



המיקרוגריד יכול לפעול כמערכת עצמאית סגורה. (צילום: שאטרסטוק)

# על מיקרוגריד שמעתם?

ביזור מערכת האנרגיה בישראל באמצעות מערכות מיקרוגריד

פרופ' יעל פרג

אנושיים בתחשיב הזה, כגון חיבורים פיראטיים לרשת או זיוף קריאות מונה.

לפי המחקר ב-Nature, במהלך 2016 אבדו כ-1,700 טרה-ואט-שעה (TWh) של אנרגיה ברשתות חשמל בעולם (כמות השווה לקרוב לפי 30 מסך כל החשמל שנצרך בישראל בשנה). במונחי מזהמים שנפלטו לאטמוספירה, מדובר בכ-950 מיליון טונות של שווה ערך לפחמן דו-חמצני שנפלטו ותדלקו את אפקט החממה שלא לצורך. לפי נתוני האיחוד האירופי, מדובר בכמות גדולה יותר מסך כל הפליטות של צרפת, איטליה וספרד יחדיו באותה השנה. אולם יש סיבה לאופטימיות: מחברות המאמר קבעו כי ניתן למנוע עד כמחצית מהפליטות המיותרות ברמה הגלובלית על ידי שילוב של אמצעים טכנולוגיים וכלכליים.

## מיקרוגריד

אחת הדרכים להפחית את אובדן האנרגיה בהולכה אשר המודעות אליו הולכת וגוברת בשנים האחרונות בהקשר זה הוא ה"מיקרוגריד" (מיקרו-רשת). פרופ' פרג מסבירה כי מדובר ברשתות חשמל מקומיות שיכולות לתפקד באופן מחובר לרשת החשמל או כ"אי" עצמאי שבו מתקיימים ייצור, חלוקה, אחסון, צריכה וניהול. אמנם אין הגדרה אחת לממדים של רשת כזו מבחינת הגודל מרחבי או הספק היוצר, אך על פי רוב מדובר על רשת אשר מכסה איזור גאוגרפי מובחן, יישוב קטן, שכונה, אזור תעשייה או מתחמים ייעודיים כדוגמת קמפוס אוניברסיטאי. יצרן במיקרוגריד יכול לייצר חשמל באמצעות אנרגיה מתחדשת (או שאינה מתחדשת) ולמכור את העודפים לצרכנים אחרים במיקרוגריד. בגלל ההסתמכות על ייצור שבעיקרו הוא מקומי,

רשתות תקשורת מבזרות שלא תלויות בגורם מנהל מרכזי הופכות לנפוצות יותר ויותר (שירותי ענן, בלוקצ'יין), והן מאפשרות קבלת שירותים בצורה יעילה ויציבה בהרבה. אך האם רשתות אחרות יצליחו להדביק את הפער? המבנה המוכר של רשת החשמל התקבע בחצי הראשון של המאה הקודמת - רשת שבנויה סביב מוקדי ייצור ספורים בהספק גבוה ומזרימה חשמל באופן חד-כיווני לכלל הצרכנים דרך קווי תמסורת ארוכים. למבנה מיושן זה יש מחירים סביבתיים. מחקר אמריקני שפורסם ב-Nature בדק את ההשלכות האקלימיות של איבוד אנרגיה ברשת החשמל העולמית.

אל מול משבר האקלים, עיקר המאמצים לצמצום פליטות גזי חממה בסקטור האנרגיה מתמקדים באספקה נקייה (מעבר לאנרגיות דלות פחמן, למשל אנרגיה סולארית) או בהפחתת הביקוש ועידוד חיסכון והתייעלות אנרגטית. אך מה קורה לאנרגיה בדרך מתחנת הכוח ועד לשקע? בכל רשת חשמל, אחוז מסוים מהאנרגיה המיוצרת מתבזבז לפני הגעתו לצרכן. וכך, גזי החממה וזיהום האוויר שנפלטים בייצור אנרגיה זו מהווים למעשה זיהום עודף. לדברי פרופ' יעל פרג, סגנית דיקן ביה"ס לקיימות במרכז הבינתחומי הרצליה: "יש משמעות רבה למיקום הייצור של החשמל. האיבוד ברשת הוא, בין היתר, פונקציה של המרחב." פרופ' פרג מציינת את טקסט כדוגמה - שהיא אמנם המדינה המובילה בהפקת אנרגיית רוח בארה"ב, אך החשמל בה מיוצר מאות קילומטרים ממוקדי הצריכה. ככל שהמרחק בין מוקד הייצור לצריכה גדל, כך גדל פוטנציאל אובדן החשמל בדרך. מרבית איבוד האנרגיה ברשתות ברחבי העולם מתרחש אמנם כתוצאה מסיבות טכניות, אך נהוג להחשיב גם גורמים



**מיקרוגרید אשר משלב מערכות יצור קטנות, מתחדשות, מבוזרות וחכמות, הוא אחד התחומים מעוררי העניין בעולם האנרגיה, בישראל ובמדינות מפותחות, בשל התועלות הגלומות בו. מערכות מיקרוגרید יכולות לתת מענה לחלק גדול מאתגרי ביטחון האנרגיה בישראל, ובכללם הגברת העצמאות אנרגטית, שיפור שרידות מערכת החשמל והפחתת פליטות גזי חממה**

עיקר 'השכל' במיקרוגרید הוא ניהול המשאבים השונים של הרשת והיכולת לעשות אופטימיזציה מקומית של יצור, אחסון וצריכה. כיום חלקים מרכיבי המיקרוגרید - למשל, אחסון עודפי חשמל - כבר קיימים בשוק אך אינם כדאיים כלכלית, אולם בשנים האחרונות התפתחו טכנולוגיות אלה בצורה משמעותית, וישומן במסגרת מיקרוגרید נתפסת כחלק אינטגרלי מפיתוח תפיסת הרשת החכמה. מערכות מיקרוגרید מתקדמות משתמשות בטכנולוגיית מידע ותקשורת דו-כיוונית לאיסוף מידע על יצור מקומי, התנהגויות של צרכנים, ומחירי אנרגיה, ופועלות ומגיבות על בסיס מידע זה באורח אוטומטי כדי לשפר את היעילות, האמינות, הכלכליות, והקיימות של ייצור ושימוש בחשמל.

המיקרוגרید יכול להיות מוקם במקום מרוחק מרשת החשמל וללא כל אפשרות חיבור אליה ולפעול כרשת עצמאית סגורה ("אי"). אולם המיקרוגרید יכול להיות מוקם גם במסגרת רשת החשמל הארצית הקיימת ולפעול בחיבור אליה, קרי, להזרים לה עודפי חשמל או לרכוש חשמל בעת הצורך או להתנתק ממנה לפרקי זמן שונים ולפעול כ"אי" בהתאם

לתנאים ולהעדפות הכלכליות והסביבתיות. הבחירה האם להיות מחוברים לרשת החשמל או להתנתק תלויה במידה רבה בהעדפות בעלי ומנהלי המיקרוגרید.

מערכות מיקרוגרید יכולות להיות שונות מאוד האחת מהשניה, אולם באופן אידאלי הן מתאפיינות בעלויות הקמה נמוכות יחסית. בנוסף, ביזור המערכת טומן בתוכו פוטנציאל להגברת הגמישות התפעולית והיעילות אשר משפרים את שרידות המערכת המקומית והארצית תוך קידום התייעלות אנרגטית, והורדת עלות האנרגיה לצרכנים.

העניין במיקרוגריד כמנגנון שיכול להגביר את ביטחון האנרגיה גבר בשנים האחרונות בעקבות שורת אירועים חריגים וקיצוניים שפגעו באספקת החשמל במדינות מפותחות מחד, ומאיזך



**המיקרוגריד יכול לתת מענה גם לסוגיית התנודתיות הספציפית של מקורות האנרגיה המתחדשת באזור זה (צילום: דוברות חח"י)**

המחירים גמישים ומאפשרים ניהול מיטבי של עומסי הרשת והביקושים לחשמל והאנרגיה בהתאם ליכולות היצור ולאחסון מקומי, תוך עידוד לחסכון בצריכה. התועלת הסביבתית כפולה - סלילת הדרך לחדירה נרחבת יותר של שימוש באנרגיות מתחדשות ומבוזרות שמיצרות חשמל בקנה מידה קטן יחסית וצמצום איבוד האנרגיה בהולכה למרחקים ארוכים. בישראל בנוסף, ישנו יתרון ביטחוני לביזור מערכת האנרגיה והקמת רשתות ומתקני ייצור חשמל מבוזרים, זאת בשל האיום ההולך ועולה של רקטות מדויקות וטילי שיט על מתקנים ביטחוניים ומתקני תשתיות שונים וביניהם תחנות כוח.

במאמר שפרסמו פרופ' יעל פרג ומלקולם איינספן תורגמו כלל היתרונות הללו לתועלת כלכלית. לצד השיקול הסביבתי של הפחתת פליטות, שימוש במיקרוגריד עשוי לחסוך את ההשקעה בתשתיות הולכה יקרות, לספק אפשרויות תעסוקה מקומיות ולהפחית את הפגיעה באספקה במקרים של פגיעה במערך הייצור אם בשל אסונות טבע או בשל עימות צבאי. המחקר שהוכן עבור משרד האנרגיה התבסס על נתונים רלוונטיים לישראל ובחן את התועלת של מיקרוגריד בהספק של 10

מגה-ואט (להשוואה, תחנת הכוח בחדרה היא בעלת הספק של למעלה מ-2,500 מגה-ואט). גם תחת הנחות שמרניות, יתרונות המיקרוגריד מניבים רווח בשווי של למעלה מ-250 אלף דולר בשנה בהשוואה למקבילה הקונבנציונלית, בין היתר בזכות חיסכון ניכר בתשתיות הולכה וחלוקה.

מיקרוגריד אשר משלב מערכות יצור קטנות, מתחדשות, מבוזרות וחכמות, הוא אחד התחומים מעוררי העניין בעולם האנרגיה, בישראל ובמדינות מפותחות, בשל התועלות הגלומות בו. מערכות מיקרוגריד יכולות לתת מענה לחלק גדול מאתגרי ביטחון האנרגיה בישראל, ובכללם הגברת העצמאות אנרגטית, שיפור שרידות מערכת החשמל והפחתת פליטות גזי חממה. אף שאין הסכמה מלאה לגבי ההגדרה מהו "מיקרוגריד",

**השינויים הטכנולוגיים וירידת המחירים הביאו לכך שבעולם פועלים בהצלחה מספר הולך וגדל של מיקרוגרידים והמעבר מחזון למציאות של ריבוי רשתות מיקרוגריד תופס תאוצה. אולם לצד יתרונות והתועלות הגלומות בביזור מערכת האנרגיה, יישום מערכות מיקרוגריד מציב בפני מקבלי ההחלטות ובעלי עניין אחרים בארץ ובעולם שאלות, בעיות ואתגרים חדשים**



הנחת עמודי מתח גבוה בנגב (צילום: דוברות חח"י)

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).

### יתרונות המיקרוגריד בשילוב אנרגיה מתחדשת

האתגר העיקרי בשימוש באנרגיה שמש ורוח כמקור עיקרי להפקת חשמל הוא התנודתיות והזמינות שלהם אשר מושפעים מתנאים טבעיים שאינם בשליטתו של מפעיל המערכת, לדוגמה מזג האוויר, שעות היממה או עונות השנה. כל אלה עלולים לפגוע באמינות אספקת החשמל וביכולת להתאים את היצע החשמל לביקוש לו בכל רגע נתון. מקדם ההספק (capacity factor), הוא היחס בין תפוקת אנרגיה חשמלית בפועל לאורך זמן נתון לתפוקת האנרגיה החשמלית המרבית האפשרית באותה תקופה. מקדם ההספק של אנרגיה סולארית בישראל עומד על 20%. בנוסף, פרופיל יצור החשמל מהשמש מאופיין בעליה חדה בשעות היום ובירידה חדה בשעות אחר הצהריים, פרופיל זה מוכר בשם עקומת הברווז. בגלל מאפיינים אלה, חדירה של אנרגיה סולארית בשיעורים גבוהים בישראל אפשרית רק אם ישולב בה רכיב משמעותי משלים של אנרגיה בת-שיגור (DISPATCH) או כמות משמעותית של אגירה, אשר יאפשרו ניהול גמיש של היצע האנרגיה המתחדשת המיוצרת בהתאם לביקושים. התועלות הסביבתיות של השימוש במערכת מיקרוגריד כוללות, כאמור, הפחתה וצמצום של פליטת מזהמים לסביבה הודות לאפשרות נרחבת לשימוש באנרגיה נקיות (כגון רוח, סולארי), אך גם הודות לשימוש יעיל יותר בדלקים פוסיליים במערכות קוגרנציה משלימות, (Combined Heat and Power, CHP) שילוב אמצעים להתייעלות אנרגטית,

שיפורים טכנולוגיים בד בבד עם ירידת מחירי יצור האנרגיה המתחדשת, אחסון וניהול רשתות. לדוגמה, רעידת האדמה ביפן בשנת 2011, אשר הוציאה מכלל שימוש את תחנת הכוח הגרעינית בפוקהשימה והפחיתה דרמטית את כושר יצור החשמל ביפן למשך פרק זמן ממושך או סופת ההוריקן סנדי, שפגעה בחוף המזרחי של ארה"ב בשנת 2012 והשביתה את מערכת יצור והולכת החשמל בניו-יורק. מדינות רבות, בהן סין, יפן, דרום קוריה, סינגפור, ארה"ב, קנדה, גרמניה ואחרות בוחנות מערכות מיקרוגריד כהזדמנות 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. האיחוד האירופאי, למשל, רואה בקהילות אנרגיה מאופסות פחמן כאחת מהאסטרטגיות להגיע ליעדי הפליטות ומקדם מדיניות שתאפשר יישום נרחב שלהן.

השינויים הטכנולוגיים וירידת המחירים הביאו לכך שבעולם פועלים בהצלחה מספר הולך וגדל של מיקרוגרידים והמעבר מחזון למציאות של ריבוי רשתות מיקרוגריד תופס תאוצה. אולם לצד יתרונות והתועלות הגלומות בביזור מערכת האנרגיה, יישום מערכות מיקרוגריד מציב בפני מקבלי ההחלטות ובעלי עניין אחרים בארץ ובעולם שאלות, בעיות ואתגרים חדשים. חסמים שונים - טכנולוגיים, רגולטורים, כלכליים ואחרים - מאטים יישום נרחב יותר של מערכות מיקרוגריד. למשל, חסמים הנוגעים לרכיבים טכניים וטכנולוגיים במיקרוגריד, סוגיות של אבטחת מידע במערכת מבוזרת, וכן יצירת וניהול הממשק שבין תפקוד המיקרוגריד כרשת עצמאית מנותקת ('אי') למצב של חיבור לרשת. החסמים הכלכליים כוללים עלויות גבוהות של אחסון וניהול ואתגרים ביצירת שוק אשר יעביר את התועלות לצרכנים, למערכת החשמל ולחברה. חסמים קיימים גם במישור הרגולטורי והמוסדי ובראשם הקושי הפרקטי להתמודד עם סוג חדש של שחקנים לא מוכרים במשק אנרגיה מסורתי ושמרן ולפקח עליהם והאפשרות ליצירת שווקי חשמל משניים עצמאיים. שאלות נוספות נוגעות להשפעת של ביזור המערכת על היבטים רחבים יותר של ניהול משק האנרגיה ברמה הלאומית וכן על סוגיות חברתיות כמו מחיר הוגן ובר השגה לכולם.

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 מבוזר יהיה שונה מאוד מזה המוכר היום ולכן הרגולציה על השוק, כמו גם המודלים העסקיים הרווחים כיום אינם מתאימים עבורו. על מנת למקסם

## פרופ' יעל פרג כהן מינץ



### פרופ' יעל פרג כהן מינץ

הינה סגן הדיקן בבית ספר לקיימות של המרכז הבינתחומי הרצליה.

פרופ' פרג בעלת דוקטורט במדעי החברה באוניברסיטת תל אביב. במשך 6 שנים כיהנה כחוקרת בכירה ב- Environmental Change Institute שבאוניברסיטת

פרופ' יעל פרג כהן מינץ

אוקספורד, שם התמקד מחקרה בתקופת המעבר (Transition period) למערכות אנרגיה נקיות, בכלי מדיניות חדשניים להפחתת פליטות של גזי-חממה וחסכון באנרגיה ובמקומה של החברה האזרחית בתהליכים אלה. מחקרה הנוכחי עוסק בהיבטים סוציו-טכניים של ביטחון אנרגיה ובמשק חשמל דל פחמן, מבוזר ועתיר יצרנים-צרכנים (prosumers). פרופ' פרג כהן מינץ זכתה במענקי מחקר יוקרתיים ופרסמה מאמרים בכתבי עת מובילים בתחום וכן הציגה את מחקרה בכנסים בינלאומיים רבים.

הפחתת צריכת החשמל באמצעות אופטימיזציה של אמצעי הייצור וגימושות רבה יותר. גמישות היא היכולת להתאים במהירות בין היצע לביקוש ובין ביקוש להיצע כתלות באילוצים. בגלל הניהול המקומי והיעיל יותר של משאבי היצור, האחסון והביקוש, ובגלל הקרבה בין המקום בו מיוצרת האנרגיה למקום בו היא נצרכת, מיקרוגרידים יכולים לפעול באופן גמיש ומהיר יותר ובכך להפחית את העלויות הכרוכות בהולכת האנרגיה המתחדשת או להקטין את הצורך באגירה בקנה מידה גדול ובכך ולהקל על מעבר למערכת אנרגיה מבוזרת ודלת פחמן.

אף שניתן לצמצם את השימוש באנרגיה המתחדשת לצורך איזון הרשת, הרי שצמצום זה מביא לבזבז משאבי יצור ומפחית את הסיכוי לעמוד ביעדים הלאומיים לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים. המיקרוגריד, הפועל באזור גיאוגרפי נתון, יכול לתת מענה גם לסוגיית התנודתיות הספציפית של מקורות האנרגיה המתחדשת באזור זה. מיקרוגרידים בישראל יכולים לכלול את משאבי ייצור (במיוחד שמש אך גם מעט רוח), אגירה, ניהול ביקוש, בנוסף לייצור קונבנציונלי בהיקפים האופטימאליים - כל זאת בעלות נמוכה יותר מהמשך השימוש בכללי תפעול מבוססי "עסקים כרגיל".

בנוסף, מערכות אנרגיה בהן קיימים הרבה מיקרוגרידים יכולות לשפר את אמינות ושרידות המערכת כולה, משום שמיקרוגריד אחד יכול לגבות מיקרוגריד אחר בעת הצורך. באופן כזה מיקרוגרידים מספקים יתירות ויכולים לשפר את שרידות המערכת ולשפר את יכולתה להתמודד עם תקלות ושינויים צפויים ובלתי צפויים - או במלים אחרות, לשפר את ביטחון האנרגיה של ישראל.