

זהר ברנט-יצחקי

המרכז האקדמי רופין; קבוצת
המחקר לקיימות סביבתית וחברתית,
המרכז האקדמי רופין

מור נגר

קבוצת המחקר לקיימות סביבתית
וחברתית, המרכז האקדמי רופין

בר יוחאי

קבוצת המחקר לקיימות סביבתית
וחברתית, המרכז האקדמי רופין

גל ברוך-לוי

קבוצת המחקר לקיימות סביבתית
וחברתית, המרכז האקדמי רופין

ציטוט מומלץ

ברנט-יצחקי ז, נגר מ, יוחאי ב וברוך-
לוי ג. 2022. ההשפעה של קור
קיצוני וגלי חום על צריכת החשמל
בישראל – בחינה באמצעות מודלים
של למידת מכונה. אקולוגיה וסביבה
(4)13.



שלג בירושלים הבירה, 2013. ימים עם קור קיצוני וכן גלי חום הם גורמים משמעותיים המשפיעים על עלייה בצריכת החשמל בישראל | צילום: זאב ברקן, פליקס
CC BY 2.0

ההשפעה של קור קיצוני וגלי חום על צריכת החשמל בישראל – בחינה באמצעות מודלים של למידת מכונה

16 בפברואר, 2023

גיליון חורף 2022 / כרך 13(4)

[חזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- לטמפרטורות הסביבה ישנה השפעה על צריכת החשמל במגזר הביתי, שגדלה בעת גלי חום וקור. שינוי האקלים צפוי להגדיל את עוצמתם, תדירותם ומשכם של גלי חום וקור, ולכן יש חשיבות רבה להעמקת ההבנה של קשר זה.
- במאמר זה מוצג ניתוח של צריכת החשמל בישראל ומידול שלו, שבוצעו כדי לזהות את הגורמים המשפיעים על צריכת החשמל, תוך ניסיון לבודד את ההשפעה של גלי חום וקור.
- כימות הקשר בין גלי חום וקור לבין עלייה בצריכת החשמל בישראל, כפי שנעשה במחקר זה, יכול לסייע בהיערכות לביקושים עתידיים של חשמל, ובתכנון ארוך טווח של יכולת הייצור הנדרשת כדי לענות על אותם ביקושים.

מערכת אקולוגיה וסביבה

תקציר

ישראל נחשבת למדינה עם יוקר מחיה גבוה ביחס למדינות מפותחות אחרות בעולם. אחד מרכיבי יוקר המחיה הוא הוצאות על חשמל. רשות החשמל נערכת לאספקת חשמל, מתמחרת אותו על סמך הביקוש וההיצע, ואחראית לספקו לצרכנים. בעוד שצריכת החשמל במגזר התעשייתי קבועה למדי, הצריכה במגזר הביתי משתנה, אך לא תמיד נגזרת ממחירו. יתר על כן, קיימים באוכלוסייה פערי ידע לגבי מחיר החשמל והגורמים המשפיעים עליהם.

במחקר זה ניתחנו את הגורמים המשפיעים על צריכת החשמל בישראל, ובחנו את ההשפעה של גלי חום ואירועי קור קיצוני על העלייה בצריכת החשמל. לשם כך, ניתחנו את ערך ה-SMP, מדד המבטא את עלות ייצור החשמל, המושפעת מצריכת החשמל, ובנינו מודלים של רגרסיה לינארית, KNN ויערות אקראיים לניבוי מדד זה ולניבוי חריגות בו על סמך פרמטרים שונים, כגון טמפרטורה, גלי חום, אירועי קור קיצוני, סופי שבוע וימי חופש. שימוש במודלים אלה עשוי לסייע לרשות החשמל לחזות ערכי SMP בתאריכים עתידיים ולהיערך לאספקת החשמל בהתאם.

בעבודה זו מצאנו קשר ישיר בין אירועי גלי חום לבין חריגות במדד ה-SMP. מניתוח תוצאות המודלים עולה כי המשתנה המשפיע ביותר על מדד ה-SMP הוא הטמפרטורה: טמפרטורות גבוהות יותר בעונות החמות של השנה, וטמפרטורות נמוכות יותר בעונות הקרות של השנה, מביאות לעלייה בערכי ה-SMP, בשל הצורך לקרר או לחמם את הבתים. כדי לנבא חריגות במדד ה-SMP השתמשנו במודלים של KNN ויערות אקראיים וקיבלנו תוצאות ברמת דיוק של 87%, רמה המאששת את נכונות המודל. גם במודלים אלה נמצא כי הטמפרטורה היא המשתנה המשפיע ביותר על חריגות במדד זה. נוסף על כך, מצאנו כי עלייה של מעלת צלזיוס אחת מביאה לעלייה של 1.15 ש"ח לקוט"ש.

הממצאים לגבי גלי חום ואירועי קור קיצוני מחדדים את חשיבות היערכותה של ישראל לשינוי האקלים, גם בהיבטים של צריכת אנרגיה.

מבוא

צריכת החשמל בישראל מתמחרת בעזרת מדד (SMP) (System Marginal Price). מדד זה נגזר מהמחיר השולי החצי-שעתי של ייצור חשמל במשק החשמל, והוא אחד מאבני היסוד של התחרות במשק החשמל. המדד מאפשר קיום סחר בחשמל בין יצרנים וספקים באמצעות מנהל המערכת.

מנהל המערכת הכפוף לרשות החשמל מפרסם מדד זה בתדירות חצי-שעיתית כמקובל במדינות בעלות שוק חשמל מפותח.

חברת החשמל היא יצרנית החשמל הגדולה בישראל ומחלקת החשמל הדומיננטית במשק (מספקת אותו לכל מגזרי המשק בישראל ולרשות הפלסטינית)^[2]. החברה מחזיקה ומפעילה 16 תחנות כוח עם כושר ייצור מותקן כולל של 11.6 ג'יגה-ואט נכון לשנת 2020. בשנים האחרונות יצרני חשמל פרטיים תופסים בהדרגה נתח משמעותי יותר של משק החשמל כחלק מיישום הרפורמה במשק החשמל שמטרתה לחזק את התחרות בו. נכון לסוף שנת 2020 מופעלות 36 יחידות ייצור חשמל קונבנציונליות בבעלות פרטית עם כושר ייצור מותקן כולל של כ-5.4 ג'יגה-ואט. מלבד היחידות האלה קיימים ברחבי המדינה יצרני חשמל פרטיים נוספים המייצרים חשמל באמצעות מתקני אנרגיות מתחדשות. סך ההספק המותקן של אנרגיות מתחדשות בישראל בשנת 2020 עמד על כ-2.5 ג'יגה-ואט.

עלויות ייצור החשמל מורכבות מחמישה מקטעים: ייצור, ניהול המערכת, הולכה, חלוקה ושירותי צרכנות, ונכון לשנת 2019 הן מסתכמות ב-24,552 מיליון ש"ח^[1]. במטרה להתמודד עם עלויות ייצור גבוהות ולהימנע מייצור חשמל מזהם (מדלק מחצבים), נעשים מאמצים להרחיב את ייצור החשמל הסולארי, בעיקר בשעות הצהריים, כאשר קרינת השמש מְרִבֵּית. לעומת זאת, בשעות הערב שמתאפיינות בביקוש משקי גבוה לחשמל, עיקר ייצור החשמל הוא מדלק מחצבים, שאינו ידידותי לסביבה.

צריכת החשמל תלויה במספר גורמים, בהם מחיר החשמל, ובעיקר הטמפרטורה החיצונית. במחקר שהתבצע בהודו^[6] נמדד השינוי בביקוש לחשמל בעקבות שינויים קיצוניים במזג האוויר ברמת משקי הבית בניו דלהי ובאזורים נוספים בהודו. נמצא כי בטמפרטורה של מעל 30 מעלות חלה עלייה בין 11% ל-14% בצריכת החשמל בממוצע בהודו, ואף של 30% עד 43% בקרב משקי הבית בניו דלהי. גם מחקרים מדרום קוריאה^[8] ומאוסטרליה מראים על עלייה בצריכת החשמל בימים עם טמפרטורות גבוהות^[14].

מסקירה שהתמקדה בשינוי האקלים בארה"ב^[11] עולה כי שינוי האקלים – ובכלל זה: עליית הטמפרטורות הממוצעות ברוב

האזורים בארה"ב, שינויים בכמויות המשקעים ועלייה בשכיחותם של אירועי מזג אוויר קיצוניים – צפוי להשפיע באופן משמעותי על ייצור החשמל ועל השימוש באנרגיה. החוקרים גם הצביעו על קשר מובהק בין הטמפרטורה לצריכת החשמל, ומכאן שמגמות של עלייה בטמפרטורה צפויות להגדיל את ביקושי השיא לחשמל בקיץ. החוקרים טענו גם כי יעילות ייצור החשמל מדלקי מחצבים ומתחנות כוח גרעיניות תיפגע, כיוון שהמפעלים האלה משתמשים במים לקירור (ככל שהמים קרים יותר, כך הגנרטור יעיל יותר). לפיכך, טמפרטורות גבוהות יותר של אוויר ומים עלולות להפחית את יעילות המרת הדלק לחשמל.

שינוי האקלים עשוי להשפיע על ייצור וצריכה של האנרגיה גם בישראל. בסקירה בנושא היערכות משק החשמל בישראל למשבר האקלים ולהפחתת פליטות גזי חממה [4] נטען כי גם בישראל שינוי האקלים ואירועי קיצון מעלים את תדירות שיאי הביקוש לחשמל ואת גובהם. בעבר התאפיינו עונות המעבר בביקוש נמוך לחשמל, ולכן נוצלו לטיפול ולתחזוקה של מתקני ייצור החשמל, אך כיום עומסי החום מתקיימים גם בעונות המעבר, דבר הפוגע בטיפול התחזוקה, וכתוצאה מכך נפגעת אספקת החשמל. הסקירה מצביעה על החשיבות שיש לשיפור יכולות החיזוי ולשיפור כלי ניהול ביקושי החשמל בישראל במטרה לעמוד בביקושי השיא לחשמל בעומסי החום ובקור קיצוני.

מחקר זה בוחן כיצד גורמים שונים משפיעים על צריכת החשמל בישראל. במסגרת המחקר בנינו מודלים המתבססים על המשתנים הבאים: טמפרטורה, גלי חום, ימי חג יהודיים, ימי חול, שבתות וחגים, במטרה: (א) לחזות את ערכי ה-SMP שמייצג את צריכת החשמל בישראל, (ב) לחזות חריגות בערך ה-SMP.



תחנת הכוח אורות רבין. "בישראל שינוי האקלים ואירועי קיצון מעלים את תדירות שיאי הביקוש לחשמל ואת גובהם" | צילום: ר"ר אבישי טייכנר, פיקיוקי, CC BY 2.5

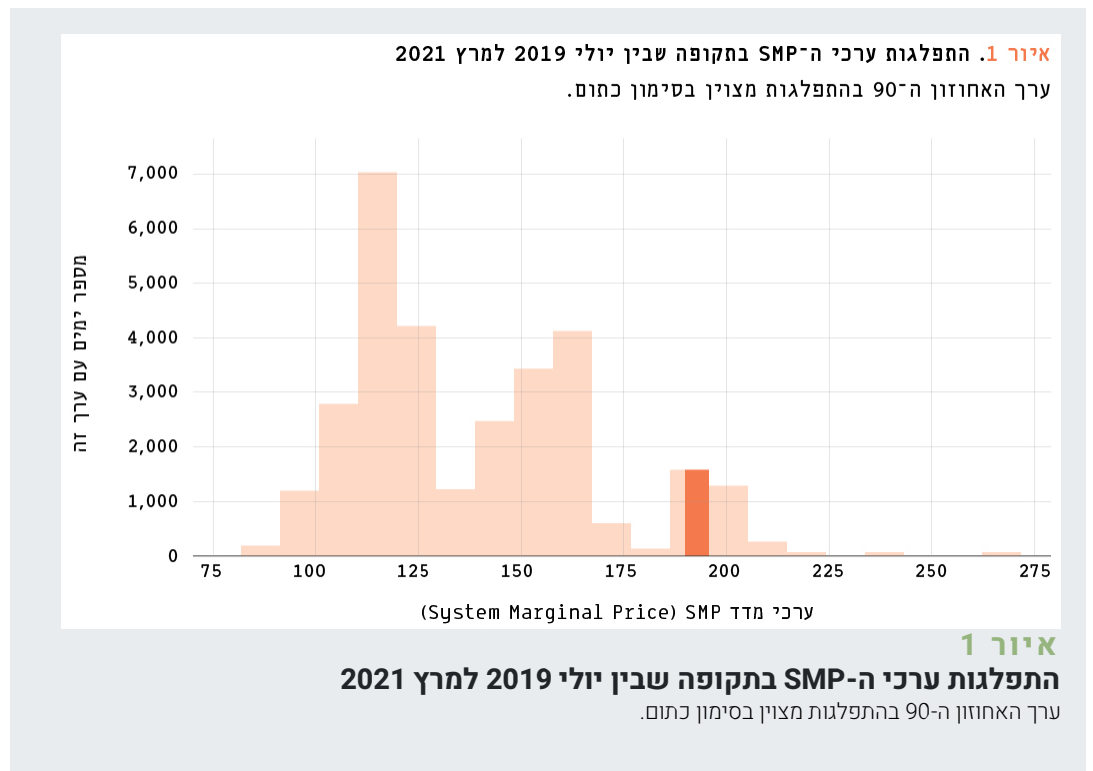
שיטות

איסוף נתונים

נתוני ה-SMP נלקחו מאתר חברת החשמל ומתייחסים לתקופה שבין יולי 2019 למרץ 2021 (התפלגות הנתונים מובאת באיור 1). הנתונים הוצלבו אל מול נתוני טמפרטורות ברזולוציה של 10 דקות שנאספו מהאתר של השירות המטאורולוגי. התמקדנו בנתוני טמפרטורה מתחנות מדידה בישראל הממוקמות בארבע המטרופולינים הגדולות, ש-75% מהאוכלוסייה בישראל מתגוררת בהן: תל-אביב, ירושלים, חיפה ובאר שבע [3]. התחנות שאספנו מהן את המידע היו: ירושלים – גבעת רם, ירושלים –

מרכז, תל-אביב – חוף, חיפה – אוניברסיטה, חיפה – טכניון, חיפה – בתי זיקוק ובאר שבע. יש לציין כי בשל הקרבה הגאוגרפית המשמעותית של רבות מהערים בישראל בתוך המטרופולינים, הטמפרטורות שנאספו בתחנה מעיר מסוימת מייצגות אוכלוסיות נוספות המתגוררות בערים הסמוכות, קל וחומר במקרים של גלי חום (לדוגמה: גל חום בתל-אביב פוקד גם את תושבי חולון ורמת גן). נתונים אלה שימשו לחישוב טמפרטורה ממוצעת יממתית ("ארצית"). נוסף על כך, ובהתאם לסקירת הספרות בתחום, נאספו המשתנים הבינאריים הבאים (כן/לא): (א) יום חג יהודי; (ב) ימי שבת לעומת ימי חול; (ג) ימים במסגרת החופש הגדול, דהיינו בחודשים יולי-אוגוסט; (ד) יום עם קור קיצוני (טמפרטורה ממוצעת יממתית של מתחת ל-10 מעלות); (ה) גל חום – מדד בינארי המציין כי במשך שלושה ימים ברצף הטמפרטורה הממוצעת לאורך היממה הייתה לפחות 30 מעלות. יצוין כי הגדרה של גל חום משתנה בהתאם לחבלי הארץ ולאחוזי הלחות [10].

נוסף על כך, הוגדר סף של 190 ש"ח לקוט"ש כערך לצריכה גבוהה במיוחד (חריגה) של SMP. ערך זה הוא האחוזון ה-90 בהתפלגות ערכי ה-SMP בנתונים (ראו איור 1). ולבסוף, הנתונים נורמלו בשיטת MIN-MAX.



מבחנים סטטיסטיים

כדי לבדוק אם קיים קשר בין גלי חום לערך SMP נעשה שימוש במבחני כי בריבוע (χ^2) לבחינת משתנים בינאריים (כן/לא גל חום מול כן/לא חריגה ב-SMP). עבור משתנים רציפים השתמשנו במבחני t מזווגים להשוואת ה-SMP בזמן גלי חום בהשוואה לאותם הימים בשבוע שקדם לכך, וכן במבחני t מזווגים להשוואת ה-SMP בימים של קור קיצוני בהשוואה לאותם הימים בשבוע שקדם לכך. כמו כן, השתמשנו במבחני t לא מזווגים להשוואת ה-SMP בימי חול לעומת ערך זה בשבתות. מבחני t נבחרו בשל הכמות הגדולה יחסית של המידע ולאור האופי הנורמלי של ההתפלגות. כל המבחנים בוצעו בפייתון.

מודלי למידת מכונה

כל המודלים (רגרסיה וסיווג) נבנו בפייתון תוך שימוש בספריית Scikit-Learn. גם הערכת המודלים נעשתה בפייתון תוך שימוש בספרייה זו.

זודל למידת מכונה – רגרסיה

במטרה לנבא את ערכי ה-SMP נעשה שימוש ברגרסיה לינארית רבת-משתנים, אלגוריתם מפוקח ורציף המנבא ערכים

מספריים רציפים (משתנה תלוי) על סמך צירוף לינארי של המשתנים הבלתי תלויים. במסגרת המחקר נבנו שלושה מודלים: מודל המבוסס על כל הנתונים, מודל המבוסס על חודשים חמים (אפריל-ספטמבר) בלבד, ומודל המבוסס על חודשים קרים (אוקטובר-מרץ) בלבד.



גל חום הוגדר במחקר זה כימים שהם חלק מרצף בן לפחות שלושה ימים שהטמפרטורה הממוצעת בהם היא 30 מעלות / צילום: הנס בירגר נילסן, [Wikimedia, CC BY-SA 2.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Desertification_in_Northern_Africa.jpg)

זודלי למידת מכונה – סיווג

במטרה לבדוק חריגות בצריכת ה-SMP (מעל ערך של 190 ש"ח לקוט"ש) נבנו מודלי הסיווג (classification) שלהלן. אלגוריתמים של סיווג הם אלגוריתמים מפוקחים ולא רציפים שמאפשרים סיווג ישויות למספר סופי של מחלקות, במקרה זה שתי מחלקות: SMP מעל סף של 190 ש"ח לקוט"ש ומתחתיו.

מכיוון שהנתונים אינם מאוזנים, והמחלקות אינן שוות בגודלן: 3,125 רשומות מעל לסף ו-27,588 מתחתיו, בוצע down sampling, דהיינו, יצירת תת-מחלקה אקראית מתוך המחלקה הגדולה, כך שתהיה באותו סדר הגודל של המחלקה הקטנה. בחלק מהמודלים בוצע גם over sampling (up sampling), דהיינו הכפלה של המחלקה הקטנה פי שלושה במטרה להגיע למחלקות באותם סדרי הגודל [13].

במטרה להעריך את ביצועי האלגוריתמים בוצע תיקוף חוצה (cross validation) – חלוקה אקראית וחזרת של הנתונים ל-70% סט אימון ו-30% סט מבחן. המודלים נלמדו בכל פעם על סמך סט אימון אחד ונבחנו על סט מבחן אחד. תוצאות המודלים הן הממוצעים של כל ההרצות (10 חזרות). נבנו שני מודלים של סיווג:

- **יערות אקראיים (random forests)** – אלגוריתמים אלה מבוססים על עצי החלטה שהם גרף כיווני המורכב מצומתי החלטה. בכל צומת נבחר תנאי על אחד מהפרמטרים, ועלי העץ מייצגים את המחלקות שהאלגוריתם חוזה. יערות אקראיים בנויים ממספר רב של עצי החלטה, שכל אחד מהם נבנה מדגימות אקראיות מתוך הנתונים המקוריים. החלטת האלגוריתם מתבססת על כלל החלטת הרוב [7]. במחקר בנינו יער אקראי המורכב מ-100 עצי החלטה שונים בעומק 4, תוך שימוש באנטרופיה כקריטריון לחלוקה. במטרה לנתח את תרומת משתנה הטמפרטורה למודל הורצו האלגוריתמים פעמיים: עם הטמפרטורה ובלעדיה.
- **KNN** (אלגוריתם K השכנים הקרובים ביותר) – אלגוריתם סיווג שמסווג דוגמה חדשה על פי K הדוגמאות

הקרובות לה ביותר (מבחינת הפרמטרים) [5]. האלגוריתם משתמש במדדי מרחק שונים כדי למצוא את K הדוגמאות הקרובות ביותר לדוגמה חדשה, ומסווג אותה לפי כלל החלטת הרוב (המחלקה השכיחה ביותר בקרב K הדוגמאות הקרובות ביותר). כדי לבחור את פרמטר ה-K (מספר השכנים) המיטבי בדקנו את שיעור טעויות האלגוריתמים בהרצות עם K שונים (אי-זוגיים) בטווח שבין 1 עד 25. מצאנו כי ביצועי האלגוריתם מיטביים כאשר $K=7$. במטרה לנתח את תרומת משתנה הטמפרטורה למודל הורצו האלגוריתמים פעמיים: עם פרמטר הטמפרטורה ובלעדיו.

הערכת מודלי סיווג

במטרה להעריך את ביצועי האלגוריתמים חישבנו מספר מדדי הערכה:

- דיוק (accuracy) – אחוז הניבויים הנכונים מתוך כלל הרשומות
- מדד (recall (sensitivity) – אחוז הניבויים הנכונים מתוך הרשומות ה"חיוביות" (דהיינו, צריכה מעל 190 ש"ח).
- מדד precision – אחוז הניבויים הנכונים מתוך ה"חיוביים"
- מדד F1 – מדד המשקלל את ה-recall וה-precision באופן הבא: $F1 = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall}$



קור קיצוני הוגדר במחקר זה כימים בהם הטמפרטורה הממוצעת היממתית היא מתחת ל-10 מעלות | צילום: דרור פייטלסון, פיקיוויקי, CC BY 2.5

תוצאות

שוואת צריכת החשמל בין ימי חול וסופי שבוע

השוואה בין צריכת החשמל בימי חול מול צריכת החשמל בסופי שבוע לא נמצא קשר מובהק סטטיסטית.

זקשר בין גלי חום לצריכת חשמל

בחנו את מספר הימים המוגדרים כגלי חום, דהיינו חלק מרצף בן לפחות שלושה ימים שהטמפרטורה הממוצעת בהם היא 30 מעלות. מתוך 640 ימים בבסיס הנתונים, נמצאו 11 גלי חום שכללו 69 ימים.

צריכת החשמל בגלי חום המגולמת במדד ה-SMP (ממוצע 152 ש"ח לקוט"ש, חציון 160 ש"ח לקוט"ש) הייתה גבוהה משמעותית מצריכת החשמל בימים שלא היו חלק מגל חום, בשבוע הקודם להם (ממוצע 130 ש"ח לקוט"ש, חציון 119 ש"ח לקוט"ש). התוצאות היו מובהקות סטטיסטית (מבחן t מזווג $p < 0.001$).

זקשר בין ימים עם קור קיצוני לצריכת חשמל

בחנו את מספר הימים ששרר בהם קור קיצוני (עם טמפרטורה ממוצעת יממתית של מתחת ל-10 מעלות). מתוך 640 ימים בבסיס הנתונים, נמצאו 25 ימים כאלה.

צריכת החשמל בימי קור קיצוני המגולמת במדד ה-SMP (ממוצע 148.7 ש"ח לקוט"ש, חציון 160 ש"ח לקוט"ש) הייתה גבוהה משמעותית מצריכת החשמל בימים שלא שרר בהם קור קיצוני שבוע קודם לכן (ממוצע 136.8 ש"ח לקוט"ש, חציון 143.3 ש"ח לקוט"ש). התוצאות היו מובהקות סטטיסטית (מבחן t מזווג $p < 0.001$).

מודלים לחיזוי ערכי SMP

במודל של רגרסיה לינארית רבת-משתנים נמצא כי המשתנה המשפיע ביותר על ערך SMP הוא הטמפרטורה. התוצאות האלה התקבלו בשלושת המודלים (כל השנה, חודשים חמים, חודשים קרים). בכל המודלים השורשים של ממוצע ריבועי ערכי הסטיות (RMSE) בין נתוני סט המבחן לנתוני סט האימון היו באותו סדר גודל, עובדה המצביעה על מהימנות ועקביות של המודלים. נוסף על כך, מצאנו כי ערכי ה-RMSE הממוצעים, שהיו 28.5, היו נמוכים משמעותית מסטיית התקן של מדדי ה-SMP, שעמדו על 30, עובדה המחזקת את מהימנות המודל.

מבחנית מקדמי הרגרסיה על הנתונים המנומרים, המייצגים את השפעתו היחסית כל משתנה על צריכת החשמל, נמצא כי הטמפרטורה היא המשתנה המשמעותי הגבוה ביותר – 37.99, המשתנה המשמעותי הבא אחריו הוא 'ימים קרים באופן קיצוני' (25.18) ולאחריו 'גל חום' (7.64), ערך החותך (intercept) הוא 119.1. המשתנים 'החופש הגדול' ו'ימי חג' היו בעלי השפעה פחותה על המודל (ערכים של 1.98, 3.28 בהתאמה) ואילו המשתנה בעל ההשפעה הנמוכה ביותר על צריכת החשמל היה 'סוף שבוע' (-0.61), העובדה כי המקדם שלילי מצביעה על כך שצריכת החשמל בימי חול גבוהה מזו שבסופי שבוע, אם כי לא באופן מובהק סטטיסטית. כמו כן, במטרה לכמת את השפעת הטמפרטורה על צריכת החשמל הורצה רגרסיה נוספת תוך שימוש במשתנים לא מנומרים, ונמצא כי מקדם הרגרסיה של הטמפרטורה הוא 1.15, דהיינו, עלייה במעלת צלזיוס אחת מביאה לעלייה ב-1.15 ש"ח לקוט"ש. מניתוח זה עולה כי קיים קשר מובהק סטטיסטי בין טמפרטורה וגלי חום לצריכת חשמל גבוהה.

מודלים לחיזוי חריגות בערכי ה-SMP

תוצאות המודלים KNN ויערות אקראיים מאששות שניתן לחזות חריגות בערכי ה-SMP על סמך הפרמטרים המוצגים בטבלה 1. כמו כן, שני המודלים בעלי רמת דיוק גבוהה של 87%.

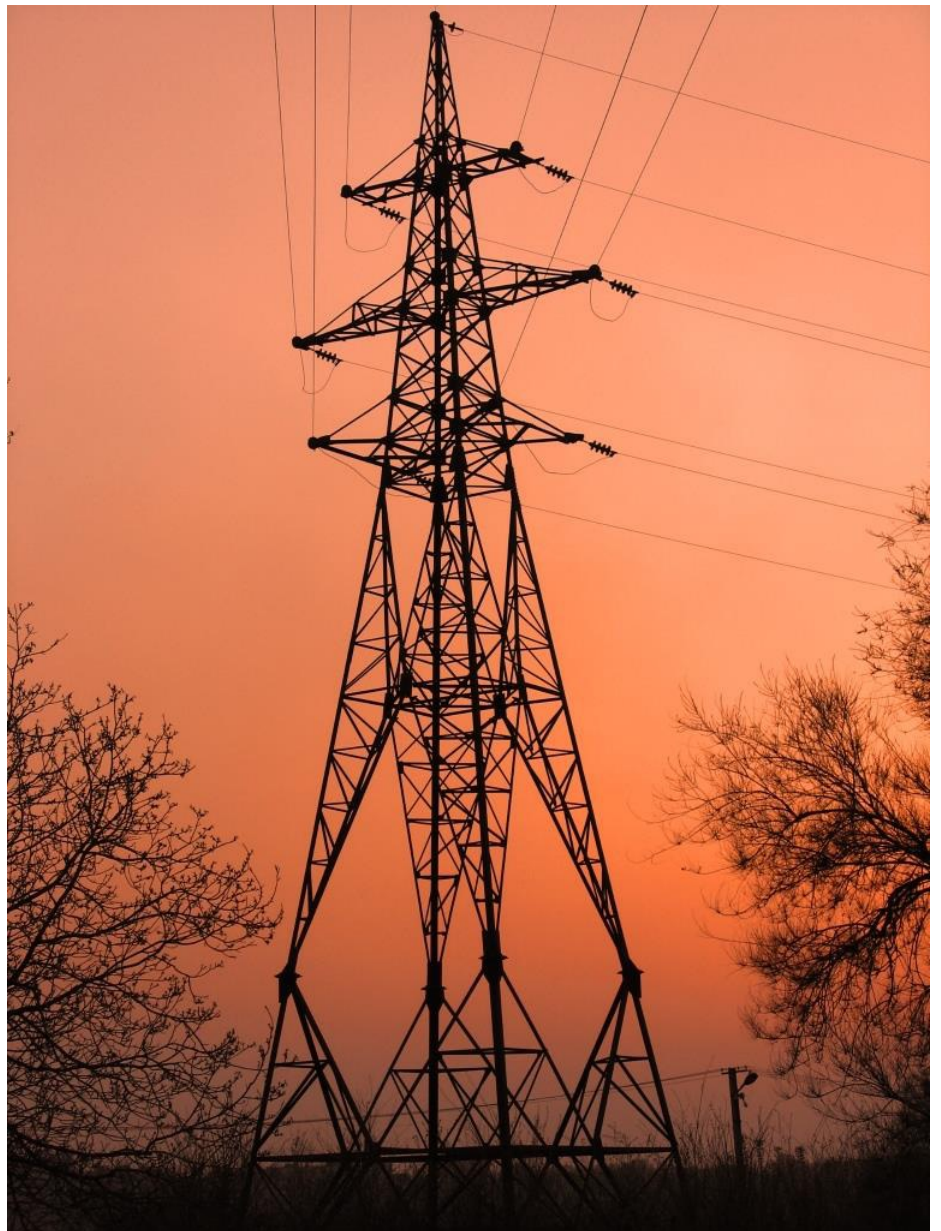
המשתנה בעל ההשפעה הגדולה ביותר במודל היה הטמפרטורה. כדי להדגים זאת הרצנו את המודלים בשני אופנים: עם פרמטר הטמפרטורה ובלעדיו. הסרת פרמטר הטמפרטורה פגמה בביצועי המודל: רמת הדיוק ירדה ב-23% לערך של כ-64%, וגם מדד ה-F1 ירד משמעותית.

טבלה 1. ביצועי מודלי סיווג לניבוי חריגות בערכי ה-SMP

מודלים ללא משתנה הטמפרטורה		מודלים עם משתנה הטמפרטורה		
יערות אקראיים	KNN	יערות אקראיים	KNN	
0.66	0.66	0.82	0.78	Precision
0.64	0.66	0.81	0.77	Recall
0.64	0.66	0.81	0.77	f1-score
0.64	0.67	0.87	0.869	Accuracy

טבלה 1

ביצועי מודלי סיווג לניבוי חריגות בערכי ה-SMP



'הסקירה מצביעה על החשיבות שיש לשיפור יכולות החיזוי ולשיפור כלי ניהול ביקושי החשמל בישראל במטרה לעמוד בביקושי השיא לחשמל בעומסי החום ובקור קיצוני'

דיון

במחקר זה חקרנו גורמים המשפיעים על צריכת החשמל בישראל והשוונו ביניהם. מצאנו כי ימים עם קור קיצוני וכן גלי חום הם גורמים משמעותיים המשפיעים על עלייה בצריכת החשמל בישראל. כמו כן, מצאנו שהשפעת הטמפרטורה על צריכת החשמל בישראל, משמעותית יותר מגורמים אחרים כגון ימי חג או חופשות.

מסקנות המחקר עשויות לסייע בהיערכות לביקושים העתידיים לחשמל. הערכות אלה נחוצות כדי לתכנן לטווח ארוך את יכולת הייצור הנדרשת כדי לענות על אותם ביקושים. ביקוש גבוה לחשמל ואי-יכולת עמידה בכוח הייצור מובילים להפסקות חשמל יזומות שעלולות לגרום נזקים כלכליים בסך של מאות מיליוני שקלים. תכנון נכון של משק החשמל בעזרת נתונים העוזרים לקבל החלטות, יאפשר עלייה בתועלת וצמצום הפסדים שונים.

לחוסר היכולת של המדינה לעמוד בעומסי ביקוש קיצוניים קיימות השלכות משמעותיות: עומסי חום קיצוניים ללא אמצעי קירור מתאימים בבתים עלולים להביא לפגיעות בריאותיות ואף למוות. על פי נתוני ארגון הבריאות העולמי [12], בין השנים 1998–2017 נפטרו למעלה מ-166,000 בני אדם עקב השפעת גלי חום קיצוניים, דומים לאלה שחוותה ישראל במאי 2021. פגיעה לאורך זמן באספקת החשמל למוסדות רפואיים התלויים במערכות קירור וחימום הנחוצות לצורך פעילותם השוטפת, עשויה גם היא להביא לפגיעות באנשים הנמצאים במצב בריאותי ירוד. יתרה מזאת, עומסי חום פוגעים בדרכים חלופיות לייצור חשמל [9]: לדוגמה, טמפרטורות גבוהות מורידות את תפוקתם ויעילותם של פאנלים סולאריים.

למחקר זה קיימות מספר מגבלות: (א) מספר הימים המוגדרים כגלי חום במהלך התקופה עמד על 69 ימים בלבד, מה שמקשה על ביצוע מבחנים סטטיסטיים. עם זאת, המבחנים הסטטיסטיים להשוואת צריכת החשמל בין ימים המוגדרים כגלי חום לאלה שלא מוגדרים כך היו חד-משמעיים ומובהקים סטטיסטית. (ב) המידע שהמחקר מתבסס עליו הוא מידע גלובלי של צריכת החשמל בכל ישראל שאינו מחולק למגזר התעשייה ולמגזר משקי הבית, והדבר מקשה על הסקת מסקנות ועשוי להביא להטיות. (ג) המחקר מתבסס על מדד ה-SMP ולא על הצריכה בפועל. בחרנו להתבסס על מדד זה כיוון שנתוני צריכת החשמל בישראל אינם גלויים לציבור, וזה הקירוב הטוב ביותר שמצאנו, כי הוא מצביע באופן אמין על צריכת החשמל. (ד) התקופה שנחקרה כללה גם את התפרצות מגפת הקורונה בישראל, שהביאה לשינויים מרחיקי לכת בעלי השפעה על צריכת חשמל במגזר העסקי (למשל סגירת מקומות עבודה) ובמשקי הבית (למשל בעת סגרים, עבודה מהבית, לימודים מהבית). עם זאת, מבדיקה שביצענו לא נמצאו הבדלים משמעותיים בצריכת החשמל בהשוואה בין התקופה שלפני המגפה לזו שלאחר פרוץ המגפה. למרות מגבלות אלה, נוכחנו לראות כי תוצאות המחקר היו מובהקות ומשמעותיות.

בישראל הביקוש לחשמל גבוה, הטמפרטורות גבוהות ובמגמת עלייה, ובמקביל ישנה עלייה בתדירות של אירועי מזג אוויר קיצוני (גלי חום וגלי קור). מכאן עולה שיש לצמצם את צריכת החשמל בכלל ואת התלות בטמפרטורה החיצונית בפרט, למשל על-ידי הקפדה על בנייה ירוקה ובידוד. כמו כן, יש צורך בפיתוח ובניצול של אנרגיות מתחדשות להפקת חשמל. צמצום הביקוש יסייע בהתמודדות עם שינוי האקלים ויכול להקטין את ההשקעה הנדרשת בייצור החשמל.

במסגרת מחקר זה בנינו מודלים לחיזוי SMP (המצביע על צריכת חשמל): בהתבסס על מספר מצומצם יחסית של משתנים (טמפרטורה וסוג היום) ניתן לקבל באמצעות המודל חיזוי אמין של ה-SMP. מקשוק המודל עם נתוני תחזית מזג אוויר (תוך דגש על גלי חום ועל ימים עם קור קיצוני) עשוי לסייע לרשות החשמל ולחברות המספקות חשמל במתן מידע על אודות תאריכים עתידיים שערכי ה-SMP צפויים להיות גבוהים (דהיינו צריכת חשמל מוגברת), כדי שיוכלו להיערך לכך באופן יעיל. ישנן תוכניות עתידיות לרפורמה במחיר החשמל, כך שישקף באופן חלקי את העלות האמיתית של ייצורו. תחזית מדויקת של מחיר החשמל תוכל בעתיד לסייע לצרכנים להפעיל שיקול דעת בעת השימוש במכשירי החשמל בביתם, לצמצם שימוש שלא לצורך ולצמצם עלויות. יתר על כן, עם התפתחות טכנולוגיות של אגירת חשמל והרחבת ייצור החשמל ממקורות מתחדשים, המודלים שבנינו יאפשרו ניהול יעיל יותר של משק החשמל ואף צמצום ייצור חשמל מזהם (מדלקי מחצבים) למען סביבה נקייה ובריאה יותר. יש צורך בהתגייסות כללית כדי ליצור פתרונות שונים לשמירת איכות הסביבה ולהבטחת עתיד האנושות. שינוי קטן יכול להוביל לשינוי גדול.

מקורות

1. בוטוש נ. 2019. [תיאור וניתוח מבנה תעריף החשמל לשנת 2019](#). מרכז המחקר והמידע, המחלקה

לפיתוח תקציבי.

2. בן שטרית י, בדל ד וגלס ע. [משק האנרגיה בישראל 2020](#). משרד האנרגיה.
3. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2014. [מטרופולינים בישראל – הגדרה מחודשת בעקבות מפקד האוכלוסין 2008](#).
4. נורית ג. 2019. [היערכות משק החשמל בישראל למשבר האקלים ולהפחתת פליטות גזי חממה](#). אקולוגיה וסביבה **10**(4): 67–62.
5. Fix E and Hodges JL. 1989. [Discriminatory analysis, nonparametric estimation: Consistency properties](#). *Statistical Review / Revue Internationale de Statistique* **57**(3): 238–247.
6. Harish S, Singh N, and Tongia R. 2020. Impact of temperature on electricity demand: Evidence from Delhi and Indian states. *Energy Policy* **140**(8): 111445.
7. Ho TK. 1995. Random decision forests. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition; 14–16 August 1995; Montreal (Canada).
8. Kim Y, Choi Y, and Min SK 2022. Future changes in heat wave characteristics and their impacts on the electricity demand in South Korea. *Weather and Climate Extremes* **37**: 100485.
9. Masterson V. 2022. [Why don't solar panels work as well in heatwaves?](#) World Economic Forum. 9.8.2022.
10. Puvvula J, Abadi AM, Conlon KC, et al. 2022. [Evaluating the sensitivity of heat wave definitions among North Carolina physiographic regions](#). *International Journal of Environmental Research and Public Health* **19**(16): 10108.
11. Reidmiller DR, Avery CW, Easterlink KE, et al (Eds). 2018. Fourth National climate assessment, Volume II: [Impacts, risks, and adaptation in the United States: Report-in-Brief](#). Washington (DC): U.S. Global Change Research Program.
12. World Health Organization. [Heatwaves](#).
13. Zelaya V, Missier P, and Prangle D. 2019. [Parametrised data sampling for fairness optimisation](#). In Proceedings of Explainable AI for Fairness, Accountability & Transparency Workshop (KDD XAI). ACM: New York (NY).
14. Zuo J, Pullen S, Palmer J, et al. 2015. Impacts of heat waves and corresponding measures: A review. *Journal of Cleaner Production* **92**: 1–12.

קריאה נוספת

סקירה של השפעות שינוי האקלים על משק החשמל בישראל, תוך התייחסות לגלי חום ואירועי קור קיצוני.

נורית ג. 2019. [היערכות משק החשמל בישראל למשבר האקלים ולהפחתת פליטות גזי חממה](#). אקולוגיה וסביבה 10(4): 62-67.

סקירה מפורטת של משרד האנרגיה, המתייחסת בין השאר לתמהיל מקורות האנרגיה בישראל ולדפוסי צריכת החשמל במגזר הפרטי והעסקי בישראל.

בן שטרית י, בדל ד וגלס ע. [משק האנרגיה בישראל 2020](#). משרד האנרגיה.