

תחזית השינוי הצפוי בטמפרטורת האוויר בארבע ערים בישראל עד שנת 2060

חופית יצחק בן שלום^{1,2*}, רנה סמואלס ז"ל²,
עודד פוצ'טר² ופנחס אלפרט²

¹ SCE – המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון

² בית הספר לסביבה ולמדעי כדור הארץ ע"ש פורטר, אוניברסיטת תל-אביב

Hofitben@gmail.com*



תקציר

האוכלוסייה העירונית חשופה לשינויים בתחושת הנוחות הנובעים משני גורמים עיקריים: ברמת המָקָרו – ההתחממות העולמית, וברמת המיקרו – ההתחממות העירונית. המחקר המוצג בחן והעריך את השינוי באקלים בארבע ערים ישראליות הממוקמות באזורי אקלים שונים: גוש דן כמייצג את תל-אביב (אקלים ים תיכוני), ירושלים (אקלים ים תיכוני הררי), באר שבע (אקלים צחיח למחצה) ואילת (אקלים צחיח). עבור כל תחנה עירונית נבחרה גם תחנה כפרית מקבילה, המייצגת את האופי האקלימי השורר באותו האזור. כמו כן, נערכה השוואה גם לנתוני מודל אקלימי (RegCM) לצורך חישוב התחזית של טמפרטורות האוויר הצפויה עד שנת 2060 בשלושה תרחישים: העיר שומרת על גודל אוכלוסייתה, אוכלוסיית העיר ממשיכה לגדול בקצב אחיד ואוכלוסיית העיר גדלה במהירות. נמצא כי השינוי המשמעותי ביותר בטמפרטורת האוויר מתרחש בשעות שהטמפרטורה היא הגבוהה ביותר, ולכן מחקר זה התמקד בשינוי ובתחזית של טמפרטורת האוויר לשנת 2060. התוצאות מראות שההשפעה העירונית באה לידי ביטוי רב יותר בערים המתאפיינות באקלים יבש, בהשוואה לרצף הערים הים תיכוניות בגוש דן. לתוצאות מחקר זה השלכות יישומיות על תהליכי תכנון, בנייה ועיור. מן המחקר עולה כי יש צורך בבנייה עירונית מודעת אקלים ובפיתוח אסטרטגיות למיתון תהליכי התחממות עירוניים.

מילות מפתח: אי חום עירוני · גידול אוכלוסייה · חיזוי אקלים · נוחות אקלימית · עירוניות · שינוי אקלים

מבוא

כ-55% מאוכלוסיית העולם מתגוררת בערים^[20], ובישראל שיעור האוכלוסייה העירונית כבר הגיע ל-92%^[1]. מצב זה של ריכוז אוכלוסיית העולם בערים מחריף בעולם כולו, ובפרט במדינות מתפתחות. האוכלוסייה העירונית חשופה להשפעותיהם של שינויי אקלים אזוריים ועולמיים. כמו כן, השילוב של התחממות עולמית ומקומית מורגש לעיתים קרובות במהלך חודשי הקיץ^[4,5,14]. הסביבה העירונית הבנויה יוצרת תנאי אקלים שונים מאלה השוררים בסביבה הכפרית הפתוחה המקיפה אותה. השפעת העיור על מגמת ערכי הטמפרטורה מכונה בשם "אי חום עירוני". תופעה זו מושפעת בעיקר מגורמים פיזיים המאפיינים אזור אקלים נתון, מגורמים אנתרופו-גאוגרפיים הנגזרים מהיקף הפעילות העירונית ומאופייה, וכן מחומרי הבנייה ומגאומטריית הרחוב^[12,13]. מחקרים שונים הראו כי האקלים העירוני מתאפיין לרוב בירידה בלחות, בהיחלשות עוצמת הרוח, בעלייה בטמפרטורה ובעלייה בריכוזי האירוסולים והמזהמים^[6,7]. משטחים עירוניים ירוקים גדולים ואופי חומרי הבנייה ומוליכות החום שלהם תורמים את חלקם להתפתחות או להיחלשות אי החום העירוני^[5,15]. תופעת אי החום העירוני בולטת בייחוד בחודשים היבשים בחורף, בעת שמזג האוויר יציב, בעיקר בשעות הלילה ולפני עלות השחר. כמו כן, אי החום העירוני משמעותי יותר בקווי רוחב גבוהים בהשוואה לקווי רוחב בינוניים ונמוכים^[13].

מרכזי הערים הם האזורים הרגישים ביותר לאי-נוחות אקלימית. השילוב של תופעת אי החום העירוני ואיכות האוויר הירודה משפיע

על מרכזים עירוניים וגורם לעלייה בטמפרטורה ולעקה אקלימית, בייחוד בעונת הקיץ^[13].

מחקרים שונים בישראל הראו מגמה דומה של התחממות העיר. מחקר שניתח נתונים מתחנות מטאורולוגיות בכל רחבי ישראל מצא תנודות גדולות בטמפרטורות העונתיות בקיץ^[9,10]. ניתוח התפלגויות טמפרטורות המקסימום היומיות בישראל מצביע על נטייה מובהקת להגברה בשכיחות ערכי הקיצון. במילים אחרות, ביום הקיץ חם יותר והחורף קר יותר^[3]. מחקר נוסף הציג כי בעתיד צפויה בישראל ירידה משמעותית בכמות המשקעים^[2]. מחקר נוסף שנעשה בבאר שבע מצא כי ההתחממות העירונית מגבירה



בטמפרטורות חמות חוסר נוחות תרמית מתבטא בהזעה.

לבין הנתונים מהתחנה העירונית מייצגים את "האפקט העירוני" לכל עיר (ראו משוואה **בנספח 2** באתר כתב העת). לאחר מכן חושבה טמפרטורת האוויר החזויה עד לשנת 2060 בכל אחת מהערים לפי מודל האקלים RegCM ועל פי שלושה תרחישים:
 א. העיר שומרת על גודל אוכלוסייתה;
 ב. אוכלוסיית העיר ממשיכה לגדול בקצב אחיד;
 ג. אוכלוסיית העיר גדלה במהירות (פי 1.7 עד 2060^[1]).

תוצאות

"האפקט העירוני"

התוצאות מראות כי בשעות הצהריים החמות השיפוע הגבוה ביותר נמצא בערים שהאקלים בהן יבש יותר. הראשונה היא אילת ($r^2=0.626$) (אקלים צחיח) ואחריה באר שבע ($r^2=0.6896$) (אקלים צחיח למחצה). כמו כן, ניתן לראות ב**איור 1**, שדווקא בגוש דן התוצאות היו זהות ואף הנמוכות ביותר בשעת המינימום והמקסימום. חשוב לזכור כי התוצאות מושפעות ממיקום התחנה וממגבלותיה (ראו פירוט המגבלות ב**נספח 2**) ולכן לא ערכנו חישוב לשנת 2060. כלומר, לאזור גוש דן לא נערכה תחזית לשינוי הטמפרטורה כיוון שטווח השנים שנבדק מהתחנה המטאורולוגית היחידה שנמצאה באזור "עירוני" היה קצר מדי. בירושלים נמצא כי השינוי עבור 100,000 תושבים הוא הגבוה ביותר, והתוצאה נובעת כנראה מהצמיחה ומהגידול העירוני הנרחב שחל בעיר (**איור 1**).

טמפרטורת האוויר: עבר, הווה, עתיד

בפרק זה יוצגו התוצאות לכל אחת משלוש הערים, ירושלים, באר שבע ואילת, לחודש יולי עד שנת 2060 על פי שלושת התרחישים, בשעות הטמפרטורה המרבית (**איור 2 וטבלה 1**).

חישוב טמפרטורת האוויר הצפויה וחזויה נעשו בעזרת הגידול העירוני ומגמות הטמפרטורה. ציר γ ב**איור 2** מראה את טמפרטורות האוויר לתקופת הזמן 1980–2014 (משמאל לקו האנכי השחור) וכן עבור 2015–2060 (מימין לקו האנכי השחור). הנתונים בכותרת של כל איור מציינים את סיווג האקלים של קפן (Köppen), ראו גם **נספח 1**) ואת גודל האוכלוסייה בשנת 2014.

בירושלים נמצא כי בשעת הטמפרטורה המרבית עלתה טמפרטורת האוויר ב-1.3 מעלות צלזיוס במהלך 35 השנים שנבדקו 1980–2014, ובהנחה שגודל האוכלוסייה יישאר זהה, טמפרטורת האוויר צפויה לעלות בעוד כ-1.1 מעלות. אולם אם האוכלוסייה תגדל, טמפרטורת האוויר צפויה לעלות בכ-2.9 עד 4.1 מעלות.

בדומה למחקרים קודמים^[16,15] גם במחקר זה נמצא כי בשעות שהטמפרטורה היא הנמוכה ביותר או הגבוהה ביותר, העלייה בטמפרטורה בעיר באר שבע הגיעה לכ-3 מעלות עד שנת 2014. בהנחה שגודל האוכלוסייה יישאר זהה, טמפרטורת האוויר צפויה

על קצה המזלג

* שינוי האקלים נחשב בעיני רבים לבעיה הראשונה במעלה הניצבת כיום בפני האנושות. מודלים הראו כי ישראל עלולה להיות חשופה לשינויים גדולים במיוחד באזור המדברי היבש. * חשוב לשכלל את יכולת החיזוי כדי לסייע באמידת עוצמת התופעה, בייחוד בערים, היות שמרבית אוכלוסיית המדינה מתגוררת בהן. * חיזוי שינויים עתידיים הוא כלי חיוני להבנת התרחישים העתידיים ולתכנון בהתאם. זהו נושא קריטי מבחינת ההיערכות הנדרשת מהמדינה להבטחת שלומות (wellbeing) האוכלוסייה בעתיד ואף שרידותה.

המערכת

את העוצמה והתדירות של האי-נוחות האקלימית שבני האדם חשים, בייחוד בשעות הצהריים בתקופת הקיץ^[15].

ייחודה של ישראל, הנובע ממגוון אזורי האקלים השונים המשתרעים על פני שטח קטן יחסית, מגדיל ומבליט את חשיבותו של מחקר זה. כמו כן, תוצאות המחקרים שנזכרו לעיל מצביעות על החשיבות הרבה שיש לחקר האקלים העתידי במרחב העירוני בישראל, נושא שטרם נחקר.

שיטת המחקר

במחקר זה אספנו נתונים משתי תחנות מטאורולוגיות (עירונית וכפרית) בכל אזור אקלים במשך שלושים שנה. מטרת המחקר היא להעריך את שינוי האקלים הישראלי בארבע ערים ישראליות באזורי אקלים שונים: גוש דן כמייצג את תל-אביב (אקלים ים תיכוני), ירושלים (אקלים ים תיכוני הררי), באר שבע (אקלים צחיח למחצה) ואילת (אקלים צחיח) (ראו **נספח 1**).

כדי לקבוע את התחזית לעתיד בארבע הערים בדקנו את ההבדלים בקצב השינוי של נתוני טמפרטורת האוויר (לכל תחנה עירונית הותאמה תחנה כפרית המייצגת את אופי האקלים השורר באותו אזור, שסיפקה נתונים מקבילים מבחינת הזמנים, טווח השנים ושעת המדידה) עד לשנת 2010, מול נתוני מודל RegCM (Reginal Climate Model)^[17,11]. ההפרשים בין נתוני התחנה הכפרית



אם אוכלוסיית אילת תגדל בקצב מהיר, הטמפרטורה בשעות הצהריים החמות עלולה לעלות בכמעט 4 מעלות עד שנת 2060 | צילום: xiquinhosilva, Flickr, CC BY 2.0

התמקדות בארבעה אזורים עירוניים שונים בארץ. כדי להשוות את הגידול העירוני ולבחון את הממצאים שהתקבלו מהתחנה הכפרית, נאסף מידע על השינוי בכמות האוכלוסייה העירונית. הבנת המתרחש במהלך השנים מאפשרת ללמוד על השינוי הדמוגרפי בעיר, על שינוי האקלים בה ועל השפעתו על רמת החיים והאוכלוסייה בערים השונות ובאזורי האקלים השונים. החישוב של חיזוי האקלים במחקר נעשה על סמך כמות האוכלוסייה העירונית ולא על פי סוג האקלים או הטופוגרפיה והשפעתם על האקלים. לפיכך, ובהתבסס על סגנון בנייה זהה, סברנו כי שינוי טמפרטורה משמעותי יותר ייראה בשתי הערים הגדולות, תל-אביב וירושלים, בהשוואה לערים באר שבע ואילת. כלומר, במחקר זה נבדק גם הסיווג על פי אזורים המכונה Local Climate Zone (LCZ) [19]. סיווג זה נעשה על פי חלוקת המבנה העירוני, צפיפות, גובה המבנים והצמחייה העירונית. מאז שנות ה-50 של המאה הקודמת גדלו אוכלוסיית ישראל והשטח הבנוי שלה במהירות [1], ולכן העלייה בטמפרטורה העירונית צפויה. תוצאות המחקר תומכות בצפייה זו למגמות של התחממות עירונית בכל ארבע הערים. השינוי בולט יותר בערים המאופיינות באקלים יבש יותר. הנתונים מצביעים על השפעתה המקומית של העלייה בטמפרטורת האוויר ועל חשיבות התכנון של תהליכים עתידיים. בעוד מחקר זה יכול לשמש "הערכה ראשונית" של השינויים

לעלות בכ-0.5 מעלות במהלך 2015–2060, ובמקרה שאוכלוסיית העיר תמשיך לגדול בקצב אחיד או בקצב מהיר, טמפרטורת האוויר עתידה לעלות בכ-1.2 עד 1.7 מעלות.

בשעות הצהריים החמות נמצאה עלייה גבוהה וחזקה באילת של 1.3 מעלות בכ-35 השנים שנבדקו. בהנחה שגודל האוכלוסייה יישאר זהה, טמפרטורת האוויר צפויה לעלות בכ-1.1 מעלות עד שנת 2060. במקרה שאוכלוסיית העיר תמשיך לגדול בקצב אחיד או בקצב מהיר, טמפרטורת האוויר עתידה לעלות בכ-2.8 עד 3.9 מעלות במהלך 2015–2060. ממצאים אלה תואמים ממצאים ממחקר קודם [18].

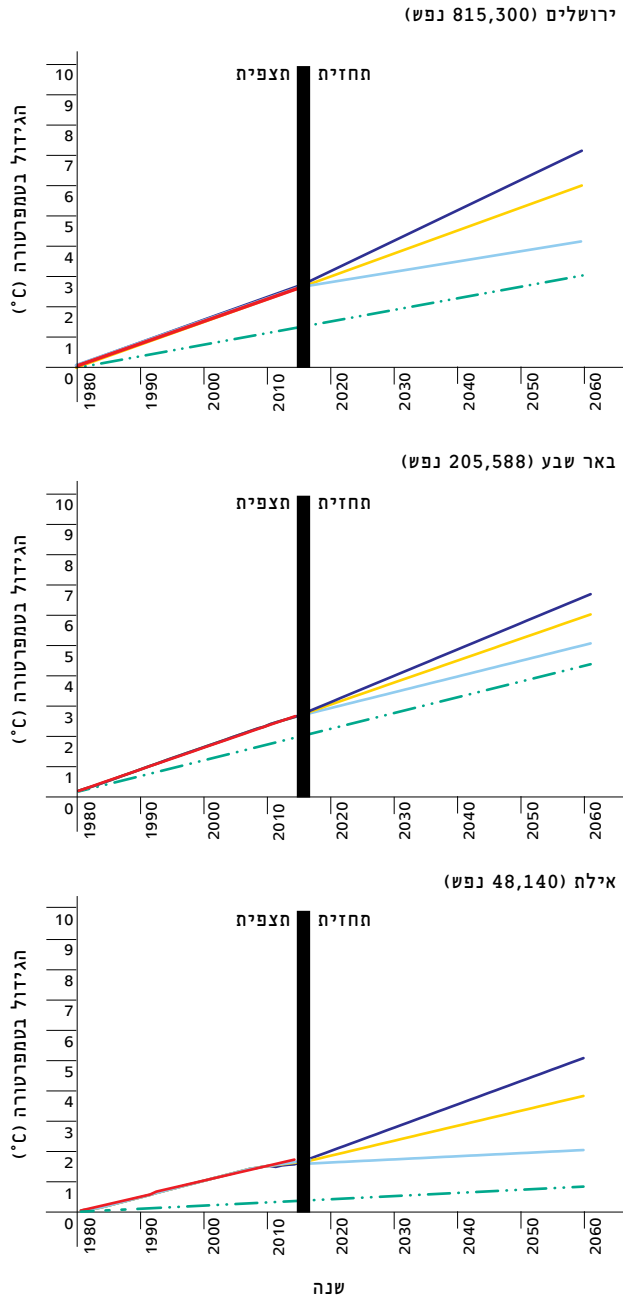
יש לציין שהעלייה הגבוהה ביותר בטמפרטורות העירוניות ΔT_{u-r} (בשעות המינימום והמקסימום) במהלך השנים 1980–2014 נמצאה באזור הצחיח. ממצא זה חוזר על התחזיות לעתיד בשלושת התרחישים, כלומר, למרות ההבדל בגודל האוכלוסייה, נמצא כי שינוי טמפרטורות העבר באילת (48,140 נפש) דומה למגמות שנמצאו בירושלים (815,300 נפש ב-2012).

דיון ומסקנות

אחת השאלות המעניינות יותר הנוגעות לשינוי האקלים באזורים עירוניים היא אם מקורו במגמות עולמיות או בתופעות עירוניות. במחקר זה ניסינו להבין את השילוב בין שתי המגמות באמצעות

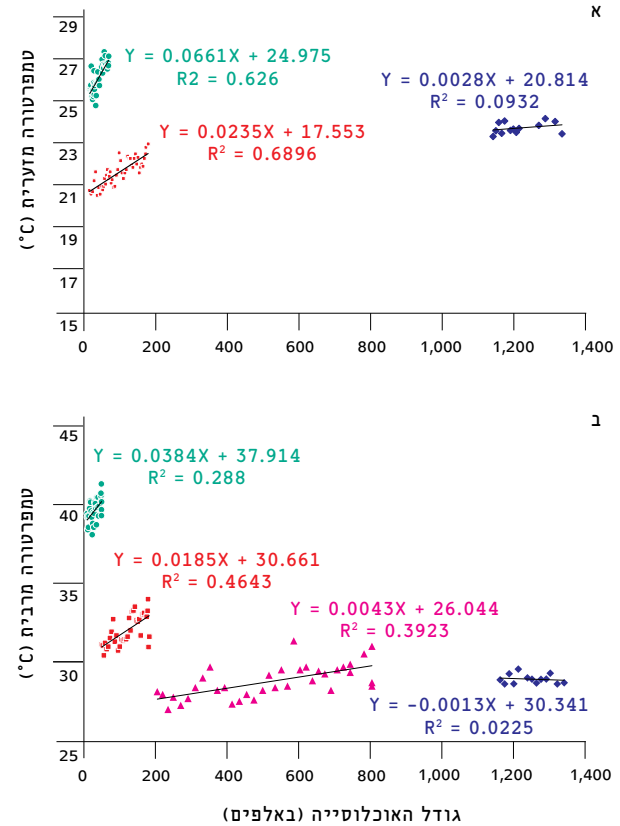


איור 2. חחזית שינוי הטמפרטורה לחודש יולי עד שנת 2060, על פי שלושת התרחישים, לכל אחד מאזורי האקלים בשלוש הערים, בשעה שהטמפרטורה היא הגבוהה ביותר (15:00). הקו האנכי השחור מפריד בין המגמות שנצפו בעבר ובין המגמות הצפויות לעתיד.



— נחונים שנצפו בעיר — גידול אוכלוסין קבוע
 - - - נחונים שנצפו באזור כפרי — גידול אוכלוסין מהיר (בשיעור של 1.7)
 — ללא גידול אוכלוסין

איור 1. שינוי טמפרטורת האוויר בארבע הערים בשעה שהטמפרטורה היא הנמוכה ביותר (א) והגבוהה ביותר (ב), על פי גודל האוכלוסייה בשנים 1964-2014, למעט גוש דן, המיוצג על-ידי חחנת חולון בשנים 1998-2011. בירושלים נתוני השעה הקרה ביממה אינם זמינים, ולכן אינם מוצגים ב-1א.



● אילת ■ באר שבע ▲ ירושלים ◆ תל-אביב

טבלה 1. תוצאות שינוי טמפרטורת האוויר, לחודש יולי עד שנת 2014 ועל פי שלושה תרחישים עד שנת 2060, לשעה שהטמפרטורה היא הגבוהה ביותר (15:00)

תוצאות שלושת התרחישים עד לשנת 2060 (C°)			הנצפה משנת 1980 עד לשנת 2014 (C°)	השינוי
גידול אוכלוסייה מהיר (פי 1.7) ⁽¹⁾	אוכלוסיית העיר ממשיכה לגדול בקצב אחד	העיר שומרת על גודל אוכלוסייתה		
4.1	2.9	1.1	1.3	ירושלים
1.7	1.2	0.5	0.5	באר שבע
3.9	2.8	1.1	1.3	אילת



חוף הים (בצילום, בתל-אביב) כמפלט זמני מ"אי החום העירוני" השורר בסביבה העירונית הבנויה | צילום: xiquinhosilva, Flickr, CC BY 2.0

תודות

מחקר זה מומן באמצעות המשרד להגנת הסביבה 102-5-1; Smaller-Winnikow Scholarship Fund in cooperation with the Jewish National Fund; and by the Gordon Center for Energy Studies.

מקורות

ראו **נספח 3** באתר כתב העת.

המלצות לקריאה נוספת

מאמר המפרט את שלבי המחקר והשיטות (מאמר זה מתבסס עליו). Itzhak-Ben-Shalom H, Samuels R, Potchter O, and Alpert P. 2016. Recent trends and future predictions until 2060 of urban warming in four Israeli cities employing the RegCM climate model. *American Journal of Climate Change* 5(04): 464-484.

מאמר המציג את אופן איסוף הנתונים מתחנה מטאורולוגית, ניתוחם והצגתם, וכן מספק בסיס טוב להבנת ניתוח הנתונים ושינוי האקלים המקומי בעקבות השינוי העירוני.

Potchter O, and Itzhak-Ben-Shalom H. 2013. Urban warming and global warming: Combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel. *Journal of Arid Environments* 98: 113-122.

המקומיים הצפויים, ישנו צורך במחקר נוסף שיסביר טוב יותר את משמעות השינוי כאשר מדובר במרחב עירוני שהולך וגדל. במחקר העתידי כדאי להתייחס לאזורי אקלים נוספים, לערים בגדלים שונים, לגידול דמוגרפי אחר ועוד.

סיכום

בכל הערים ובשטחים הפתוחים שנבדקו סביבן, נצפתה מגמה של התחממות בשנים האחרונות, ולקראת שנת 2060 מגמת העלייה בטמפרטורה צפויה להתגבר משמעותית.

השפעת העיור על עליית ערכי הטמפרטורה היא משמעותית, וגדולה מהעלייה בטמפרטורה שנמצאה בשטחים הפתוחים. ככל שאוכלוסיית העיר גדלה, כך גדל קצב ההתחממות.

מצאנו כי עליית ערכי הטמפרטורה בשעה 15:00 גדולה משמעותית מזו שמתרחשת בשעות הבוקר.

נמצא כי ההשפעה של גידול האוכלוסייה על העלייה בטמפרטורות גבוהה יותר בערים הממוקמות באזורי אקלים יבש יותר, בהשוואה לערים הממוקמות באזורי האקלים הים תיכוני.

לתוצאות המחקר השלכות יישומיות על תהליכי תכנון, בנייה ועיור, והן מדגישות את הצורך בבנייה עירונית מודעת אקלים ובפיתוח אסטרטגיות למיתון תהליכי התחממות עירוניים.