10 MVA or less and has been adopted by 80 percent of U.S. state public utility commissions (DeBlasio, 2013a). Until recently, though, the main focus of interconnection policy around distributed energy resources, including IEEE 1547, was on ensuring that those resources would disconnect in the case of macrogrid failure (a so-called “unintentional islanding” situation) to protect the safety of line workers. Since there were no regulations regarding *intentional* islanding, it was difficult or impossible to connect microgrids to the macrogrid.

It wasn't until 2011, when IEEE approved 1547.4, that standardized protocols became available for safe intentional islanding and reconnection of microgrid systems. IEEE 1547.4 includes guidance for planning (including load requirements and planning, electric power system requirements and planning, distributed resource requirements and planning, and system studies), design, operation, and integration of distributed resource island systems with the larger utility grid. It covers functionality of microgrids including operation in grid-connected mode, the transition to intentionally islanded mode, operation in islanded mode, and reconnection to the grid, specifying correct voltage, frequency, and phase angle. IEEE 1547.4 is comprehensive, covering safety considerations, protection, monitoring, communications, control, and power quality. California's Rule 21 also addresses interconnection requirements, to help remove barriers put in place by legacy utility providers, by establishing standardized technology- and size-neutral requirements, a clear review process, testing and certification procedures, set fees, and a streamlined application process. Interconnection is of

paramount importance: if microgrids are not able to connect to the utility grid, they must operate permanently in an islanded mode, forfeiting the opportunity to derive revenue from grid services they could otherwise provide and crippling their business case. To see one example, details of interconnection policy in the State of New York can be found in section 4.2.2 of the State's 2010 microgrid assessment (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010). Interconnection of distributed generation there falls into three classes, based on power: > 20-MW facilities that must connect to the transmission system, with interconnection requirements defined by the New York Independent System Operator and U.S. Federal Energy Regulatory Commission; 2-MW to 20-MW, with interconnection process and requirements determined by each local utility; and < 2-MW for which the Public Service Commission has established Standardized Interconnection Requirements (SIR) that must be followed by the six local utilities.

4.2. Communications protocols & interoperability

To scale up rapidly, microgrid technologies must be “plug and play”, meaning that they do not require extensive customization or configuration to connect to the distribution system, that distributed energy resources can be connected anywhere in the microgrid and that changes can be made to the microgrid without requiring a complete redesign of the power and protection system (Eto & Others, 2009). A part of achieving this vision is the establishment of standards for power system communication and interoperability protocols which will allow easy, effective, and secure communication between microgrid components and between the microgrid and the utility grid (Basso, 2014). It was decided in 2013 to include interoperability in the Standard 1547 family, working off of the progress made more generally in interoperability for the smart grid through IEEE Standard 2030, focusing on reliability, security, quality of service, and communications mediums. There are also efforts underway to extend the IEC 61850 communication

protocol, originally developed for substation automation, to DERs in general and microgrids in particular (Ustun, Ozansoy, & Zayegh, 2011a). IEC 61850 aims to replace the conventional serial communication protocol in order to enable more advanced protection capabilities, reduce the need for manual configuration, use readily available communication infrastructure, standardize models and naming conventions and device models, and deploy a high speed bus that enables sharing of sensor signals between devices (Mackiewicz, 2006).

4.3. Feed-in tariff and net metering arrangements

icrogrids can sell electricity to the grid during peak periods or when excess capacity is available, as long as they have an agreement with the utility. The ability of independent microgrid operators to sell power back to the macrogrid is a major consideration for the microgrid's economic viability. Therefore, regulatory policy governing payment for distributed energy generation is of interest for microgrids and include feed-in tariffs, net metering, and tradable renewable energy certificates (Del Carpio-Huayllas, Ramos, & Vasquez-Arnez, 2012). Feed-in tariffs have been particularly popular in Europe as a way to incentivize investment in small scale wind and solar generation, spreading to over 50 countries by 2011. Typically, a dual-meter approach is used which allows measurement of, and payment for, all electricity generated by the distributed system, whether or not it is consumed on-site. Electricity exports to the grid are given a bonus payment and the producer is also able to benefit from the reduction in energy purchased from the grid that has been displaced by self-generation (Del Carpio-Huayllas et al., 2012). Net metering is a somewhat simpler approach in that it can be implemented with a simple bi-directional meter that measures the net flow of electricity between the utility and the site. Net export of electricity to the grid is generally paid for at the retail rate. Smart meters allow incorporation of time of use pricing into the net metering scheme so that payment for import or export of electricity reflects current market conditions. Since microgrids often contain a mix of renewable and non-renewable generating assets and exceed 5 MW, they may not be eligible for current feed-in tariff or net metering schemes, which tend to focus on small-scale, purely

carbon-free generating technologies. In New York, for example, microgrids are unlikely to receive net metering service from a utility in the situation that they serve multiple customers and/or employ hybrid systems that combine multiple technologies like solar and gas-fired reciprocating engines (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010).

Renewable energy certificates (RECs) are tradable energy commodities that represent proof that 1 MWh of electricity was generated from an eligible renewable energy source (Del Carpio-Huayllas et al., 2012) and allow the owner to claim that they have purchased renewable energy, as part of emissions trading markets. Other economic considerations such as payment for reactive power support and power purchase agreements are covered in more detail below in the section on economic benefits.

4.4 Demand Response

When dealing with capacity constraints in the electrical system, a reduction in load of 1 MW is as valuable as increased generation of 1 MW, and may be achieved at much lower cost. This equivalence is reflected in Order 745 of the United States Federal Energy Regulatory Commission (FERC), which ruled in 2012 that demand response should be compensated like other generators in wholesale energy markets, and has since withstood a legal challenge in the U.S. Supreme Court. This ruling is important because microgrids are typically designed to control flexible and shedable loads and therefore can benefit from participating in demand response markets. The topic of demand response is closely related to utility rate structures, which can be modified to incorporate a time-varying component that reflects the cost of generation and congestion on the grid (Federal Energy Regulatory Commission, 2015). The time varying component can be as simple as a fixed time-window (for example, summer afternoons) or completely dynamic, for example changing every 15 minutes. Microgrids can leverage these changes for their economic benefit. An overview of the situation in Europe shows varying levels of support across E.U. member states for both so-called

“explicit” demand response, which is an agreement with the utility to change demand by a certain amount, and “implicit” demand response, which is modification of loads in response to a dynamically changing electricity price (Smart Energy Demand Coalition, 2015).

4.5 Utility Regulation

New York and Massachusetts have explored how microgrids fit into their existing electricity regulatory schemes and shared their findings with the public (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010; KEMA DNV, 2014). There are two key issues that impact microgrids: first, are they to be considered as electrical distribution utilities and therefore subject to oversight by state regulatory agencies; and second, even if they are exempt from state regulation as utilities, do they fit into the existing legal framework governing the sale and purchase of electricity and rights to generate and distribute electricity? A clear legal identity for microgrids is needed to achieve the regulatory certainty required to make microgrid projects “bankable” – in other words, to convince investors, customers, and engineers to invest time and money in developing microgrid projects (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010). Regulatory certainty is also required to lower the time and expense involved in developing microgrid projects. The issues involved are not simple: generators of electricity are subject to a complex set of federal and state laws that relate to property permissions, environmental protection, consumer rights, technical efficiency, and administrative orders (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010) that may apply to microgrids in part or in whole. The risk introduced by legal and regulatory uncertainty is a major barrier for microgrids. Some clarity will begin to emerge and accumulate over time as real microgrid projects grapple with these issues in the courts.

The example of New York is included in some detail here, as it illustrates the range of issues that States in the United States are grappling with as they evaluate whether to

support adoption of microgrids to deliver energy security and other benefits. The situation in other states or countries can be compared and contrasted, issue by issue. In general, if clarity has not been achieved in legislation or the courts, microgrids will be evaluated on a case-by-case basis according to: the technologies deployed, whether the microgrid is located entirely on private property, whether the distribution system crosses a public way, serves multiple previously unaffiliated customers, serves residential customers, and the size of the distribution area (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010). A microgrid is likely to be considered an electric corporation if it intends to serve multiple, otherwise unrelated, retail customers, cross a public way with power lines, and/or obtain a franchise from a local authority. The reasons for this conclusion are discussed below in more detail. The relevant regulatory body in New York is the State Public Service Commission (PSC), which enforces the regulations covering electric corporations including the Public Service Law (PSL). If the PSC decides that services provided by microgrids are covered by the PSL, the PSC can regulate the rates charged for electricity and decide whether to approve facility construction, among other powers, all of which have major implications for microgrid developers and owners. In the event that the microgrid *is* deemed to be a distribution utility, it may assume an obligation to serve, meaning that it would be required to provide service upon the written or oral request of a potential retail customer.

All microgrids that intend to use public ways to distribute electricity to customers (for example sending thermal energy or electricity across a public street) require permission from the local municipal authority (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010). This permission can be in the form of a “franchise” or other “lesser consent” (such as a so-called “revocable consent”). A microgrid’s ability to obtain this permission depends in large degree on whether a pre-existing electric utility has been given an exclusive franchise, effectively blocking out competitors. In New York, if the existing franchise is non-exclusive, state law still mandates that a competitive process be used to determine the franchise grantee, allowing incumbents

and other service providers to compete against the microgrid developer for the franchise. In New York, to exercise the rights granted with the franchise, approval from the PSC is required in the form of a Certificate of Public Convenience and Necessity (CPCN), confirming that a major energy production or delivery facility is necessary or convenient for the public service. The CPCN may also be required if the microgrid project seeks to directly interconnect to retail customers. Due to the small scale and limited scope of services, the New York feasibility study considered unlikely in most cases that a microgrid would require a franchise and therefore, that most microgrids would **not** be under the jurisdictional authority of the PSC. In addition, microgrids selling to retail customers, especially to those who don't own their facilities, may have to comply with various consumer protection laws. However, regardless of its status as a distribution utility, microgrids that produce power through combustion (such as microturbines or diesel generators) are subject to federal and state laws governing emissions and will require a permit under certain conditions. The choice of business or ownership model will also impact the degree to which utility franchise or lesser consent come into play; these considerations are discussed in more detail below.

Today's regulations governing electric utilities in the United reflect a process referred to as "restructuring" (and colloquially as "deregulation", regardless of the actual impact on utility regulation) that occurred in the mid- to late-1990s in many states in the U.S., following the example of deregulation in other major industries like airlines, railroads, telecommunications, and others ((Borenstein & Bushnell, 2015); here we again use New York to illustrate how restructuring has impacted the market. In New York, competition was introduced into a market previously dominated by vertically-integrated companies (Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University, 2010) and a separation was introduced between the generation, transmission, and distribution functions. Generators can sell electricity into a competitive wholesale market administered by the New York Independent System Operator (NYISO) or directly to local distribution utilities or retailers known as Energy Service Corporations (ESCOs) for resale to customers (generally the ESCOs serve as brokers

between generators and end-use customers). The NYISO is responsible for maintaining a balance between supply and demand at all times. The ecosystem of players in the restructured New York electricity market includes smaller generating companies called Independent Power Producers. Microgrids as such are not currently included in any of the currently defined classes of market participant, perhaps because they transcend the categories of generation, transmission, and distribution. New York has very strong consumer protection laws for electric and gas customers that may come into play for microgrids that cover applications for termination and restoration of service; metering and billing requirements; and late payment charges, among other topics.

At the Federal level, microgrids are likely to be strongly influenced by the 1978 Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA), enacted to promote energy conservation and renewable energy generation in the aftermath of the 1973 energy crisis. Cogeneration and other “qualifying facilities (QFs)” are entitled to receive special rate and regulatory treatment, including the requirement that electric utilities offer to purchase electricity from QFs. QFs cannot be majority owned by traditional electric utilities and are exempt from the Public Utility Holding Company Act. Since many microgrids will employ cogeneration and/or small renewable generators, complying with the eligibility requirements for being a qualifying facility becomes a key design consideration, in order to be exempt from many state and federal regulatory requirements, including those regarding rate setting.

4.6 Next generation efforts to update utility regulation and operation

Utility restructuring has not been a universal phenomenon and progress in the direction of deregulation slowed dramatically following the challenges of restructuring experienced in California in the early 2000s (Borenstein & Bushnell, 2015). Even for deregulated utilities, the structure of electricity markets and the manner in which investor-owned utilities are paid for providing service (using so-called “cost of service” accounting) still represent impediments to distributed energy resource adoption in

general, including microgrids. Several States in the USA have taken it upon themselves to commission or formulate their own plans for how to modernize their grids and electricity markets to provide more reliable, efficient, and clean, electricity to their customers. Countries like Great Britain are also formulating plans for evolution of the grid to a more clean, secure, and distributed energy future and examining the social, legal, and regulatory factors that help or hinder that transition (Barton et al., 2015). Examples of visioning and planning documents for several U.S. States are included below; readers are encouraged to access the reports for more details. General principles that run through the reports are discussed below in the section about microgrid barriers.

- Maryland “Utility 2.0” concept (Energy Future Coalition, 2013)
- Massachusetts “Utility of the Future” (Massachusetts Department of Public Utilities, 2014)
- New York Reforming the Energy Vision (“REV”) (New York Public Service Commission, 2014)
- Illinois - Energy and Infrastructure Modernization Act of 2011

5. MICROGRID DEPLOYMENT

While much has been written about the concept and promise of microgrids, much can also be learned from examples of real, operating microgrids. Below, we describe different microgrid applications and provide information on deployment of microgrids to serve their needs from across the globe. According to Navigant Research, which has tracked microgrid deployment since 2011, the United States has been the historical leader in deployed capacity; today, though, the U.S. and Asia have roughly the same capacity of operating, under development, and proposed microgrids, each with 42% of the market. Europe trails with 11%, Latin America with 4%, and the Middle East and Africa currently have just a 1% share. Total capacity was approximately 1.4 GW in 2015 and is expected to grow to roughly 5.7 GW (considered a conservative estimate) or 8.7 GW (under an “aggressive” scenario) by 2024 (Asmus & Lawrence, 2016b). The

conservative scenario is based largely on actual project development and assuming current public policy trends pertain over the 2015-2024 horizon; the aggressive scenario represents broad public policy support and regulatory reform and dramatic technology advances.

Navigant breaks the microgrid market into the following segments (with % of total deployed power capacity as of Q1 2016): Remote (54%), Commercial/Industrial (5%), Community (13%), Utility Distribution (13%), Institutional/Campus (9%), and Military (6%) (Asmus & Lawrence, 2016a). Direct Current (DC) microgrids are included, but currently represent zero capacity in their accounting. Community microgrids were further subdivided into those that focus on resilience versus those that emphasize integration of renewable generating sources (Asmus & Lawrence, 2016b). It should also be noted that Navigant Research does not track purely diesel-generator based remote microgrid systems; to be considered, they must include at least one renewable generating source.

5.1 Laboratory R&D

Creating laboratory test beds for microgrid research and development was a fundamental component of both the CERTS effort in the United States (Eto & Others, 2009; R.H. Lasseter et al., 2011; Robert H. Lasseter, 2007) and in the European MICROGRID project (Barnes, Engler, Hatziargyriou, & Vandenberg, 2005). Other recent review papers (Nikos Hatziargyriou, Asano, Iravani, & Marnay, 2007; Hossain, Kabalci, Bayindir, & Perez, 2014; Lidula & Rajapakse, 2011; Shamshiri, Gan, & Tan, 2012) thoroughly cover the capabilities of microgrid laboratories and test beds across the globe. One important capability for these laboratory facilities is the ability to emulate micro-generation sources, such as PV arrays, microturbines, and wind generators (Shamshiri et al., 2012). A larger scale facility, called the Energy System Integration Facility (ESIF) opened at the U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL) in 2012 (National Renewable Energy Laboratory, 2016). The ESIF user facility includes a

network simulator-in-the-loop, hardware and power hardware-in-the-loop, and real-time simulator capabilities, allowing testing of microgrid equipment at full power and actual load levels before they are deployed in the field.

Electrical utilities have also begun testing microgrid concepts in laboratory-type settings. One example is Duke Energy, which maintains two test microgrid facilities: one in Gaston County, North Carolina (Cohn, 2016), and one in Charlotte, North Carolina (John, 2016). The first installation focuses on partnership with manufacturers and interoperability; the second, originally built to test virtual power plant capabilities is a solar PV and storage microgrid serving a fire station. The partnership between the CERTS team and American Electric Power (AEP) to develop the CERTS test bed represents a productive partnering model between industry and the government (Eto & Others, 2009).

5.2 Military

A recent technical report (S. B. Van Broekhoven, Judson, Nguyen, & Ross, 2012) provides a good overview of the U.S. Department of Defense's perspective on microgrids and includes a comprehensive annotated list of built and planned military microgrids through 2011. It evaluates the economic case for four microgrid architectures (diesel generators alone that can or cannot operate in parallel with the utility, islandable diesel + PV, and diesel + PV + storage) at three locations with very different climates (San Diego, Massachusetts, Virginia). While the details may be specific to military installations, such as the availability of large tracts of land for PV installation at low or no cost near major electrical loads, the report presents some findings of relevance to microgrids in general, such as the importance to the microgrid's ROI of providing services to the macrogrid. These services include participating in utility emergency demand response or peak shaving programs to relieve grid congestion as part of regular operations and provision of frequency regulation and spinning reserves, though the latter has not been demonstrated in military microgrids as of 2011. The authors also

comment on the role of solar PV, often installed in military microgrids in response to government mandates, in extending achievable islanding duration versus a diesel-only scenario. At the same time, they note the infeasibility of running military bases solely on PV and storage today because the capacity required for the storage system would be extremely expensive. A recent report tracking deployment stated that North America is the only region with capacity in military microgrids, include both grid-tied and remote (tactical) systems (Asmus & Lawrence, 2016b). The report found 34.4 MW of capacity installed in 2015.

Cost-effective energy security is the driving role for military microgrids, where energy security is defined as: “the ability of an installation to access reliable supplies of electricity and fuel and the means to use them to protect and deliver sufficient energy to meet critical operations during an extended outage of the local electrical grid (S. B. Van Broekhoven et al., 2012).” The authors highlight the role of networking energy resources both in terms of redundancy and fuel diversity and also in terms of load sharing, allowing fewer generators to run at higher load factors, which corresponds to more efficient operation. A good example of a military microgrid research and demonstration showcase is the Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security (SPIDERS) Joint Capability Technology Demonstration (JCTD) (Naval Facilities Engineering Command, 2015), which aimed to “demonstrate a secure microgrid architecture with the ability to maintain operational surety through secure, reliable, and resilient electric power generation and distribution.” The SPIDERS JCTD was a three-phase program, with the scope and complexity growing with each phase. Phase 1 took place at Joint Base Pearl Harbor-Hickam, Hawaii in 2012 and 2013 featuring a single distribution feeder, two electrically isolated loads, two diesel generators, and a PV array. Phase 2 took place in 2013 and 2014 at Fort Carson, Colorado and included three distribution feeders, seven building loads, three diesel generators, a 1-MW PV array, and 5 bidirectional electric vehicle chargers. The final phase 3, at Camp Smith, Hawaii, finished in late 2015; it used new and existing generation sources to support the loads of the entire base. A more detailed description

of SPIDERS and comparisons to other military microgrids are available in the literature (S. B. Van Broekhoven et al., 2012; S. Van Broekhoven, Judson, Galvin, & Marqusee, 2013).

5.3 Commercial/Industrial

Until now, the commercial/industrial microgrid segment has been fairly small compared to campus/institutional microgrids, with 70.5 MW installed in North America and 47 MW installed in Asia and the Pacific. Data centers are mentioned as one application for microgrids with great promise for growth (Asmus & Lawrence, 2016b). Remote microgrids serving the mining industry have been an area of active development, with renewable resources helping offset high expenditures for diesel fuel.

5.4 Residential

The question of optimal aggregation scale is an open one in the microgrid literature. For example, is it better to integrate detached home residential customers into large community microgrids or to deploy microgrid technology at the level of individual homes? The advantages of a fully decentralized building-integrated microgrid approach (Sechilariu, Wang, & Locment, 2013) include control over energy resources by customers and the fact that individual homes are already connected to the electrical distribution network so that any changes performed behind the utility meter to add microgrid capabilities will likely not introduce significant legal or regulatory complications beyond what is already encountered for interconnection of rooftop solar installations. At the same time, this fully decentralized approach, especially if it includes islanding capability, forfeits cost-saving economies of scale and the generation and load diversity that comes with networking multiple generators and loads. For example, the cost of interconnection protection can add as much as 50% to the cost of a microsource (i.e. serving an individual home or small building) project so it may be better to site multiple microsources behind a single utility interface (Robert H. Lasseter, 2007). Some authors envision a nested system where energy management systems at the building level

communicate with each other and neighborhood-level master controllers to coordinate distributed energy resources, including shared community energy resources and loads like street lighting (Bahramirad, Khodaei, Svachula, & Agüero, 2015). The building-integrated microgrid deployment model also likely requires innovative financing (akin to solar leasing models) due to the expense of generating resources, controllers, power electronics, and integration with existing building systems. Literature exploring so-called “customer microgrids” examines the technical feasibility and economic viability of this mode of broad decentralized residential deployment (Khalilpour & Vassallo, 2015; Suryanarayanan, Rietz, & Mitra, 2010). Many of these studies are motivated by the question of whether it is feasible and/or desirable to cost-effectively gain full autonomy from the electrical grid using PV and battery storage (Bronski et al., 2014; Khalilpour & Vassallo, 2015). The analysis of residential microgrid topology and its impact on distribution congestion and robustness against overload failures while minimizing cost has become quite advanced, featuring complex network approaches. One study in particular simulated a realistic use case of more than 4500 residences in Cambridge, Massachusetts using realistic load and geographical data and simulating a large deployment of solar PV (but not considering electrical storage) as microgrids (Halu, Scala, Khiyami, & González, 2016). Interestingly, private companies driving the deployment of solar PV in the U.S. with innovative financing models are now discussing making storage and even microgrids a part of the energy services package they provide.

5.5 Campus/Institutional

Deploying onsite generation, especially in a combined cooling, heat, and power (CCHP, also known as “trigeneration”) application with multiple loads collocated on a campus owned by a single entity has been a successful model so far and typically includes the largest microgrids to date, with capacities ranging from 4 to over 40 MW (Asmus & Lawrence, 2016b). North America has been the leader in deploying this type of microgrid, with an installed capacity in 2015 of almost 220 MW, expected to grow to over 1 GW by 2024 (Asmus & Lawrence, 2016b). No other region of the world came

close to North America in terms of installed capacity in 2015, though growth is expected to be robust in Asia. Universities in the United States were among the earliest adopters of distributed energy resources for energy cost savings, and more recently for energy security and renewable energy integration, microgrids. Examples include Cornell University, New York University, Princeton University, and the Illinois Institute of Technology. One of the most advanced examples is the University of California at San Diego (Washom et al., 2013).

Santa Rita Jail, located in Alameda County, California, is a real institutional microgrid proof-of-concept employing the CERTS concept (Alegria et al., 2014). The microgrid includes a 1-MW fuel cell, 1.2 MW of solar PV, two 1.2-MW diesel generators, a 2-MW/4-MWh Lithium Iron Phosphate electrical storage system (chosen because this chemistry features high AC-AC round trip efficiency and offers improved thermal and chemical stability compared to other battery technologies, despite some sacrifice in energy density), a fast static disconnect switch, and a power factor correcting capacitor bank. Prior to the microgrid installation, diesel generators were available to avoid sustained power outages, but involved a delay of about 10 seconds for switchover, which was considered unacceptable given the facility's security requirements. The CERTS protocol allowed all of these distributed energy resources to work together during grid-connected and island modes without requiring a customized central controller. The ability of an institutional microgrid to deliver peak load reduction, and the tradeoffs between optimizing net load shape for the facility versus for grid needs, has been demonstrated using Santa Rita Jail as an example, using DER-CAM to define equipment scheduling and dispatch (DeForest, 2013).

5.6 Islands and Remote/Rural Microgrids

Hybrid microgrids that include renewable energy sources show great potential to diversify generation and lower microgrid operating costs in island communities that rely on expensive imported oil for generating electricity and in remote areas far from existing

electricity infrastructure (Bunker, Hawley, & Morris, 2015; Nayar, 1995; Schnitzer et al., 2014; Ustun, Ozansoy, & Zayegh, 2011b). Islands in developing countries, such as the Sundarbans region of India, compound the challenges of supplying electricity in developing countries with limited infrastructure with the challenges of electrifying remote isolated islands (Mitra, Degner, & Braun, 2008). Remote microgrids need not use a one-size fits all approach to system design; with careful resource evaluation and understanding of demand profiles, projects can be optimized to fit local conditions (Domenech, Ferrer-Martí, Lillo, Pastor, & Chiroque, 2014; Khatib, Mohamed, & Sopian, 2012). However, careful attention needs to be paid to the impact of resource variability on level of service as well as the level of maintenance required to keep the system running or to restore service in the case of generator failure. A review of literature studying the potential benefits and risks of solar PV hybrid microgrid (often called mini-grid) systems (Hazelton, Bruce, & MacGill, 2014) that combine diesel and PV yet avoid large battery investment costs concludes that these systems can improve electrical service while reducing energy costs for customers; however, they also contain several risks including oversizing due to load uncertainty, integration challenges, equipment incompatibility, problematic business models, and challenges stemming from geographic isolation. For rural areas in developing countries, electricity is a key resource for meeting basic human needs, and microgrids may be the best way to deliver that electricity (Illindala, Siddiqui, Venkataramanan, & Marnay, 2006). Information is also available on the technical state of the art for remote hybrid microgrids (Nema, Nema, & Rangnekar, 2009) and working examples now permit quantitative performance analysis (Louie, 2016).

5.7 Community and Utility Microgrids

Community and so-called “community resiliency” microgrids represent opportunities to support integration of clean energy generation for the purpose of lowering greenhouse gas emissions and to improve energy security for critical community infrastructure like emergency response, public safety, water purification, and waste water treatment. However, despite enjoying broad public support, community microgrids face tough

regulatory barriers (Asmus & Lawrence, 2016b). “Utility microgrids” are essentially the same as community microgrids, but it is clear that the utility owns system and provides service to customers in a manner similar to their existing business model. The microgrid paradigm allows the utility to provide customers additional services like tailored power quality and reliability. At the same time, since the utility is already set up to sell electricity, the utility microgrid sidesteps many of the complications that privately-owned community microgrids face that aim to sell electricity to many customers or build infrastructure that requires franchise rights and may invoke regulatory oversight (Bronin & McCary, 2013). Several utility companies (Asmus, 2015), like Arizona Public Service, Consolidated Edison, Commonwealth Edison, Duke Energy, Green Mountain Power, NRG Energy, San Diego Gas and Electric and Southern California Edison (Montoya, Sherick, Haralson, Neal, & Yinger, 2013) are exploring microgrids as a way to provide additional services to customers, defer capital investments, improve overall reliability, and to manage potential disruption to their business model.

6 DEPLOYED TECHNOLOGIES

Several review papers describe distributed energy resource technologies, including their advantages and disadvantages. Some of these reviews include detailed technical and cost information (Akorede, Hizam, & Pouresmaeil, 2010; Bayindir, Hossain, Kabalci, & Perez, 2014; El-Khattam & Salama, 2004); others focus purely on generation technologies and their applications in certain geographical areas like the United States (Thornton & Monroy, 2011).

6.1 Distributed Generation

6.1.1 Reciprocating Generators

Reciprocating internal combustion engines can be split into two groups: compression ignition (known commonly as “diesel”) and spark ignition (Abusharkh et al., 2006). These generators have been used for a long time to provide emergency backup power, and they can be used for CHP or CCHP. At the same time, despite the advantages of quick startup and load-following, they raise concerns regarding nitrogen oxide and

particulate emissions and noise levels, especially when deployed in densely populated areas. While diesel fueled systems still dominate in standby and short-term applications, the market is moving toward natural gas technologies because of superior availability (in the technical sense of reduced down-time and duration of service during emergencies if access to natural gas is unhampered), price, and environmental compliance. Lean-burn natural gas engines have lowered emissions of nitrogen oxides and brought efficiencies to about 35% (Robert H. Lasseter, 2007).

6.1.2 Microturbines

Microturbines can operate using several different fuels, including natural gas and gasoline with efficiencies of around 30-35%. Advanced systems lower emissions below those attainable by reciprocating engine generation. Their advantage lies in their mechanical simplicity, being single shaft devices with air bearings and no lubricants. They operate at variable speeds of 50,000 to 100,000 rpm and require power electronics to interface with the electrical system (Robert H. Lasseter, 2007).

6.1.3 Fuel Cell

Fuel cells have the great advantage of only emitting water vapor during their operation, though nitrogen oxides and carbon dioxide may be released as a result of reforming natural gas or other fuels to provide hydrogen for the fuel cell. They offer higher efficiencies than microturbines but are typically more expensive. Several designs are available that have potential application in microgrids (Kirubakaran, Jain, & Nema, 2009; Mekhilef, Saidur, & Safari, 2012; Neef, 2009), some of which are more or less suitable for combined cooling, heat, and power applications. Solid oxide and molten-carbonate fuel cells, which operate at high temperatures, have been demonstrated in microgrid applications. Phosphoric acid fuel cells, alkaline fuel cells, and low-temperature Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cells are other commercially available types of fuel cell for distributed generation.

6.1.4 Combined Heat, Power, and Cooling

Existing power plants, whether central or distributed have an average fuel-to-delivered electricity efficiency of roughly 30%, meaning a loss of 70% of the primary energy provided to the generator. At the top end of the efficiency range are combined-cycle technologies that raise efficiency to roughly 60%, meaning that 40% is still lost. Since distributed generation can be co-located with loads demanding thermal energy (heating, cooling, and refrigeration), the combined provision of heat and electrical power (CHP) or cooling, heat, and power (CCHP, also known as “trigeneration”) offers the opportunity to raise the useful fraction of primary energy above 80% and some cases even up to 90% (Robert H. Lasseter, 2007). This increased efficiency translates directly into fuel cost savings and has driven the deployment of CHP – and by association microgrids – in large campus settings in the United States. While CHP does not require implementation in a microgrid and microgrids do not inherently require CHP, the two strategies are mutually reinforcing. In places with efficient and relatively clean utility grid electricity generation like California, CCHP likely represents the biggest opportunity for microgrids to reduce carbon dioxide emissions, since distributed generation technologies have efficiencies and carbon emissions similar to the utility grid generation (Siddiqui & others, 2004).

6.1.5 Solar PV and Solar Thermal

Solar photovoltaic arrays most commonly employ crystalline silicon solar cells, though it is also possible to use thin film amorphous silicon, cadmium telluride, or copper indium diselenide based panels (Abusharkh et al., 2006). Solar PV prices have been steadily dropping over the past decade and are nearing cost parity with grid electricity in some areas. PV has the advantage of zero fuel cost and zero emissions and the disadvantages of intermittency, leading to low capacity factors and inability to dispatch without storage. Advanced capabilities for accurate short term forecasts of PV generation help manage the uncertainties that intermittent generation introduces. A lot

of emphasis has been placed on capturing waste heat from distributed generation; at the same time, direct capture of solar heat for heating and cooling is an alternative that has a long legacy for service water heating; adding thermal storage would make solar heating and cooling dispatchable.

6.2 Storage

The array of technologies for energy storage currently under development that could potentially play a role in microgrids is extensive (Díaz-González, Sumper, Gomis-Bellmunt, & Villafáfila-Robles, 2012; Suvire, Mercado, & Ontiveros, 2010). Much of the attention is on storage of electricity; however, storage of thermal and mechanical energy should be kept in mind where appropriate. A great deal of the literature focuses on the use of storage to balance intermittent wind resources; however, much of the analysis is applicable to microgrids whether or not they employ wind turbines. A general feature of microgrids is that the small micro-generation sources they employ lack the inertia of the large synchronous generators used to serve the utility grid that buffer small changes in voltage and frequency resulting from small imbalances of generation and demand. This fact, combined with the higher variability found in loads at the microgrid scale (as opposed to the smoothing that load diversity provides at larger scales of aggregation), means that even though some generation technologies and controllable loads may be able to provide flexibility, some storage is likely necessary to prevent microgrid faults (Abusharkh et al., 2006).

6.2.1 Electrical Storage

The price of different forms of electrical storage technologies is still relatively high, but dropping steadily. The appropriate choice of storage product will depend on total costs of ownership, power rating, and storage capacity. Below, we survey some of the potential options at a high level.

6.2.1.1 Electrochemical

Electrochemical energy storage technologies typically fall into two main classes in reference to microgrids, typically referred to as “batteries” and “flow batteries” or

“regenerative fuel cells” (Abusharkh et al., 2006). Commonly used battery configurations, which can be used to store up to tens of megawatts include Lead acid, Sodium-Sulfur, Lithium ion, and Nickel-Cadmium. Newer chemistries are being developed to improve cycling, reduce costs, lower toxicity, and improve energy storage and power characteristics. Flow batteries decouple power and energy storage (Suvire et al., 2010) and are able to support continuous operation at maximum load and complete discharge without risk of damage. Flow battery chemistries, generally in the range of hundreds of kW up to about 10 MW include Zinc-Bromine, polysulphide bromide, and Vanadium Redox. Comprehensive reviews of battery energy storage systems covering details of the major technologies available (such as capital costs, cycling capability, lifetime, energy density, round trip efficiencies, and power ratings among others), their principles of operation, as well as their advantages and disadvantages for power system applications are available. Hydrogen has also been mentioned as a possible energy storage mechanism, produced via electrolysis of water using excess renewable energy and consumed by fuel cells (Díaz-González et al., 2012).

6.2.1.2 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES systems store energy in a magnetic field which is created by a DC current in a large superconducting coil (Díaz-González et al., 2012). The system requires cryocoolers to maintain conditions conducive to superconduction but overall system efficiency can still reach 90%. While the large magnetic fields they involve may cause concern, their speed of response, lack of moving parts, and high efficiency are advantageous (Suvire et al., 2010).

6.2.1.3 Supercapacitors

Supercapacitors (also known as ultracapacitors), which store energy electrostatically rather than electrochemically, have very long lifetimes (typically 50,000 to 500,000 cycles with no maintenance), high efficiencies (75-80%) and quick charging and discharging rates (1-30 s), but lower energy density and higher cost than batteries (5x the cost of lead-acid batteries). They can be deployed in the 100 kW-10 MW range (Díaz-González et al., 2012).

6.2.2 Thermal

Thermal storage allows decoupling of charging and discharging heating and cooling resources so that the system can be charged when prices are low and discharged when prices are high, allowing significant cost savings and in the case of air conditioning, permitting large summer peak cooling load reductions.

6.2.3 Mechanical

Flywheels store energy in the form of the kinetic energy of a rotating mass. They come in low or high speed devices, requiring different flywheel compositions, depending on whether they spin at thousands or tens of thousands of revolutions per minute (Díaz-González et al., 2012). While efficiency is high, on the order of 90%, due to magnetic bearings and vacuum environment to reduce drag, high standing losses make long-term energy storage challenging. Compressed air storage and pumped hydro storage also qualify as mechanical storage but have seen limited deployment to date.

6.3 Power Electronics

Microgrids include technologies like solar PV (which puts out DC power) or microturbines (high frequency AC power) rather than fully controllable synchronous generators; as a result, power electronic interfaces like DC/AC or DC/AC/DC converters are required to interface with the electrical system. Inverter control capabilities facilitate islanded operation of the microgrid as well as participation in black start strategies (João Abel Peças Lopes et al., 2013). A key piece of microgrid power electronics is the interface with the main grid, which can be a synchronous AC connection, or an asynchronous connection using a direct current coupled electronic power converter (Abusharkh et al., 2006). The former approach has the advantage of simplicity, while the latter isolates the microgrid from the utility regarding power quality (frequency, voltage, harmonics) and is a natural match with DC-only microgrid strategies. The static disconnect switch (SDS) is a key microgrid component for islanding and synchronization, which can be programmed to trip very quickly on overvoltage,

undervoltage, overfrequency, underfrequency, or directional overcurrent (Alegría et al., 2014).

A microgrid must determine when to protect itself from faults on the main grid and also must deal with internal faults during islanded operation. A good review is available discussing the technical challenges for microgrid protection and promising strategies for mitigating these challenges (Buigues, Dyśko, Valverde, Zamora, & Fernández, 2013).

6.4 Controls

Several good overviews of microgrid control requirements and strategies are available (Guerrero, Loh, Lee, & Chandorkar, 2013; Katiraei, Iravani, Hatziargyriou, & Dimeas, 2008; João Abel Peças Lopes, Vasiljevská, Ferreira, Moreira, & Madureira, 2009; Madureira et al., 2011; Olivares et al., 2014). Controls and protection are especially active research topics since microgrids involve features that are somewhat new to the electrical system, especially for islanded operation and the transition between grid-connected and grid-independent modes. There is general agreement that microgrid controls must deliver the following functional requirements:

- Present the microgrid to the utility grid as single self-controlled entity
- Avoid power flow exceeding line ratings
- Regulate voltage and frequency within acceptable bounds during islanding
- Dispatch resources to maintain energy balance
- Island smoothly and safely reconnect/resynchronize

Two camps have emerged regarding whether “centralized” control or “decentralized” control is preferable for achieving primary (frequency) and secondary (voltage) control functions (Vaccaro, Popov, Villacci, & Terzija, 2011). In the centralized approach, a microgrid master controller (MGCC) sends control signals directly to the local equipment controllers (Su & Wang, 2012; Tsikalakis & Hatziargyriou, 2011). The MGCC chooses an optimal mix of source commitments and communicates the desired level of production to each source, including demand-side load shifting or shedding. “Optimal”

may have different definitions based on the goals of the microgrid – some microgrids may aim to minimize operational costs for consumers, balancing local sources and loads as well as possible to avoid importing or exporting power. Other microgrids may strive to maximize value for the DER aggregator through economically advantageous active importing and exporting of active and reactive power to the main grid (Tsikalakis & Hatziaargyriou, 2011), for example. One approach to optimizing microgrid scheduling and dispatch in a centralized microgrid is model-predictive control (MPC) in combination with mixed-integer linear programming (Parisio & Glielmo, 2011). Some MPC studies incorporate uncertainties in loads and generation rather than assuming deterministic results (Y. Wang, Wang, Chu, Pota, & Gadh, 2016). An EMS employing a neural network is another way to implement this sort of centralized optimization approach (Celli, Pilo, Pisano, & Soma, 2005). In the decentralized approach, each local controller makes its own decisions based on local information in order to maximize overall microgrid performance.

For decentralized primary and secondary control, most microgrids follow the CERTS approach, which avoids the use of a MGCC and complex master-slave communication for the dynamic operation of the microgrid. The CERTS architecture has been shown to allow autonomous load following, local islanding and re-synchronizing with the grid, voltage and frequency control, reduction of circulating reactive power and stable operation involving multiple DERs. CERTS pioneered the use of two power-electronics based droop controllers to achieve this functionality. One droop controller uses power versus frequency to balance the load properly between different DERs, analogous to a traditional synchronous generator. When one DER becomes overloaded, the frequency is driven down, signaling the other generators to pick up the load (Alegria et al., 2014). The other droop controller uses voltage versus reactive power to avoid voltage errors between different DERs that can cause problematic reactive power circulation in the microgrid. In practical grid-connected applications involving an energy storage system, a CERTS microgrid uses a “Energy Management System” to optimize the use of on-site generation, control the state of charge of energy storage systems, and control the flow of power across the point of common coupling (Alegria et al., 2014).

Regardless of how they manage primary and secondary control, microgrids typically also contain a tertiary level of control to manage interactions with the utility grid, yielding so-called “hierarchical” architectures (Dimeas & Hatziargyriou, 2007; Liang Che & Shahidehpour, 2014) as seen in the European “More Microgrids” project (João Abel Peças Lopes et al., 2009; Madureira et al., 2011; Palizban, Kauhaniemi, & Guerrero, 2014). Tertiary control enables the economic and optimization operations for the microgrid, mainly focused on managing battery storage, distributed generation scheduling and dispatch, and managing import and export of electricity between the microgrid and the utility grid. One implementation of decentralized hierarchical control is the multi-agent systems (MAS) approach (Dimeas & Hatziargyriou, 2007; Katiraei et al., 2008; Olivares et al., 2014; Roche, Blunier, Miraoui, Hilaire, & Koukam, 2010; Suryanarayanan, Mitra, & Biswas, 2010). It has been applied to manage several distributed energy system issues, including the optimal management of energy storage system charging and discharging (Carvalho, Perez, & Granados, 2012). Proponents of the MAS approach point out that a decentralized control approach may have advantages when distributed energy resources on a microgrid have different owners, when dedicated communication facilities or infrastructure required for centralized control are not available, and in a liberalized market for power and ancillary services (João Abel Peças Lopes et al., 2013). While much of the discussion in the literature about decentralized control systems is theoretical, it should be noted that the MAS approach has been deployed in two European microgrids, one in the Greek island of Kythnos and another in the German ‘Am Steinweg’ project (Nikos Hatziargyriou et al., 2007). Game Theoretic approaches also show promise for designing incentives and managing scheduling in a competitive market featuring a main grid augmented by distributed microgrids (Lo Prete & Hobbs, 2016; Maknouninejad, Lin, Harno, Qu, & Simaan, 2012).

6.5 Cyber Security

Cyber security, the defense against unwanted access to information and communications systems, is a key concern for microgrids and smart grids in general (W.

Wang & Lu, 2013). Those systems permit modern grids to work by collecting and transmitting sensor data and by coordinating the operation of thousands or hundreds of thousands of power electronics-based distributed energy resources. Identifying vulnerability to attacks and designing effective countermeasures are key considerations for the overall reliability of the electrical delivery system. Three areas of microgrid security have received particular attention: developing control architectures (for example, the peer-to-peer model adopted by CERTS) that minimize reliance on complex and potentially vulnerable communications systems; creating cryptographic countermeasures against cyber-attack; and formulation of secure communication protocols. A detailed survey of vulnerabilities, types of attack, and potential solutions is outside the scope of this review; the reader is encouraged to consult the recent 2013 review paper on the topic (W. Wang & Lu, 2013). Military microgrids place special emphasis on cybersecurity because of the critical functions they support and the possibility that the U.S. electrical grid and military electrical infrastructure will be targeted by enemy forces in the case of a confrontation (S. Van Broekhoven et al., 2013). Cybersecurity was a central focus of the Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security (SPIDERS) project mentioned above, a 4-year, three phase effort to demonstrate a cybersecure microgrid integrating fossil-fueled and renewable distributed generation and energy storage (Naval Facilities Engineering Command, 2015). When discussing military microgrid cybersecurity, the “Microgrid Cyber Security Reference Architecture” developed by the U.S. Department of Energy’s Sandia National Laboratory is often mentioned (Veitch, Henry, Richardson, & Hart, 2013). Another concept developed at Sandia, called the “Energy Surety Microgrid”, provided a foundation for the SPIDERS project.

6.6 EV/FCV

6.7 End use Efficiency and Demand Response

The lowest cost way to minimize the capital outlay on generation and storage required for a microgrid is to focus on minimizing the demand for electricity through energy efficient design [MORE DETAILS]. In a microgrid, it is possible to classify consumption of electricity into sensitive loads (requiring high power quality and reliability), adjustable

loads (those that can be ramped up and down to balance generation and demand for electricity), and shedable loads (non-essential uses of electricity that can be turned off to lower demand during emergency situations). Accurate short-term prediction of building loads is another improvement that helps improve microgrid dispatch decision making, accounting for uncertainty (Chitsaz, Shaker, Zareipour, Wood, & Amjady, 2015).

7 PROMINENT MICROGRID MARKET PLAYERS

Some of the most interesting market players in microgrids are associations of companies that are strong competitors in their respective subfields, for example the partnership between SunEdison (solar PV), Cummins (diesel generators), Northern Power Systems (wind), and Tangent (controls) (Asmus & Lawrence, 2016a). Because of the critical role of controls in microgrids, the players in the controller space are of great interest. At the same time, the largest revenue source is from the distributed generation hardware (at 60-75%) rather than the controllers or other factors. Given the integrated and still rather complex nature of microgrids, the companies providing system integration services also play a key role.

8 ENERGY COSTS, ECONOMIC AND SOCIAL BENEFITS

A review of microgrid economic benefits (Basu et al., 2011) groups them into those that arising from optimal siting and sizing of distributed energy resources, and those arising from optimal technology selection. The first category includes benefits such as improvement of bus voltages, line loss reduction, and upgrade deferral; the second category contains benefits such as waste heat recovery, reliability enhancement (reduction of customer interruption cost), ancillary services, emissions reductions, and fuel cost minimization. A report summarizing the economic findings of the European MORE MICROGRIDS project includes a detailed discussion of different benefit types (Schwaegrl et al., 2009).

Several studies have suggested frameworks or estimation methods to quantify the social and economic benefits of microgrids. While the general categories of benefits may apply across microgrids, the details of those benefits will depend on the details of each microgrid and the loads it serves. Studies that go so far as to quantify microgrid benefits necessarily focus either on evaluating the performance of existing projects or of hypothetical designs, in order to get a general sense of how microgrids compare to the economics of “business as usual”. For example, one study (Morris, Abbey, Joos, & Marnay, 2012) evaluated the economics of providing electricity to a large Canadian, semi-rural feeder with 10 MW peak load and 6.2 MW average load. The authors compared three scenarios: one with no distributed generation (Case 0), one with distributed generation (two large wind turbines of 3 MW peak capacity each) but no islanding capability (Case 1), and one with both distributed generation and islanding (Case 2). The authors were able to estimate the cost of electricity for each scenario and to quantify the following net benefits accruing to each stakeholder: reduced energy purchase, investment deferral, reduction in greenhouse gas emissions, and increased reliability. Going back to 1998, near the beginning of the modern microgrid age, researchers compared business as usual to a residential microgrid employing energy efficiency (an air conditioning tune up, plus more efficient lights and refrigerator), a 2-kW fuel cell with cogeneration, and a 1.3-kW photovoltaic system (Hoff, Wenger, Herig, & Shaw Jr, 1998b), and found that efficiency, PV, and the fuel cell (when operated in cogeneration mode) could all deliver electricity more cheaply than the retail rate; this result assumed that PV costs would decline substantially over time (they have), that 2-kW residential cogeneration units would become available (they haven’t), that electricity regulation and markets evolve to support microgrid adoption, and that load control and affordable storage technologies become available to balance mismatches between generation and demand of electricity (storage is still expensive). While the exact details of the economics may have changed since 1998, the study clearly illustrates one straightforward approach to evaluating a microgrid package at a single customer location. A more recent study looking at the feasibility of widespread CHP plus PV

microgrids with storage for the United Kingdom found that household microgrids combining 1.4 kWp, part ownership in micro-CHP generation, and 2.7 kWh of electrical storage could maintain energy balance (in fact, grid autonomy) and provide electricity cost competitive with the utility grid, if support mechanisms were maintained for PV (Abusharkh et al., 2006). That study noted that PV and CHP in cold climates can play complementary roles, since thermal loads (driving the use of the CHP system) are small in the summer, when PV-generated electricity is relatively abundant. The opposite holds in the winter, when sunlight is scarce and ambient temperature are low.

Probably the most straightforward potential value stream is reduced primary energy purchased by independent power producers and the microgrid customers they serve. Generally, this benefit is combined with the value of net import or export between a microgrid and the macrogrid, assuming grid-connected operation. This benefit is particularly relevant when combined heat and power is employed in energy generation (Morris et al., 2012). Not only can microgrid customers potentially reduce their fuel purchases; they should also be able to capture lower prices for microgrid-produced electricity since it avoids the costs associated with operating and maintaining the transmission system (Hoff et al., 1998b).

Investment deferral through decreased peak grid loading is another commonly invoked benefit of microgrid deployment, which accrues to the distribution network operator. The deferred investment can be estimated by comparing grid capacity and demand growth with and without microgrids (Morris et al., 2012).

In regions where greenhouse gas emissions are traded in markets such as California, the Northeastern United States, and Europe, reduction of emissions has potential economic value. Generation of electricity with carbon-free renewable resources and natural-gas based CCHP can lower greenhouse gas emissions as well as other pollutants like nitrogen oxides (Morris et al., 2012).

So-called “ancillary services” provided by microgrids have the potential to support the macrogrid and improve the economics of microgrids if they are properly valued.

Traditional ancillary services include congestion relief; frequency regulation and load following; black start; reactive power and voltage control; and supply of spinning, non-spinning, replacement reserves (Braun, 2007; Morris et al., 2012). When discussing microgrids, islanded operation should be included in the discussion of ancillary services (João Abel Peças Lopes et al., 2013). One focus area is the market for voltage control in distribution networks with microgrids (Madureira & Peças Lopes, 2012), with the authors proposing that each microgrid in a future multi-microgrid network act as a Virtual Power Plant – i.e. as a single aggregated distributed energy resource – with each microgrid’s central controller (assuming a centralized control architecture) bidding energy and ancillary services to the external power system, based on the aggregation of bids from the distributed energy resources in the microgrid (responsive loads, microgenerators, and storage devices). The authors conceive of the distribution system operator running a day-ahead market for reactive power, which is required for the flow of power from large generators to customers across a radial transmission and distribution network, and propose a mechanism for optimal market settlement. Analysis and literature review of storage technologies to provide ancillary services like voltage control support, spinning reserves, load following, and peak shaving among others, is available (Díaz-González et al., 2012). Important rulings 755 and 784 from the U.S. Federal Energy Regulatory commission mandate that fast responding reserves bidding into the secondary frequency regulation market be compensated based on their speed and accuracy, which favors the types of DERs used in microgrids.

At least in the United States, where concerns over the reliability of the grid have been a prime motivation behind support for microgrids, improved reliability has potential value for multiple electrical system stakeholders, ranging from microgrid customers, to macrogrid customers, to the network operators, and finally independent power producers. Standard metrics exist to measure the impact of microgrids on reliability; however, estimating the value of improved (or degraded) metrics is challenging since the monetary value of improved reliability is stakeholder-dependent (Morris et al., 2012).

9 MAIN MICROGRID CHALLENGES: CAUSES AND POSSIBLE SOLUTIONS

9.1 Challenge 1: Lack of specific policies or regulations to encourage microgrids

While policies exist that foster adoption of individual components of microgrids, such as solar PV, storage, or combined heat and power, there are no incentives that specifically support deployment of distributed energy resources in a microgrid configuration to support societal goals of increased reliability, cost savings, or environmental protection. This barrier could be addressed by providing a pool of money to support development of community microgrid projects, as is being done in New York and Connecticut. Regulatory reform improving compensation for microgrid services and legal clarity establishing a microgrid's right to generate and distribute energy would also address this barrier.

9.2 Challenge 2: Perceived low cost/benefit ratio

A lack of standardization, the current cost of some DER technologies, regulatory and legal barriers, and the cost and complexity of interconnection all stand in the way of broad microgrid adoption while the benefits of microgrids accrue mainly to the owners of critical loads rather than the general customer. Therefore, there is little pressure for a broad shift from the status quo to microgrids on the community scale. Costs could be substantially lowered by implementation of standardized interconnection requirements (like the IEEE 1547 family), interoperability protocols, and mass production of DER components. New financing models akin to solar PV leasing could also help unlock the microgrid market. To some degree, if benefits accrue mainly to society in general, it may be appropriate for the public to support microgrid development through public-private partnerships and shared ownership of microgrid infrastructure to help defray costs.

9.3 Challenge 3: Utility opposition

Although grid-tied microgrid customers will likely stay connected to the grid, only islanding in the case of utility grid failure, self-consumption of microgrid generated energy could erode the revenue base that has traditionally paid for utility infrastructure.

There is also still reluctance to add large amounts of distributed energy resources to the grid because of perceived management, safety, and protection challenges. As a result, many utilities are seeking to impose additional fees on DER owners and threatening to halt net metering programs. Market restructuring, like that proposed in New York's "Revisioning the Grid" effort, will be required to move from "Land of Penalties", where microgrids are seen as enemies to the "Land of Payments", in which distributed energy resource services are valued by the utility grid and fairly compensated (Romankiewicz et al., 2014). As part of this restructuring, utility regulators will fully unbundle generation, transmission, and distribution services and allow independent power producers to compete in wholesale (and potentially retail) markets. Real time or time of use (ToU) electricity prices will become the norm so that microgrids receive the economic signals they need to manage their DERs to provide grid services like frequency regulation, black start, and congestion relief, and to maximize their own revenues. The role of utilities in the future is unclear: will they be "smart energy integrators" balancing supply and demand and delivering energy in a manner somewhat similar to today or "energy services utilities" still potentially owning generation and dealing directly with customers but provide electricity, heat, cooling, and lighting, in a return to the model deployed by Thomas Edison?

Decoupling electric distribution company revenues from electricity sales, which is already done in 14 states in the USA, is another major step toward removing utility resistance to microgrids based on concerns about a so-called "utility death spiral" where eroding revenues drive underinvestment and higher prices for traditional grid customers, leading to increasing reliance on self-generated electricity, and so on in a self-reinforcing feedback loop. A potential path forward is to move from the traditional cost-of-service paradigm to a performance-based approach (Malkin & Centolella, 2014) that recognizes that the utility grid is being asked to provide much different functions of resilience, security, and clean generation than has been traditionally the case. In this new paradigm, utilities would be incentivized to invest in upgrading infrastructure and improving efficiency. An example of this new approach is provided by the U.K.

“Revenue set to deliver strong Incentives, Innovation, and Output (RIIO)” framework, which contains the following components:

1. Revenues set based on the regulator’s review of a forward-looking utility business plan;
2. A multi-year revenue cap that provides an incentive for cost reductions;
3. An earnings-sharing mechanism that enables customers to benefit from utility cost savings;
4. Clearly defined performance metrics and incentives for delivering value to customers; and
5. Funding set aside for innovative projects. Electric utilities currently spend 0.2% of revenues on R&D, a factor of 10 less than in competitive markets. Asset utilization < 50% versus > 75%

9.4 Challenge 4: Competition from other smart grid paradigms

The revolution in information and communication technology (ICT) has led to several major improvements in grid operation that improve the efficiency and reliability of the utility grid and that help integrate distributed generation, independent of microgrids. It is possible that society will find the balance of costs and benefits of other smart grid paradigms like “smart supergrids” or “virtual power plants” to be more compelling than for microgrids. These new smart grid developments include improved “fault detection, isolation, and restoration” capabilities to alleviate congestion, route power around faults, and shorten recovery time from outages. New ICT developments are also facilitating the emergence of a decentralized, so-called “transactive” energy market platform where individual distributed energy resources and loads can bid to buy and sell electricity from each other. This concept is being pioneered by the U.S. Department of Energy’s Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and has been tested in the field in a \$178 million project to link 60,000 customers in 11 utilities, in cooperation with industry partners. The concept of virtual power plants (VPPs) involves the software-based aggregation and balancing of DERs without the ability to intentionally island.

10 MICROGRID MARKET ECONOMICS

10.1 Market Structure

The EU “More Microgrids” project presents four different microgrid cases by ownership of the microgeneration sources including: ownership by the distribution system operator (DSO), perhaps in non-liberalized markets where the DSO owns the distribution system and is responsible for retail sales of electricity to the end customer; ownership by the end consumer or even consortium of *prosumers*; independent ownership by an independent power producer, or ownership by an energy supplier (Schwaegrl et al., 2009) in a free market arrangement. According to Navigant Research (Asmus & Lawrence, 2016a), the majority of grid-tied microgrids today are owned and financed by facility owners, especially in the campus/institutional category. In many cases, the microgrid capabilities are added to existing legacy assets to capture new economic benefits or achieve other goals like improved resilience. Hybrid microgrids that incorporate distributed renewables and/or storage are more complex and seem to be shifting to private developers who then sell services via a power purchase agreement, according to Navigant Research.

One recent market design study proposed three models for integrating energy prosumers into the grid – peer-to-peer, prosumer-to-grid, and prosumer community groups – and identified barriers to their adoption (P. Parag, 2015; Y. Parag & Sovacool, 2016). In the peer-to-peer model, the underlying platform would support the ability of electricity producers and consumers to directly buy and sell electricity and other services from each other, with a fee going to the manager of the distribution grid for providing distribution services (Linnenberg, Wior, Schreiber, & Fay, 2011). Pilot projects of this type are starting to appear in places like Brooklyn, New York, the Netherlands, and the United Kingdom. Researchers and practitioners are even starting to take secure peer-to-peer platforms like blockchain-based distributed ledgers that have been developed for other purposes and applying them to peer-to-peer energy markets (Lacey, 2016; Mihaylov, Razo-Zapata, Rădulescu, & Nowé, 2016). The prosumer-to-grid model involves a bit more structure than the peer-to-peer model, including the

possibility of prosumption brokerages and marketplaces with predefined participation rules. This prosumer-to-grid model fits in well with the ideas of hierarchical control presented above in the section about controls, with scheduling and dispatch handled by the so-called “tertiary” level of control. Lying between the peer-to-peer and prosumer-to-grid models lies the idea of the organized prosumer group, in which multiple prosumers aggregate their distributed energy resources, perhaps using the ICT-enabled Virtual Power Plant (VPP) concept, to generate a revenue stream for the community’s benefit.

Once microgrid design and procurement becomes more streamlined, power purchase agreements (PPAs) are poised to play a larger role in the microgrid market (Asmus & Lawrence, 2016a). Currently a very successful business model in the U.S. residential and commercial solar PV markets because it is designed to capture tax and other related incentives, the infrastructure in a PPA is owned by a third party and leased to customers to provide electricity and related services to end customers. In the case of microgrids, improved security, reliability, and sustainability can be marketed along with economic benefits like energy savings and export of power to the grid. In the case of combined cooling, heat, and power projects, thermal energy can be bundled in the PPA along with electricity. It is reasonable to expect that operations and maintenance will be included in the PPA’s, since PPA revenues depend on systems performing to their potential.

The most comprehensive, yet rare, business model is called Design, Build, Operate, Own, and Maintain (DBOOM), under which the microgrid company handles the design and planning, construction, and ongoing operations, simplifying the process for the end customer since they only need to work with one entity and potentially streamlining the procurement process and resulting in a more integrated final product (Asmus & Lawrence, 2016a).

10.2 Utility Involvement

In remote areas of Alaska, Australia, and South Africa, utilities are able to rate-base the cost of microgrids (Asmus & Lawrence, 2016a). Utilities are also making the case that community resilience microgrids should be rate-based because they are providing a valuable public benefit. Central Hudson Gas & Electric in New York recently proposed a fee-based microgrid service for commercial customers. Utility projects could also take place at the substation level, with the microgrid providing critical grid services.

10.3 Design optimization

Software, such as the DOE distributed energy resource customer adoption model (DER-CAM) is available to help design microgrids to optimize the choice of DERs to meet thermal and electrical loads while minimizing costs (Bailey, Creighton, Firestone, Marnay, & Stadler, 2003; C. Marnay et al., 2007; M. Stadler, Groissböck, Cardoso, & Marnay, 2014).

11 DISCUSSION AND SYNTHESIS

The transition from the current paradigm of centralized electricity generation flowing unidirectionally through the transmission and distribution system to the future “energy internet” of distributed generation and complex electricity flows faces a number of questions that will determine what the electrical system of the future will look like in 10, 20, or 100 years from now. Some of these topics are discussed below.

The first set of questions focus on policy. Will the future electrical system continue to be dominated by large companies with exclusive rights to sell electricity to customers or will the system more closely resemble an Airbnb- or Uber-like peer-to-peer model with the distribution companies just providing the wires to connect net producers and net consumers? Will microgrids be integrated mainly into individual buildings, taking advantage of the relative ease of installing distributed energy resources behind the meter, or will they be deployed at larger scales such as the substation level to take advantage of load and generation diversity and economies of scale provided by having fewer interconnection points to the utility grid? Will microgrids mainly exist on the

periphery of the electrical grid and in remote areas or will they be ubiquitous, encompassing urban areas? Who will own the distributed energy resources? Private companies, the utilities, or customers? Will microgrids be deployed on a purely for-profit basis or will they be subsidized by governments in recognition of their local and global social benefits?

The second set of questions are more technical and economic in nature. Are the energy security, local balancing, and other benefits of deploying distributed energy resources as microgrids big enough that they win out over either: 1) enhancing the current grid paradigm with smart energy technologies or 2) deploying distributed energy resources as virtual power plants without the ability to intentionally island? Microgrid controllers and the infrastructure needed to intentionally island and reconnect to the utility grid add to the system's costs. Are microgrid benefits big enough to make these costs acceptable? Will large efficiency improvements, enabled by DC-only microgrids and combined cooling, heat, and power, drive uptake in the market? What technologies will see a major role in a future distributed energy system – mainly dispatchable fossil-fueled generators or some combination of dispatchable fossil-fueled generation and intermittent renewable generation, with energy storage systems to balance out mismatches between supply and demand?

11.1 Long term outlook for microgrids

The long term outlook for microgrids currently looks strong. The cost of distributed energy resources like solar PV and energy storage systems are decreasing. Interconnection and communications protocols and control strategies are being standardized and more widely adopted. Functioning microgrids have been demonstrated in the field and proven to work. Threats to the utility grid, whether from natural or human origins, do not seem to be decreasing. Over a billion people on the planet lack access to reliable power and live far from existing infrastructure. If the world takes climate change seriously, decides to shift to distributed clean generation to solve

the problem, and is able to adapt electricity regulations and markets to foster microgrids, they are a prime candidate for managing the transition. If costs of distributed energy resources drop fast enough, incentives are sufficiently high, or innovative financing models can drop the levelized cost of power from microgrids below retail utility grid prices, the shift could be rapid. However, these are all substantial challenges. If these conditions don't materialize, microgrids may remain more of a niche application, limited mainly to customers with very stringent power quality and reliability requirements, facilities serving critical functions, campuses or institutions that save a substantial amount of money through combining heat and power generation, or communities that face the risk of frequent natural or man-made grid outages.

Bibliography

- Abusharkh, S., Arnold, R., Kohler, J., Li, R., Markvart, T., Ross, J., ... Yao, R. (2006). Can microgrids make a major contribution to UK energy supply? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(2), 78–127. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.013>
- Akorede, M. F., Hizam, H., & Pouresmaeil, E. (2010). Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 724–734. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.025>
- Alegria, E., Brown, T., Minear, E., & Lasseter, R. H. (2014). CERTS Microgrid Demonstration With Large-Scale Energy Storage and Renewable Generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 937–943. <http://doi.org/10.1109/TSG.2013.2286575>
- Asmus, P. (2010). Microgrids, Virtual Power Plants and Our Distributed Energy Future. *The Electricity Journal*, 23(10), 72–82. <http://doi.org/10.1016/j.tej.2010.11.001>
- Asmus, P. (2015). Microgrids: Friend or Foe? *Public Utilities Fortnightly*, 18–23.
- Asmus, P., & Lawrence, M. (2016a, Q1). Emerging Microgrid Business Models.
- Asmus, P., & Lawrence, M. (2016b, Q1). Market Data: Microgrids.
- Bahramirad, S., Khodaei, A., Svachula, J., & Aguero, J. R. (2015). Building Resilient Integrated Grids: One neighborhood at a time. *IEEE Electrification Magazine*, 3(1), 48–55. <http://doi.org/10.1109/MELE.2014.2380051>
- Bailey, O., Creighton, C., Firestone, R., Marnay, C., & Stadler, M. (2003). Distributed Energy Resources in Practice: A Case Study Analysis and Validation of LBNL's Customer Adoption Model. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/1dp0j5z6.pdf>

- Baker, D., Balstad, R., Bodeau, J. M., Cameron, E., & Fennell, J. (2008). *Severe Space Weather Events--Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*. Washington, D.C.: National Academies Press. Retrieved from <http://www.nap.edu/catalog/12507>
- Barker, P., Johnson, B., & Maitra, A. (2001). *Investigation of the technical and economic feasibility of micro-grid based power systems* (p. 107). Palo Alto, CA.: EPRI. Retrieved from http://assets.fiercemarkets.net/public/smartgridnews/EPRI_Technical_Report_Micro-Grid.pdf
- Barnes, M., Engler, A., Hatziaargyriou, N., & Vandenberg, M. (2005). MicroGrid Laboratory Facilities. In *Proc. International Conference on Future Power Systems*. The Netherlands.
- Barton, J., Emmanuel-Yusuf, D., Hall, S., Johnson, V., Longhurst, N., O'Grady, A., ... Sherry-Brennan, F. (2015). Distributing Power. A transition to a civic energy future. Retrieved from http://opus.bath.ac.uk/48114/1/FINAL_distributing_power_report_WEB.pdf
- Basak, P., Chowdhury, S., Halder nee Dey, S., & Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5545–5556. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.043>
- Basso, T. S. (2014). *IEEE 1547 and 2030 Standards for Distributed Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid*. National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63157.pdf>
- Basu, A. K., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., & Paul, S. (2011). Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs—A comprehensive survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4348–4356. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.116>
- Bayindir, R., Hossain, E., Kabalci, E., & Perez, R. (2014). A comprehensive study on microgrid technology. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(4), 1094–1107.
- Borenstein, S., & Bushnell, J. (2015). *The us electricity industry after 20 years of restructuring*. National Bureau of Economic Research. Retrieved from <http://www.nber.org/papers/w21113>
- Braun, M. (2007). Technological control capabilities of DER to provide future ancillary services. *International Journal of Distributed Energy Resources*, 3(3), 191–206.
- Bronin, S. C., & McCary, P. (2013). Peaceful Coexistence: Independent Microgrids are Coming. *Public Utilities Fortnightly*. Retrieved from <http://works.bepress.com/bronin/16/>
- Bronski, P., Creyts, J., Guccione, L., Madrazo, M., Mandel, J., Rader, B., ... Tocco, H. (2014, February). The Economics of Grid Defection: When and Where

- Distributed Solar Generation Plus Storage Competes With Traditional Utility Service. Rocky Mountain Institute. Retrieved from www.rmi.org
- Brown, M. A., & Zhou, S. (2013). Smart-grid policies: an international review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(2), 121–139.
- Buigues, G., Dyško, A., Valverde, V., Zamora, I., & Fernández, E. (2013). Microgrid Protection: Technical challenges and existing techniques. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*. Retrieved from <http://www.icrepq.com/icrepq'13/262-buigues.pdf>
- Bunker, K., Hawley, K., & Morris, J. (2015). *Renewable Microgrids: Profiles from Islands and Remote Communities Across the Globe*. Rocky Mountain Institute. Retrieved from http://www.rmi.org/islands_renewable_microgrids
- Burr, M. T., Zimmer, M. J., Meloy, B., Bertrand, J., Levesque, W., Warner, G., & McDonald, J. D. (2013). Minnesota Microgrids. Retrieved from <http://mn.gov/commerce-stat/pdfs/microgrid.pdf>
- California Independent System Operator. (2016). What the duck curve tells us about managing a green grid.
- Campbell, R. J. (2012). Weather-related power outages and electric system resiliency. Congressional Research Service, Library of Congress. Retrieved from http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc122249/m1/1/high_res_d/R42696_2012Aug28.pdf
- Carvalho, M., Perez, C., & Granados, A. (2012). An adaptive multi-agent-based approach to smart grids control and optimization. *Energy Systems*, 3(1), 61–76. <http://doi.org/10.1007/s12667-012-0054-0>
- Celli, G., Pilo, F., Pisano, G., & Soma, G. G. (2005). Optimal participation of a microgrid to the energy market with an intelligent EMS (pp. 663–668 Vol. 2). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206991>
- Center for Energy, Marine Transportation and Public Policy at Columbia University. (2010). *Microgrids: An Assessment of the Value, Opportunities and Barriers to Deployment in New York State* (No. 10-35) (p. 219). New York State Energy Research and Development Authority.
- Chitsaz, H., Shaker, H., Zareipour, H., Wood, D., & Amjady, N. (2015). Short-term electricity load forecasting of buildings in microgrids. *Energy and Buildings*, 99, 50–60. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.011>
- Cohn, L. (2016, January 25). Playing Nice: What the Duke Energy Microgrid Test Bed Teaches. Retrieved from <http://microgridknowledge.com/duke-energy-microgrid-test-bed/>
- DeBlasio, D. (2013a, July). Cycle of Innovation. Retrieved September 20, 2016, from <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2013/07/cycle-innovation>

- DeBlasio, D. (2013b, August). Toward a Self-healing Smart Grid. Retrieved September 20, 2016, from <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2013/08/toward-self-healing-smart-grid>
- DeForest, N. (2013). Microgrid dispatch for macrogrid peak-demand mitigation. In *2012 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, CA, August 12, 2012-August 17, 2012*. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/0k83v6p8.pdf>
- Del Carpio Huayllas, T. E., Ramos, D. S., & Vasquez-Arnez, R. L. (2010). Microgrid systems: Current status and challenges (pp. 7–12). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC-LA.2010.5762853>
- Del Carpio-Huayllas, T. E., Ramos, D. S., & Vasquez-Arnez, R. L. (2012). Feed-in and net metering tariffs: An assessment for their application on microgrid systems (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319070>
- Denholm, P., O'Connell, M., Brinkman, G., & Jorgenson, J. (2015). Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart. *National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-65023*, Nov. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65023.pdf>
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., & Villafáfila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154–2171. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>
- Dimeas, A. L., & Hatziaargyriou, N. D. (2007). Agent based control of virtual power plants. In *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4441671
- Domenech, B., Ferrer-Martí, L., Lillo, P., Pastor, R., & Chiroque, J. (2014). A community electrification project: Combination of microgrids and household systems fed by wind, PV or micro-hydro energies according to micro-scale resource evaluation and social constraints. *Energy for Sustainable Development*, 23, 275–285. <http://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.007>
- Dragicevic, T., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., & Skrllec, D. (2014). Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks. *IEEE Electrification Magazine*, 2(1), 54–65. <http://doi.org/10.1109/MELE.2013.2297033>
- El-Khattam, W., & Salama, M. M. . (2004). Distributed generation technologies, definitions and benefits. *Electric Power Systems Research*, 71(2), 119–128. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.01.006>
- Energy Future Coalition. (2013). Maryland Utility 2-0 Pilot Project.
- Eto, J., & Others. (2009). *CERTS Microgrid Laboratory Testbed*.

- Farmer, B. K., Wenger, H., Hoff, T. E., & Whitaker, C. M. (1995). Performance and value analysis of the Kerman 500 kW photovoltaic power plant. In *Proceedings of the American Power Conference, Chicago, IL*. Retrieved from http://www.cleanpower.com/wp-content/uploads/2012/02/045_PerformanceValueKermanPV.pdf
- Federal Energy Regulatory Commission. (2015). Assessment of Demand Response & Advanced Metering - Staff Report.
- Feldman, D., Barbose, G., & Margolis, R. (2015, August). *Photovoltaic System Pricing Trends - Historical, Recent, and Near-Term Projections*.
- Foster Jr, J. S., Gjelde, E., Graham, W. R., Hermann, R. J., Kluepfel, H. M., Lawson, R. L., ... Woodard, J. B. (2004). *Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Volume 1: Executive Report*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA484497>
- Guerrero, J. M., Loh, P. C., Lee, T.-L., & Chandorkar, M. (2013). Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids; Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1263–1270. <http://doi.org/10.1109/TIE.2012.2196889>
- Gumerman, E. Z., Bharvirkar, R. R., LaCommare, K. H., & Marnay, C. (2003). Evaluation framework and tools for distributed energy resources. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 73.
- Halu, A., Scala, A., Khiyami, A., & González, M. C. (2016). Data-driven modeling of solar-powered urban microgrids. *Science Advances*, 2(1), e1500700. <http://doi.org/10.1126/sciadv.1500700>
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94.
- Hatziargyriou, N., Jenkins, N., Strbac, G., Lopes, J. A. P., Ruela, J., Engler, A., ... Amorim, A. (2006). *Microgrids - Large Scale Integration of Microgeneration to Low Voltage Grids* (p. 11). CIGRE.
- Hazelton, J., Bruce, A., & MacGill, I. (2014). A review of the potential benefits and risks of photovoltaic hybrid mini-grid systems. *Renewable Energy*, 67, 222–229. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.026>
- Hoff, T. E., Wenger, H. J., & Farmer, B. K. (1996). Distributed generation: an alternative to electric utility investments in system capacity. *Energy Policy*, 24(2), 137–147.
- Hoff, T. E., Wenger, H. J., Herig, C., & Shaw Jr, R. W. (1998a). A micro-grid with PV, fuel cells, and energy efficiency. In *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society* (pp. 225–230). Retrieved from <https://www.cleanpower.com/wp-content/uploads/MicroGridsPVFuelCellsEE.pdf>

- Hoff, T. E., Wenger, H. J., Herig, C., & Shaw Jr, R. W. (1998b). A micro-grid with PV, fuel cells, and energy efficiency. In *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society* (pp. 225–230). Retrieved from <https://www.cleanpower.com/wp-content/uploads/MicroGridsPVFuelCellsEE.pdf>
- Hoke, A., Hambrick, R. B. J., & Kroposki, B. (2012). Maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders. *National Renewable Energy Laboratory*. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55094.pdf>
- Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R. (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86, 132–153. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.012>
- Iannucci, J. J., Cibulka, L., Eyer, J. M., & Pupp, R. L. (2003). *DER Benefits Analysis Studies: Final Report* (No. NREL/SR-620-34636) (p. 95). Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=799633
- Illindala, M., Siddiqui, A., Venkataramanan, G., & Marnay, C. (2006). *Localized Aggregation of Diverse Energy Sources for Rural Electrification using Microgrids* (p. 45). Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from http://www.academia.edu/download/46663627/Localized_Aggregation_of_Diverse_Energy_20160620-18420-nkjhbe.pdf
- John, J. S. (2008, November 30). A Current in Every Ceiling. Retrieved May 4, 2016, from <http://www.greentechmedia.com/articles/read/a-current-in-every-ceiling-5278>
- John, J. S. (2016, September 20). How Duke's Solar and Battery Microgrid Is Weathering Disruptive Grid Events. Retrieved September 21, 2016, from <http://www.greentechmedia.com/articles/read/how-dukes-solar-and-battery-powered-microgrid-is-weathering-grid-events>
- Jones, K. B., Bartell, S. J., Nugent, D., Hart, J., & Shrestha, A. (2013). Urban Microgrid: Smart Legal and Regulatory Policies to Support Electric Grid Resiliency and Climate Mitigation, The. *Fordham Urb. LJ*, 41, 1695.
- Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J.-W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 387–405. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067>
- Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., & Dimeas, A. (2008). Microgrids management. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 54–65. <http://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702>
- KEMA DNV. (2014). *Microgrids - Benefits, Models, Barriers and Suggested Policy Initiatives for the Commonwealth of Massachusetts* (p. 66).
- Khalilpour, R., & Vassallo, A. (2015). Leaving the grid: An ambition or a real choice? *Energy Policy*, 82, 207–221. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.03.005>

- Khatib, T., Mohamed, A., & Sopian, K. (2012). Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia. *Energy and Buildings*, 47, 321–331. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.006>
- Kirubakaran, A., Jain, S., & Nema, R. K. (2009). A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2430–2440. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.04.004>
- Kroposki, B., Basso, T., & DeBlasio, R. (2008). Microgrid standards and technologies (pp. 1–4). IEEE. <http://doi.org/10.1109/PES.2008.4596703>
- Lacey, S. (2016, February 26). The Energy Blockchain: How Bitcoin Could Be a Catalyst for the Distributed Grid. Retrieved February 28, 2016, from <http://www.greentechmedia.com/articles/read/the-energy-blockchain-could-bitcoin-be-a-catalyst-for-the-distributed-grid>
- LaMonica, M. (2012, November). Microgrids Keep Power Flowing Through Sandy Outages. Retrieved September 18, 2016, from <https://www.technologyreview.com/s/507106/microgrids-keep-power-flowing-through-sandy-outages/>
- Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C., Stephens, J., Dagle, J., Guttromson, R., ... Eto, J. (2002). The CERTS microgrid concept. *White Paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy*, 2(3), 30.
- Lasseter, R. H. (2007). Microgrids and distributed generation. *Journal of Energy Engineering*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10798587.2010.10643078>
- Lasseter, R. H., Eto, J. H., Schenkman, B., Stevens, J., Vollkommer, H., Klapp, D., & Roy, J. (2011). CERTS microgrid laboratory test bed. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(1), 325–332.
- Lasseter, R., & Piagi, P. (2004). Microgrid: A Conceptual Solution. Presented at the Power Electronics Specialist Conference, Aachen, Germany. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.683.7829&rep=rep1&type=pdf>
- Liang Che, & Shahidehpour, M. (2014). DC Microgrids: Economic Operation and Enhancement of Resilience by Hierarchical Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2517–2526. <http://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344024>
- Lidula, N. W. ., & Rajapakse, A. D. (2011). Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 186–202. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.03.007>
- Linnenberg, T., Wior, I., Schreiber, S., & Fay, A. (2011). A market-based multi-agent-system for decentralized power and grid control. In *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on* (pp. 1–8). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6059126

- Liu, E., & Bebic, J. (2008). *Power system planning: emerging practices suitable for evaluating the impact of high-penetration photovoltaics* (No. NREL/SR-581-42298) (p. 46). National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.727&rep=rep1&type=pdf>
- Lopes, J. A. P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189–1203. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.016>
- Lopes, J. A. P., Madureira, A. G., & Moreira, C. C. L. M. (2013). A view of microgrids: A view of microgrids. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(1), 86–103. <http://doi.org/10.1002/wene.34>
- Lopes, J. A. P., Vasiljevska, J., Ferreira, R., Moreira, C., & Madureira, A. (2009). Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids. Retrieved from <http://www.microgrids.eu/documents/673.pdf>
- Lo Prete, C., & Hobbs, B. F. (2016). A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets. *Applied Energy*, 169, 524–541. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.099>
- Louie, H. (2016). Operational analysis of hybrid solar/wind microgrids using measured data. *Energy for Sustainable Development*, 31, 108–117. <http://doi.org/10.1016/j.esd.2016.01.003>
- Lovins, A. B., & Rocky Mountain Institute (Eds.). (2002). *Small is profitable* (1st ed). Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute.
- Mackiewicz, R. E. (2006). Overview of IEC 61850 and Benefits. In *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition* (pp. 623–630). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4075831
- Madureira, A. G., & Peças Lopes, J. A. (2012). Ancillary services market framework for voltage control in distribution networks with microgrids. *Electric Power Systems Research*, 86, 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.12.016>
- Madureira, A. G., Pereira, J. C., Gil, N. J., Lopes, J. A. P., Korres, G. N., & Hatziargyriou, N. D. (2011). Advanced control and management functionalities for multi-microgrids. *European Transactions on Electrical Power*, 21(2), 1159–1177. <http://doi.org/10.1002/etep.407>
- Maize, K. (2011, February 1). The Great Solar Storm of 2012? Retrieved from <http://www.powermag.com/the-great-solar-storm-of-2012/>
- Maize, K. (2013, July 1). EMP: The Biggest Unaddressed Threat to the Grid. Retrieved from <http://www.powermag.com/emp-the-biggest-unaddressed-threat-to-the-grid/>
- Maknouninejad, A., Lin, W., Harno, H. G., Qu, Z., & Simaan, M. A. (2012). Cooperative control for self-organizing microgrids and game strategies for optimal dispatch of

- distributed renewable generations. *Energy Systems*, 3(1), 23–60.
<http://doi.org/10.1007/s12667-011-0048-3>
- Malkin, D., & Centolella, P. (2014, March). Results-Based Regulation. Retrieved October 19, 2016, from <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2014/03/results-based-regulation>
- Marnay, C., Asano, H., Papathanassiou, S., & Strbac, G. (2008). Policymaking for microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 66–77.
<http://doi.org/10.1109/MPE.2008.918715>
- Marnay, C., & Bailey, O. C. (2004). *The CERTS Microgrid and the Future of the Macrogrid* (No. LBNL-55281). Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/1103m944.pdf>
- Marnay, C., Chatzivasileiadis, S., Abbey, C., Iravani, R., Joos, G., Lombardi, P., ... von Appen, J. (2015). Microgrid Evolution Roadmap. In *Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 International Symposium on* (pp. 139–144). IEEE. Retrieved from
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7315197
- Marnay, C., & Firestone, R. (2007). Microgrids: An emerging paradigm for meeting building electricity and heat requirements efficiently and with appropriate energy quality. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Retrieved from
<https://escholarship.org/uc/item/54b7r66j.pdf>
- Marnay, C., Venkataramanan, G., Stadler, M., Siddiqui, A., Firestone, R., & Chandran, B. (2007). Optimal Technology Selection and Operation of Commercial-Building Microgrids. Presented at the IEEE 2007 PES General Meeting.
- Martin, R. (2016a, April). Texas and California have a bizarre problem: too much renewable energy. Retrieved September 18, 2016, from
<https://www.technologyreview.com/s/601221/texas-and-california-have-too-much-renewable-energy/>
- Martin, R. (2016b, May). Loading up on wind and solar is causing new problems for Germany. Retrieved September 18, 2016, from
<https://www.technologyreview.com/s/601514/germany-runs-up-against-the-limits-of-renewables/>
- Maryland Resiliency Through Microgrids Task Force. (2014). Maryland: Resiliency Through Microgrids Task Force Report.
- Massachusetts Department of Public Utilities. (2014). Investigation by the Department of Public Utilities on its own Motion into the Modernization of the Electric Grid.
- McGowan, E. (2011). Why Two Grids Can Be Better Than One - How the CERTS Microgrid Evolved from Concept to Practice. U.S. Department of Energy.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981–989.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>

- Mihaylov, M., Razo-Zapata, I., Rădulescu, R., & Nowé, A. (2016). Boosting the Renewable Energy Economy with NRGcoin. Presented at the 4th International Conference on Information and Communications Technologies for Sustainability. Retrieved from http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=25860387
- Miller, C. R. (2005). *Electromagnetic pulse threats in 2010*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA463475>
- Minkel, J. R. (2008, August). The 2003 Northeast Blackout--Five Years Later. Retrieved September 13, 2016, from <http://www.scientificamerican.com/article/2003-blackout-five-years-later/>
- Mitra, I., Degner, T., & Braun, M. (2008). Distributed generation and microgrids for small island electrification in developing countries: a review. *Solar Energy Society of India*, 18(1), 6–20.
- Montoya, M., Sherick, R., Haralson, P., Neal, R., & Yinger, R. (2013). Islands in the Storm: Integrating Microgrids into the Larger Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(4), 33–39. <http://doi.org/10.1109/MPE.2013.2258279>
- Morris, G. Y., Abbey, C., Joos, G., & Marnay, C. (2012). A Framework for the Evaluation of the Cost and Benefits of Microgrids. In *CIGRÉ International Symposium, The electric power system of the future-Integrating supergrids and microgrids, Bologna, Italy, 13-15 September 2011*. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/2f37v7zq.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory. (2016, February). Energy Systems Integration - Microgrid Testing.
- Naval Facilities Engineering Command. (2015). *Technology Transition Final Public Report: Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security (SPIDERS)* (p. 41). U.S. Department of Defense.
- Navigant Research: virtual power plant market set to explode. (2014, October 21). Retrieved September 15, 2016, from <http://onlyit.ca/21-10-14-virtual-power-plant-research/>
- Nayar, C. V. (1995). Recent developments in decentralised mini-grid diesel power systems in Australia. *Applied Energy*, 52(2), 229–242.
- Neef, H. J. (2009). International overview of hydrogen and fuel cell research. *Energy*, 34(3), 327–333.
- Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096–2103. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2008.10.006>
- Newman, D. (2015). Right-sizing the grid. *Mechanical Engineering*, 137(1), 34.

- New York Public Service Commission. (2014, April). Reforming The Energy Vision: NYS Department of Public Service Staff Report and Proposal. Case 14-M-0101.
- New York State Energy Research and Development Authority, New York State Department of Public Service, & New York State Division of Homeland Security and Emergency Services. (2014). *Microgrids for Critical Facility Resiliency in New York State* (No. NYSERDA Report 14-36) (p. 375). New York State Energy Research and Development Authority.
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Canizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., ... Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in Microgrid Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1905–1919.
<http://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... others. (2014). *Climate change 2014: synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. IPCC. Retrieved from <http://epic.awi.de/37530/>
- Palizban, O., Kauhaniemi, K., & Guerrero, J. M. (2014). Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 428–439. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.016>
- Panora, R., Gehret, J., Furse, M., & Lasseter, R. H. (2014). Real-world Performance of a CERTS Microgrid in Manhattan. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1356–1360.
- Parag, P. (2015). Beyond energy efficiency: A “prosumer market” as an integrated platform for consumer engagement with the energy system. In *ECEEE 2015 Summer Study on Energy Efficiency* (pp. 15–23). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Yael_Parag/publication/277551805_Beyond_energy_efficiency_A_'prosumer_market'_as_an_integrated_platform_for_consumer_engagement_with_the_energy_system/links/556c56e508aeccd7773a88c3.pdf
- Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1(4), 16032. <http://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32>
- Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*, 3, 890–925.
<http://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>
- Parisio, A., & Glielmo, L. (2011). Energy efficient microgrid management using model predictive control. In *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 5449–5454). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6161246
- Patterson, B. T. (2012). Dc, come home: Dc microgrids and the birth of the “enernet.” *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(6), 60–69.

- Perez, E. (2016, February). U.S. investigators find proof of cyberattack on Ukraine power grid. Retrieved September 13, 2016, from <http://www.cnn.com/2016/02/03/politics/cyberattack-ukraine-power-grid/index.html>
- Piagi, P., & Lasseter, R. H. (2006). Autonomous control of microgrids. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting* (p. 8–pp). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1708993
- President's Council of Economic Advisers, & U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. (2013). *Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resilience to Weather Outages* (p. 28). Executive Office of the President.
- Qu, M. (2014). Microgrid Policy Review of Selected Major Countries, Regions, and Organizations. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/51q0g9p8.pdf>
- Roche, R., Blunier, B., Miraoui, A., Hilaire, V., & Koukam, A. (2010). Multi-agent systems for grid energy management: A short review. In *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 3341–3346). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5675295
- Romankiewicz, J., Marnay, C., Zhou, N., & Qu, M. (2014). Lessons from international experience for China's microgrid demonstration program. *Energy Policy*, 67, 198–208. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.059>
- Schnitzer, D., Lounsbury, D., Carvallo, J., Deshmukh, R., Apt, J., & Kammen, D. (2014). *Micro-grids_for_Rural_Electrification-A_critical_review_of_best_practices_based_on_seven_case_studies.pdf*. United Nations Foundation.
- Schwaegrl, C., Tao, L., Lopes, J. A. P., Madureira, A., Mancarella, P., Anastasiadis, A., ... Krkoleva, A. (2009, December). Report on the technical, social, economic, and environmental benefits provided by Microgrids on power system operation.
- Sechilariu, M., Wang, B., & Locment, F. (2013). Building-integrated microgrid: Advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication. *Energy and Buildings*, 59, 236–243. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.039>
- Shamshiri, M., Gan, C. K., & Tan, C. W. (2012). A review of recent development in smart grid and micro-grid laboratories. In *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 IEEE International* (pp. 367–372). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6230891
- Siddiqui, A., & others. (2004). Effects of a carbon tax on microgrid combined heat and power adoption.
- Smart Energy Demand Coalition. (2015). Mapping Demand Response in Europe Today - 2015.

- Smith, R. (2014, February 5). Assault on California Power Station Raises Alarm on Potential for Terrorism. *Wall Street Journal*. Retrieved from <http://www.wsj.com/articles/SB10001424052702304851104579359141941621778>
- Smith, R. (2016, July 14). How America Could Go Dark. *Wall Street Journal*. Retrieved from <http://www.wsj.com/articles/how-america-could-go-dark-1468423254>
- Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W. H. J., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 659–672. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>
- Stadler, M., Cardoso, G., Mashayekh, S., Forget, T., DeForest, N., Agarwal, A., & Schönbein, A. (2015). Value Streams in Microgrids: A literature. Retrieved from http://www.cet.or.at/pdf_files/value_streams_in_microgrids_a_literature.pdf
- Stadler, M., Groissböck, M., Cardoso, G., & Marnay, C. (2014). Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel. *Applied Energy*, 132, 557–567. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.041>
- Suryanarayanan, S., Mitra, J., & Biswas, S. (2010). A conceptual framework of a hierarchically networked agent-based microgrid architecture (pp. 1–5). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484332>
- Suryanarayanan, S., Rietz, R. K., & Mitra, J. (2010). A framework for energy management in customer-driven microgrids (pp. 1–4). IEEE. <http://doi.org/10.1109/PES.2010.5589873>
- Suvire, G. O., Mercado, P. E., & Ontiveros, L. J. (2010). Comparative analysis of energy storage technologies to compensate wind power short-term fluctuations (pp. 522–528). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC-LA.2010.5762932>
- Su, W., & Wang, J. (2012). Energy Management Systems in Microgrid Operations. *The Electricity Journal*, 25(8), 45–60. <http://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>
- Thornton, A., & Monroy, C. R. (2011). Distributed power generation in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4809–4817.
- Times of Israel. (2016, January). Steinitz: Israel's Electric Authority hit by “severe” cyber-attack. Retrieved May 22, 2016, from <http://www.timesofisrael.com/steinitz-israels-electric-authority-hit-by-severe-cyber-attack/>
- Ton, D. T., & Smith, M. A. (2012). The US Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94.
- Trabish, H. K. (2016, August). Public purpose microgrids: Mixed-ownership models spur utility investment in growing sector. Retrieved August 31, 2016, from <http://www.utilitydive.com/news/public-purpose-microgrids-mixed-ownership-models-spur-utility-investment-i/425296/>
- Tsikakakis, A. G., & Hatziargyriou, N. D. (2011). Centralized control for optimizing microgrids operation (pp. 1–8). IEEE. <http://doi.org/10.1109/PES.2011.6039737>

- Tweed, K. (2014, July 17). Con Ed Looks to Batteries, Microgrids and Efficiency to Delay \$1B Substation Build. Retrieved September 18, 2016, from <http://www.greentechmedia.com/articles/read/con-ed-looks-to-batteries-microgrids-and-efficiency-to-delay-1b-substation>
- Tweed, K. (2015, July 9). New York Looks to Cement Its Lead as Microgrid Capital of the World. Retrieved March 3, 2016, from <https://www.greentechmedia.com/articles/read/new-york-looks-to-cement-its-lead-as-microgrid-capital-of-the-world>
- U.S.-Canada Power System Outage Task Force. (2004). *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations*. U.S. Department of Energy. Retrieved from <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf>
- U.S. Department of Energy, & U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Combined Heat and Power - A Clean Energy Solution* (No. DOE/EE-0779).
- Ustun, T. S., Ozansoy, C., & Zayegh, A. (2011a). Distributed Energy Resources (DER) object modeling with IEC 61850–7–420. In *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6102505
- Ustun, T. S., Ozansoy, C., & Zayegh, A. (2011b). Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4030–4041. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.033>
- Vaccaro, A., Popov, M., Villacci, D., & Terzija, V. (2011). An Integrated Framework for Smart Microgrids Modeling, Monitoring, Control, Communication, and Verification. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 119–132. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2081651>
- Van Broekhoven, S. B., Judson, N., Nguyen, S. V., & Ross, W. D. (2012). *Microgrid study: energy security for DoD installations*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA565751>
- Van Broekhoven, S., Judson, N., Galvin, J., & Marqusee, J. (2013). Leading the Charge: Microgrids for Domestic Military Installations. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(4), 40–45. <http://doi.org/10.1109/MPE.2013.2258280>
- Veitch, C. K., Henry, J. M., Richardson, B. T., & Hart, D. H. (2013). Microgrid cyber security reference architecture. *Sandia Nat. Lab.(Hierarch. SNL-NM), Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND2013-5472*. Retrieved from <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2013/135472.pdf>
- Walton, R. (2014, October). Former FERC chair says microgrids are key to grid security. Retrieved September 13, 2016, from

- <http://www.utilitydive.com/news/former-ferc-chair-says-microgrids-are-key-to-grid-security/327814/>
- Walton, R. (2016, June). Combined heat & power: The grid's "best kept secret?" Retrieved June 14, 2016, from <http://www.utilitydive.com/news/combined-heat-power-the-grids-best-kept-secret/420484/>
- Wang, W., & Lu, Z. (2013). Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. *Computer Networks*, 57(5), 1344–1371.
<http://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.017>
- Wang, Y., Wang, B., Chu, C.-C., Pota, H., & Gadh, R. (2016). Energy management for a commercial building microgrid with stationary and mobile battery storage. *Energy and Buildings*, 116, 141–150. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.055>
- Washom, B., Dilliot, J., Weil, D., Kleissl, J., Balac, N., Torre, W., & Richter, C. (2013). Ivory Tower of Power: Microgrid Implementation at the University of California, San Diego. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(4), 28–32.
<http://doi.org/10.1109/MPE.2013.2258278>
- Williams, J. H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W. R., ... Torn, M. S. (2012). The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050: The Pivotal Role of Electricity. *Science*, 335(6064), 53–59.
<http://doi.org/10.1126/science.1208365>
- Wilson, C. (2008). High altitude electromagnetic pulse (HEMP) and high power microwave (HPM) devices: Threat assessments. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA529982>
- Wiser, R., Barbose, G., Heeter, J., Mai, T., Bird, L., Bolinger, M., ... others. (2016). A retrospective analysis of the benefits and impacts of US renewable portfolio standards. *Lawrence Berkeley National Laboratory, National Renewable Energy Laboratory*. Retrieved from <http://climate-xchange.org/wp-content/uploads/2015/11/Renewable-Energy-Standards-Study.pdf>
- Wood, E. (2014, September 27). Massachusetts Awards \$7M for Community Microgrid & Resiliency Projects. Retrieved from <https://microgridknowledge.com/massachusetts-awards-7m-community-microgrid-resiliency-projects/>

PUBLICATION DOCUMENTATION PAGE

Item	Value
1. Publication No. MONI -	RD-22-18
2. Additional No.	
3. Recipient Accession No.	
4. Title and subtitle	Microgrids deployment in Israel – socio-techno-economic analysis of benefits, challenges and regulatory framework
5. Publication Date	September, 2018
6. Performing Organization Project No.	Interdisciplinary Center (IDC) Herzliya
7. Author(s)	Parag, Yael Levy, Nadav
8. Performing Organization Report No.	
9. Performing organization names and addresses	
10. Ministry of Energy & Water Resources Contract No.	215-11-038
11. Sponsoring organization(s) names and address(es)	(a) Ministry of National Infrastructures Division of Research and Development P.O.Box 36148, 9136002 Jerusalem
12. Type of report and period covered	Final project report (2016-2018)
13. Sponsoring Org. Code	
14. Supplementary Notes	
15. Abstract	This report surveys current trends in integrating microgrids into electricity systems in developed countries, and the potential for microgrid integration in Israel. In addition to the technological advances affecting microgrids' viability, changes in regulation and markets

Item	Value
	present both challenges and opportunities for microgrids. This report summarizes the societal costs and benefits of microgrid integration, focusing on incremental environmental, socioeconomic, and electricity system benefits and costs. Approaches to quantifying these costs and benefits, as well as the advantages and limitations of each approach, are described in some detail. The report concludes with recommendations for actions necessary in order to advance microgrids beyond their current niche focus on specific institutional sites to a resource to be included for electricity system planning at a national level in Israel.
16. Identifiers/Keywords/Descriptors	microgrids, distributed generation, prosumers, energy security מיקרוגריד, אנרגיה מבוזרת, פרוסיומרים, בטחון אנרגיה
17. Copies of This Report Are Available from:	Interdisciplinary Center (idc) Herzliya
18. Security Class (this report)	None
19. Security Class (this page)	None
20. No. of pages	236
21. Price	Open access