

אביתר אראל

המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב
בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון
בנגב

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

אראל א. 2016. האם עלינו להיות
מודאגים מאי החום העירוני?
אקולוגיה וסביבה 7(3).



התמונות עם אי החום העירוני – סיוד הבתים באיי יוון מפחית את עומס החום בדירות, אך יוצר בוקק ומגדיל את עומס החום על הולכי הרגל בסמטאות | צילום:
CC BY-NC פליקר, Uli and Liz Baecker

האם עלינו להיות מודאגים מאי החום העירוני?

13 באוקטובר, 2016

גיליון סתיו 2016 / כרך 7(3) / קיימות עירונית

[סקירות](#)

על קצה המזלג

- החשש מהשפעות תופעת אי החום העירוני גובר בשל תהליכים עולמיים של התגברות העיור והתחממות כדור הארץ.
- לצורך אפחות (מיתון) אי החום העירוני ננקטת לרוב מדיניות שמתמקדת בהורדת טמפרטורת האוויר בערים.
- אף על פי שהורדת טמפרטורת האוויר בערים היא תוצאה רצויה, מיקוד המדיניות במטרה זו עלול להביא לשימוש באמצעים לא יעילים ואף לתוצאות שליליות.
- יש לתת עדיפות לבחירת אמצעים שישפרו את הנוחות התרמית או יפחיתו בצריכת האנרגיה, גם אם הדברים יבואו על חשבון הורדת טמפרטורת האוויר.
- מומלץ להשתמש במדדים מורכבים (כגון מדד לעומס תרמי וצריכת אנרגיה סגולית לאקלום בניינים) לבחינת השפעת חלופות מדיניות לא רק על הורדת טמפרטורת האוויר, אלא גם על חיסכון בצריכת אנרגיה בבניינים ועל הפחתת עומס החום על הולכי רגל ברחוב.

המערכת

תקציר

החשש מההשפעה המשולבת של התחממות כדור הארץ ושל אי החום העירוני הוביל למחקרים לא מעטים, שסייעו בניסוח מסמכי מדיניות והמלצות ל-"אפחות" (מיתון) אי החום העירוני (urban heat island mitigation) מטעמים של גופים רבים ומגוונים, כמו האיחוד האירופי או הרשות להגנת הסביבה של ממשלת ארה"ב. ההצדקה ליישום אמצעי מדיניות כאלה היא ההנחה כי הפחתת הטמפרטורות בעיר תביא לחיסכון באנרגיה הדרושה לאקלים בניינים (חימום ומיזוג אוויר), לנוחות תרמית להולכי רגל במרחב העירוני, להפחתת התמותה במהלך אירועי חום חריגים ולהורדת רמות האוזון באוויר העיר.

אין עוררין על כך שקיים מתאם גבוה בין העלייה בטמפרטורות האוויר ומספר תופעות שליליות. עם זאת, ממצאי מחקרים שבחנו היבטים שונים של המיקרו-אקלים בעיר מראים כי מדיניות שמתמקדת בהורדת טמפרטורת האוויר – אף כי אין ספק שהיא רצויה בפני עצמה – עלולה להביא ליישום אמצעים שהם במקרה הטוב לא יעילים, ובמקרה הגרוע אף יביאו לתוצאות לא רצויות. מאידך גיסא, ניתן בהחלט להגדיר אמצעים שיביאו לשיפור בנוחות התרמית או להפחתה בצריכת האנרגיה, גם ללא הורדה משמעותית בטמפרטורת האוויר. לשם כך יש להבין את ההשפעות המשולבות של ממדי הרחוב, צפיפות הבנייה, חומרי הריצוף וצמחייה מסוגים שונים על המיקרו-אקלים בעיר, בהתחשב באקלים הישראלי המגוון ובשילוב עם המאמצים לתכנן ערים בצורה רגישה למים.

הקדמה

הבנייה בעיר גורמת לשינויים בתנאים המטאורולוגיים השוררים בה, כגון הפחתת מהירות הרוח הממוצעת. הראשון שהבחין כי טמפרטורת האוויר בעיר גבוהה לעתים מהטמפרטורה במרחב הכפרי הוא כנראה המילונאי האמריקאי המפורסם וובסטר [7]. בתגובה לטענה שנשמעה מפי תומס ג'פרסון על שינוי האקלים שהתרחש כביכול בארה"ב, דיווח וובסטר כבר ב-1799 כי ההסבר לתופעה שתיאר מי שהיה עתיד להתמנות לנשיא ארה"ב, הוא כי הטמפרטורות במרכז העיר ניו יורק גבוהות מהטמפרטורות בסביבתה, בעיקר בלילה. עם זאת, המטאורולוג האנגלי Howard Luke היה הראשון שתיעד את ההבדלים בין התנאים בעיר לכפר לאורך תקופה ארוכה, וספרו על אקלים העיר לונדון [17] שהתפרסם בשנת 1820 נחשב אבן הפינה של המחקר על אקלים העיר.

ההבדלים בטמפרטורה בין העיר לכפר ניכרים בשלושה מדדים [12]: ראשית, **טמפרטורת פני השטח** (surface temperature), כפי שנצפית בצילומים תרמיים מלוויינים, גבוהה יותר בבניינים או ברחובות אספלט מאשר באזורים מכוסים צמחייה. טמפרטורת האוויר **בשכבת הגבול העירונית** (urban boundary layer), שהיא החלק התחתון של האטמוספירה (מפני הקרקע ועד לגובה של 200–1,000 מטר בערך, בהתאם ליציבות האטמוספירה וגובה הבניינים) המושפע משינויים בתכונות פני הקרקע, אף היא גבוהה יותר בדרך כלל מעל העיר. טמפרטורת האוויר **בחופת העיר** (urban canopy layer), שהיא החלק התחתון של שכבת הגבול האטמוספירית (עד לגובה גגות הבניינים בערך), עשויה אף היא להיות גבוהה יותר מאשר במרחב הלא-בנוי. סקירה זו תתמקד בממד השלישי, שהוא בעל השפעה ממשית ישירה על חיינו.



גישות שונות להתמודדות עם אי החום העירוני - התרומה העיקרית של עצים לנוחות התרמית של הולכי הרגל ברחוב מתבטאת במתן צל, ואילו סיוד הבתים באיי יוון מפחית את עומס החום בדירות, אך יוצר בוהק ומגדיל את עומס החום על הולכי הרגל בסמטאות. השימוש בצמחייה מוצלח יותר, אף אם ציורי פחות. שדרות ח'ן בתל-אביב לעומת רחוב בסנטורייני | באדיבות

ויקימדיה CC (חינוך), Uli and Liz Baecker, פליקר CC BY-NC 2.0

במחקרים רבים נבחנו במהלך השנים הגורמים להיווצרות אי החום העירוני. בין היתר נטען כי העיר חמה מסביבתה מהסיבות הבאות: בליעה מוגברת של קרינת השמש במהלך החזרות מרובות בין קירות הבניינים; רמה גבוהה יותר של קרינה תת-אדומה מחופת השמים עקב זיהום האוויר; פליטת חום הקשורה לפעילות בני האדם; הפחתה באידוי-דיות עקב מיעוט הצמחייה; הפרעה לפיזור החום באטמוספירה עקב הפחתת מהירות הרוח. אולם Oke, החשוב שבחוקרים בתחום, מצא שהגורמים העיקריים לאי החום הם הפחתה בפליטת החום בקרינה בגלים ארוכים, ואגירת חום מוגברת בקירות הבניינים במשטחים המרוצפים והסלולים [25,24]. מידת השפעתם של שני הגורמים האלה תלויה בגאומטריה של רחובות העיר, המתוארים כקניונים (urban street canyons) [22]: ככל שהרחובות צרים ועמוקים יותר – כך צפויה לעלות העוצמה המרבית של אי החום העירוני (urban heat island).

חשוב מאוד להדגיש כי אי החום העירוני, שאת עוצמתו מקובל לסמן בהפרש הטמפרטורות בין העיר למרחב הכפרי (ΔT_{ur}), אינו אחיד – לא בזמן ולא במרחב. עוצמתו של אי החום מרבית בשעות הערב, ומגיעה לשיא שעות אחדות אחרי השקיעה. לעתים קרובות עשוי הפרש הטמפרטורות בין העיר וסביבתה להגיע בשעות האלה לחמש מעלות צלזיוס או יותר, ובערים שונות נמדדו אף הפרשי שיא העולים על עשר מעלות [23]. עם זאת, בשעות היום קורה לא פעם כי הטמפרטורה בעיר אף נמוכה מעט ביחס לסביבתה [13]. אי החום מורגש בייחוד בלילות בהירים ללא רוח, משום שהסיבה העיקרית להיווצרותו הוא התקררות קרינתית מהירה יותר של השטחים הפתוחים, בעוד שקצב פליטת החום מהקניון העירוני אטי יותר.



שתינו יחד תחת שמש... שינוי במשטר הגשמים ועלייה בעומסי החום מחייבים היערכות עירונית משופרת / צילום: Lynn Greyling, PublicDomainPictures PD

שפעות שליליות אפשריות של אי החום העירוני

בשנים האחרונות ישנו עניין ציבורי ומדעי גובר בהשלכות האפשריות של שינוי אקלים כדור הארץ. הנושא קיבל דחיפה משמעותית בעקבות גל החום באירופה בקיץ של שנת 2003, שהביא למותם של עשרות אלפי אנשים [20]. העלייה בתמותה

נרשמה אמנם בעיקר בקרב אוכלוסייה מבוגרת ששהתה מרבית הזמן בביתה, אולם יוחסה בין היתר לעובדה שהטמפרטורות הגבוהות בלילה, שהוחמרו עקב אי החום העירוני, מנעו את האפשרות לצנן דירות ללא מיזוג אוויר, בייחוד בקומה העליונה. עלייה בתמותה, שיוחסה לגלי חום, נרשמה גם בערים אחרות בעולם בשנים האחרונות, כגון ניו יורק [19], וגם בישראל נמצא כי העלייה בטמפרטורה מביאה לעלייה בתמותה [27]. עם זאת, ראוי להדגיש כי אין סף מוחלט שמביא לעלייה בתמותה כאשר הטמפרטורה עולה מעליו. העלייה בתמותה קשורה לשינוי **היחסי** מהטמפרטורה האופיינית במקום, ושיעור התמותה הנמוך ביותר נרשם כאשר הטמפרטורה היומית הממוצעת שווה לאחוזון ה-75 במהלך השנתי, בקירוב [15].

מחקרים לא מעטים טוענים כי אי החום העירוני מביא לעלייה ניכרת בצריכת האנרגיה למיזוג אוויר. למשל, באחד המחקרים נטען כי העלייה בטמפרטורת האוויר בערי ארה"ב מאז 1940 בשיעור של 0.5–3.0 מעלות אחראית לגידול של 5–15% בצריכת החשמל [3]. אי החום העירוני עלול לא רק להביא לגידול בצריכת האנרגיה הכוללת, אלא גם להביא לעלייה בביקושי השיא הנמדדים בקיץ בשעות אחה"צ או הערב [16].

העלייה בטמפרטורה גורמת גם להאצה של תהליכים כימיים באטמוספירה, ובעיקר להיווצרות אוזון בתגובה בין חומרים אורגניים נדיפים (VOC – volatile organic compounds) ותחמוצות של חנקן (NO_x) שמקורן בזיהום אוויר [18]. האוזון שנמצא בחלק העליון של האטמוספירה, תורם תרומה חיונית בכך שהוא מסנן את מרבית הקרינה העל-סגולה שמקורה בשמש, אולם כאשר הוא מצוי בריכוזים גבוהים באוויר העיר, הוא עלול לגרום לעלייה במחלות בדרכי הנשימה.

לבסוף, בהנחה שאין שינוי בכל הגורמים האחרים המשפיעים על הנוחות התרמית, ברור שבמים חמים כל עלייה בטמפרטורת האוויר מגבירה את עומס החום שהולכי הרגל חשים בו.

גסטרגיות אפשריות למיתון אי החום העירוני

ההשפעות השליליות של העלייה בטמפרטורה הביאו את הרשות להגנת הסביבה של ארה"ב לנסח המלצות למיתון ההשפעה של אי החום העירוני [14]. ההמלצות הללו כוללות מספר דרכי פעולה עיקריות:

גגות 'קרירים' (cool roofs): גגות קרירים נחלקים לשני סוגים. גגות בעלי אלבדו גבוה (0.6–0.8), ששומרים על טמפרטורה נמוכה של פני השטח על-ידי החזרת עיקר קרינת שמש, היו מקובלים באדריכלות המסורתית בארצות הים התיכון שהדגישה את סידור הגג בקיץ. כיום הם נשענים גם על צביעה בחומרים שאינם בהכרח לבנים, אך בעלי החזרה סלקטיבית של מרבית קרינת השמש בגלים בתחום התת-אדום הקרוב (0.5–3 מיקרון) [21]. גגות מכוסים צמחייה, המכונים גגות ירוקים, שומרים על טמפרטורה נמוכה בעזרת אידוי-דיות, אף על פי שהם בולעים כ-80 אחוז מקרינת השמש. בתנאים השוררים בישראל, תרומתם לצינון הדיירה קטנה מכדי להצדיק (בפני עצמה) את כמות המים הנדרשת לאחזקתם [31]. התרומה של שני סוגי הגגות להפחתת אי החום העירוני תלויה כמובן בכך שהם ישמשו בקנה מידה רחב מאוד, בכל רחבי העיר. אף על פי שטמפרטורת השטח על פני הגגות האלה נמוכה, התרומה המקומית שלהם להפחתת טמפרטורת האוויר קטנה מאוד, וכמעט אינה מורגשת בגובה פני הרחוב [5], בייחוד כאשר מדובר בבניינים רבי-קומות.

ריצוף 'קריר' (cool paving): בדומה לגגות קרירים, גם ריצוף קריר אפשר לקבל על-ידי התקנת מרצפות בהירות או על-ידי שילוב צמחייה, כדוגמת 'אריח דשא'. שלא כמו גגות קרירים, לריצוף קריר עשויה להיות השפעה רבה יותר על המיקרו-אקלים ברחוב, בייחוד כאשר הרחוב חשוף לשמש. הטמפרטורה של חומרי ריצוף בהירים עשויה להיות נמוכה בעשרים מעלות או יותר בהשוואה לטמפרטורה של אספלט החשוף לקרינת שמש ישירה, ומשום כך, שימוש בהם עשוי להפחית גם את טמפרטורת האוויר [20].

צמחייה: ההשפעה של צמחייה על טמפרטורת האוויר בעיר נחקרה אולי יותר מכל אמצעי אחר לאפחית (mitigation) אי החום העירוני, ואף על פי כן, מהממצאים עולה שונות רבה מאוד. הסיבות לכך מגוונות: מדידת טמפרטורת האוויר מושפעת מחשיפה לקרינת השמש, ומרבית הסוככים שנעשה בהם שימוש אינם מונעים אותה לגמרי [10]; סוגי הצמחייה שונים, ולכן ישנם פאראקים עירוניים שהטמפרטורה בהם נמוכה ביום, בעוד שאחרים קרירים יותר דווקא בלילה [36]; כיוון הרוח משפיע על מפל הטמפרטורות ככל שמתרחקים מהאזור הירוק: השפעת הצמחייה מורגשת במורד הרוח, אך במעלה הרוח אינה מורגשת כלל [38]. בסקר מקיף של מחקרי שדה רבים הגיעו החוקרים למסקנה שלא ניתן לקבוע מה ההשפעה של תוספת צמחייה במקום מסוים על הטמפרטורה במרחב העירוני כולו, ובפרט – שלא ניתן להפריד בין השפעת הצמחייה לגורמים אחרים המשפיעים על הטמפרטורה [6]. גם מחקרים שנערכו בארץ הגיעו לממצאים שונים: בחלק מהם נמצא כי ההשפעה על טמפרטורת האוויר מתונה [29, 30]. ובאחרים – כי צמחייה, ועצים בפרט, עשויים להביא להורדה משמעותית של טמפרטורת האוויר בקרבתם [28, 32].

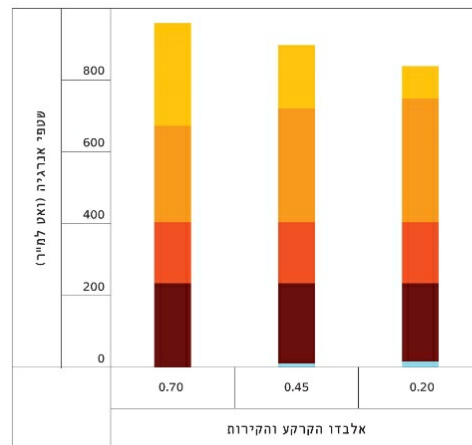


תאים פוטו-וולטאים משמשים להפקת חשמל באוניברסיטה של מדינת אריזונה (ASU), ומצלים על אחת הרחבות המרכזיות בקמפוס. תרומתם כפולה – גם אם אינם משפיעים על אי החום העירוני כהוא זה | צילום: אביתר אראל

זאם טמפרטורת האוויר כל כך חשובה?

מדיניות שמטרתה אִפְחָת אי החום העירוני (urban heat island mitigation), כפי שבאה לידי ביטוי במסמך של הרשות האמריקאית להגנת הסביבה ^[14], מניחה למעשה שהורדת הטמפרטורה תביא להשגת יעדים מהותיים יותר, כגון הפחתת צריכת האנרגיה או הפחתת העומס התרמי על הולכי רגל ברחוב. בהתאם לכך, הצלחתם של האמצעים המומלצים נמדדת ביכולתם להוריד את טמפרטורת האוויר. מספר מחקרים שהתקיימו בארץ ובעולם מטילים ספק בהנחה זו.

השימוש בחומרי ריצוף בהירים, באופן עצמאי או בשילוב עם חומרי גמר בהירים בקירות הבניינים, אכן עשוי להוריד את טמפרטורת האוויר. הריצוף הבהיר בולע פחות קרינה, ולכן מתחמם פחות ומחמם פחות את האוויר שבא איתו במגע. לכאורה, הולך הרגל אמור לחוש הפחתה בעומס החום. אולם עומס החום שהולך הרגל חשוף אליו, תלוי לא רק בטמפרטורת האוויר, אלא במאזן האנרגיה הכולל, המושפע גם ממאזן הקרינה (בגלים קצרים וארוכים) וממהירות הרוח והלחות באוויר, שמשפיעים על יעילות נידוף הזיעה ^[26]. ריצוף קריר מביא לא רק לירידת טמפרטורת האוויר, אלא גם פולט פחות קרינה בגלים ארוכים – אך קרינת השמש המוחזרת ממנו ישירות מגדילה מאוד את העומס התרמי על הולך הרגל. באיור 1, שנעשה בעזרת מודלים ממוחשבים של טמפרטורת האוויר ומשטחי הריצוף ^[11], אפשר לראות כי שכרנו יוצא בהפסדנו. לא רק שהריצוף הבהיר אינו מפחית את העומס התרמי, אלא שהוא מביא דווקא לעלייה קטנה – למרות ההורדה בטמפרטורת האוויר, שמסתברת כמתונה מאוד. מחקרים מראים גם ששימוש בריצוף בהיר מאוד עלול לגרום לעלייה בצריכת האנרגיה של בניינים במצבים מסוימים: ישנה החזרה מוגברת של קרינת השמש מהריצוף, שמביאה לעלייה בטמפרטורת הקירות, וכן להגדלת שטף הקרינה על החלונות ^[39].



איור 1. השפעת האלבדו של הריצוף על שטפי האנרגיה המחוברים על גופו של אדם עומד במרכז כיכר עירונית גדולה החישוב נעשה בעזרת מודל ITS עבור יום קיץ באילת, עם טמפרטורת אוויר (בתחנת הייחוס) של 38.7 מעלות, וקרנת שמש של 990 ואט למ"ר. אלבדו גבוה מביא לידידה בטמפרטורת הריצוף, ולכן להקטנת רכיב הקרינה ארוכת הגל (חת-אדומה) הנפלטת ממנו, אבל להגדלת קרינת השמש המוחזרת, ובסך הכול להגדלה מתונה של העומס התרמי הכולל שהאדם חשוף אליו. כאשר טמפרטורת האוויר גבוהה מטמפרטורת העור (ערכי אלבדו 0.20 ו-0.45 במתאר שנבדק), יש רווח חום קטן גם בהסעה (convection). לפי Erell ואחרים [11].



איור 1

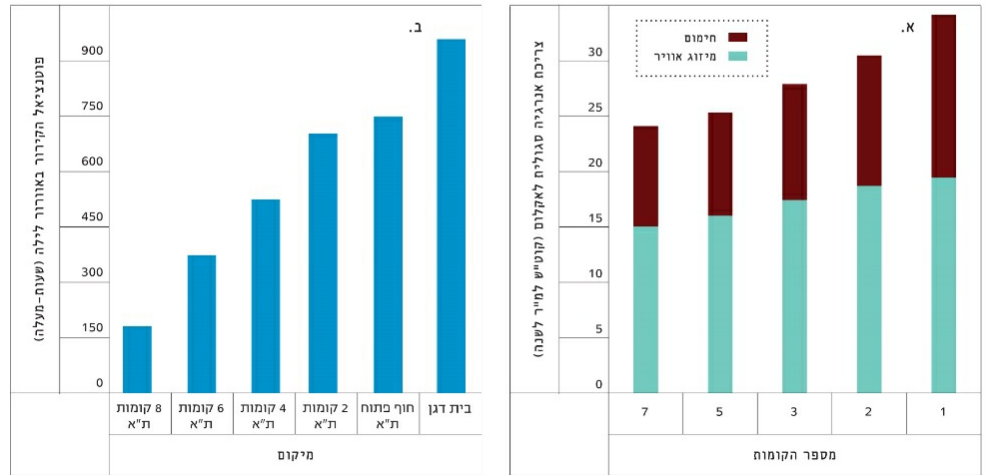
השפעת האלבדו של הריצוף על שטפי האנרגיה המחוברים על גופו של אדם עומד במרכז כיכר עירונית גדולה

החישוב נעשה בעזרת מודל ITS עבור יום קיץ באילת, עם טמפרטורת אוויר (בתחנת הייחוס) של 38.7 מעלות, וקרנת שמש של 990 ואט למ"ר. אלבדו גבוה מביא לידידה בטמפרטורת הריצוף, ולכן להקטנת רכיב הקרינה ארוכת הגל (חת-אדומה) הנפלטת ממנו, אבל להגדלת קרינת השמש המוחזרת, ובסך הכול להגדלה מתונה של העומס התרמי הכולל שהאדם חשוף אליו. כאשר טמפרטורת האוויר גבוהה מטמפרטורת העור (ערכי אלבדו 0.20 ו-0.45 במתאר שנבדק), יש רווח חום קטן גם בהסעה (convection). לפי Erell ואחרים [11].

אין ספק כי הגדלת מנת הממדים של הקניון העירוני (היחס בין גובה הבניינים לרוחב הרחוב – H/W) מביאה לעלייה בעוצמת אי החום העירוני בלילה. ניתן היה, אפוא, לצפות כי תוספת קומות לבניינים קיימים, כפי שנעשה במסגרת תמ"א 38, תביא לגידול בדרישה למיזוג אוויר בקיץ, ובמקביל להקטנת הדרישה לחימום בחורף. הדמיית מחשב הבוחנת מספר תרחישים, בהם הגדלת גובה הבניינים עד לשמונה קומות, מראה כי עוצמת אי החום העירוני בלילה אכן צפויה לגדול במידה משמעותית [9]. עם זאת, כפי שמראה **איור 2**, צריכת האנרגיה הסגולית לאקלום בניין מגורים טיפוסי (האנרגיה הנדרשת לחימום ולמיזוג אוויר, ונמדדת בקוט"ש למ"ר רצפה לשנה) כמעט ולא תשתנה, ולמעשה אף תפחת מעט: העלייה בצריכת האנרגיה בקיץ תקוזז חלקית עם הירידה בצריכה בחורף, וההצללה ההדדית בין הבניינים תפחית את עומס החום עליהם ביום. ההבדל העיקרי בין התרחישים טמון בהקטנת החלק היחסי של הדירות בקומה העליונה בצריכת האנרגיה הכוללת של הבניין. דירות אלה קשה יותר לחמם בחורף ולמזג בקיץ מאשר דירות בקומות הביניים. עם זאת, חשוב להדגיש כי ההדמיות מניחות שבדירות מופעל מיזוג אוויר בלילות הקיץ, כפי שנוהגים רבים מתושבי תל-אביב בפועל – אך לא כולם. אם ייבנו עוד קומות כתוספת לבניינים קיימים, כנראה שבאמת לא יהיה מנוס ממיזוג אוויר בלילה, משום שעם התגברות אי החום העירוני ייעלם כמעט לגמרי הפוטנציאל לקירור טבעי באוויר (איור 2ב).

איור 2. הדמיה של השפעת תוספת קומות לבניינים ברחוב בתל-אביב, שכיוונו צפון-דרום

א. על צריכת האנרגיה השנתית לאקלים בניין מגורים אופייני. החישוב נעשה בעזרת תוכנת ENERGYui עם נתוני אקלים מתוקנים המבטאים את השפעת אי החום העירוני לפי מספר הקומות; ב. על הפוטנציאל לקירור באמצעות אוורור לילה בחודש יולי, לפי הנוסחה של Artmann^[37]. החישוב לפי נתוני התחנה המטאורולוגית בבית דגן משמש לייחוס, וגם ממחיש את ההבדל בין אזור השפלה לרצועת החוף.



איור 2

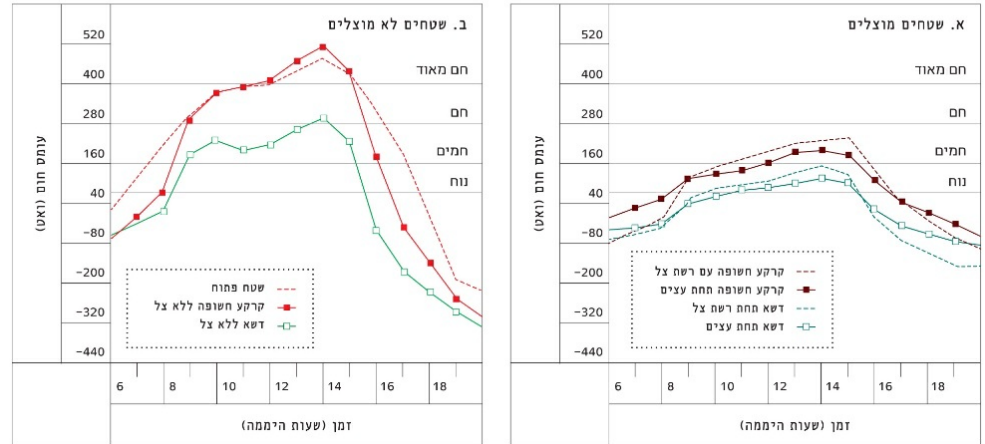
הדמיה של השפעת תוספת קומות לבניינים ברחוב בתל-אביב, שכיוונו צפון-דרום

א. על צריכת האנרגיה השנתית לאקלים בניין מגורים אופייני. החישוב נעשה בעזרת תוכנת ENERGYui עם נתוני אקלים מתוקנים המבטאים את השפעת אי החום העירוני לפי מספר הקומות; ב. על הפוטנציאל לקירור באמצעות אוורור לילה בחודש יולי, לפי הנוסחה של Artmann^[37]. החישוב לפי נתוני התחנה המטאורולוגית בבית דגן משמש לייחוס, וגם ממחיש את ההבדל בין אזור השפלה לרצועת החוף.

אין כמעט חילוקי דעות על תרומתה של הצמחייה להקלת עומס החום על הולכי רגל בימים חמים. אולם רבים מהמחקרים מתמקדים בתרומתה של הצמחייה להורדת טמפרטורת האוויר, בעוד שתרומתה העיקרית לנוחות התרמית היא דווקא בשינוי מאזן הקרינה. במחקר שבוצע בשדה בוקר נמדדו התנאים המטאורולוגיים בשתי חצרות קטנות שהיו זהות בממדיהן ובמאפייני הבניינים סביבן, אך נבדלו בצמחייה שנשתלה בהן. בסך הכול נבחנו שישה תרחישים שבדקו שילובים שונים של שני פרמטרים: הצללה (באמצעות רשת צל, עצים או ללא צל) וכיסוי הקרקע (דשא או אדמה חשופה ומרצפות בטון). המדידות הראו כי נוכחות עצים אכן מביאה לירידה בטמפרטורת האוויר בשעות הצהריים החמות^[33]. לעומת זאת, בדיקה של תרומתם להקלת העומס התרמי (איור 3) הראתה שהתרומה גדולה רק מעט מהתרומה של רשת צל, שלא הביאה לירידת טמפרטורת האוויר כלל. ההקלה בעומס החום נובעת כמעט כולה מההגנה מקרינת השמש הקופחת. נוכחות הדשא לא הביאה לשינוי משמעותי בטמפרטורת האוויר בגובה של 1 מטר מעל הקרקע – ואף על פי כן תרמה תרומה של ממש לנוחות התרמית, משום שהדשא הקריר פלט פחות קרינה תת-אדומה מאשר הקרקע החמה^[34].

איור 3. עומס חום מחושב (לפי מדד ITS) ביום קיץ בתנאים שונים במהלך הניסוי בשדה בוקר

מימין: חצר עם הצללה, עם דשא ובלעדיו; משמאל: עבור שטח פתוח וחצר ללא הצללה, עם דשא ובלעדיו. התנאים המטאורולוגיים בכל המצבים היו כמעט זהים, והשפעת הצמחייה על טמפרטורת האוויר היתה קטנה מאוד. ההבדל בעומס התרמי ובתחושת הנוחות נובע בעיקר מרמת החשיפה לקרינת שמש ולקרינה בגלים ארוכים הנפלטת מהקרקע. לפי Shashua-Bar ואחרים [34].



איור 3

עומס חום מחושב (לפי מדד ITS) ביום קיץ בתנאים שונים במהלך הניסוי בשדה בוקר

מימין: חצר עם הצללה, עם דשא ובלעדיו; משמאל: עבור שטח פתוח וחצר ללא הצללה, עם דשא ובלעדיו. התנאים המטאורולוגיים בכל המצבים היו כמעט זהים, והשפעת הצמחייה על טמפרטורת האוויר היתה קטנה מאוד. ההבדל בעומס התרמי ובתחושת הנוחות נובע בעיקר מרמת החשיפה לקרינת שמש ולקרינה בגלים ארוכים הנפלטת מהקרקע. לפי Shashua-Bar ואחרים [34].

בארצות מרובות משקעים, קיום צמחייה עירונית עשירה אינו מצריך השקיה. יתרה מכך, בערים רבות מערכת הניקוז אינה ערוכה להתמודד כראוי עם מי הנגר העילי המצטברים במהלך אירועי גשם, והוספת אזורי צמחייה נעשית כדי לעכב את הזרימות ולמתן את ספיקות השיא. רשויות עירוניות בארצות שונות מאמצות תכנון עירוני רגיש למים (תר"מ), או בשמו הלוועזי Water Sensitive Urban Design (WSUD), כדי לחסוך במים ולהפיק מהם תועלת, וכך יוצאות נשכרות בשני התחומים [8]. גם בישראל ניתן לאמץ את עקרונות התר"מ [2,1] – אולם יש להתאימם למהלך המשקעים האופייני – עונה גשומה קצרה יחסית עם אירועי גשם אינטנסיביים ולאחריה עונה יבשה חמה וארוכה. הניסוי בשדה בוקר [33] מצא כי החלופה היעילה ביותר במבחן השיפור בנוחות התרמית ביחס לכמות ההשקיה הדרושה לקיום הצמחייה, הייתה נטיעת עצי צל. משטחי דשא לא מוצלים, אף כי הביאו לשיפור בנוחות התרמית, היו בזבזני מים גדולים. ניתן לנצל צמחיית כיסוי חוסכת מים בהשוואה לדשא, המבוססת על צמחים בשרניים, ועדיין ליהנות משיפור משמעותי בנוחות התרמית [35].

סיכום ומסקנות

אי החום העירוני הוא אחד הביטויים הבולטים להשפעתו של האדם על תנאי האקלים. ברבים מהמחקרים מתייחסים אליו כתופעה שלילית שרצוי למתן אותה. ואכן, בארץ ברוכת שמש עם אקלים חם כמו ישראל, יש להתמודד עם השלכות התופעה. אולם התמודדות יעילה אפשרית רק אם נגדיר כראוי את היעדים המעשיים לפעולותינו. פעולות אלה צריכות בוודאי לעודד חיסכון באנרגיה בבניינים והפחתת עומס החום על הולכי רגל ברחוב. קביעת יעד של הורדת טמפרטורת האוויר עשויה לסייע בהשגת המטרות האלה, אך עלולה גם להביא ליישום צעדים לא מתאימים או לכך שנפרש בצורה לא נכונה השלכות של מדיניות בתחומים אחרים, כמו ציפוף הבנייה במרחב העירוני כדי להפחית את התרחבות הערים לשטחים פתוחים. לכן, עדיף להיעזר במדדים מורכבים יותר, כגון המדד לעומס תרמי (Index of Thermal Stress) או צריכת אנרגיה סגולית לאקלים הבניינים (Energy Use Intensity), ולבחון כל חלופה בהתאם להשפעתה על הגורמים האלה.

שלא כמו אמצעים המנסים להתמודד עם שינוי אקלים כדור הארץ, מהלכים לא־פֶּחֶת את השפעת אקלים העיר עשויים לזכות להצלחה בקנה מידה מקומי בטווח קצר גם ללא שיתוף פעולה כלל-עולמי. מאידך, גיסא, היעדר פעולה מתאימה, החל ברמת בעל הבית הפרטי וכלה ברשות העירונית, עלול להביא לכך שסביבת המגורים תסבול מתנאים סביבתיים נחותים.

מקורות

1. משרד הבינוי והשיכון, משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמשרד לאיכות הסביבה. 2004. מדריך לתכנון ובנייה משמרת נגר עילי.
2. שמיר א וכרמון נ. 2007. תר"ם – תכנון רגיש למים: שילוב שיקולי מים בתכנון עירוני ואזורי. משרד הבינוי והשיכון ומוסד הטכניון בע"מ.
3. Akbari H, Pomerantz M, and Taha H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* **70**: 295-310.
4. Artmann N, Manz H, and Heiselberg P. 2007. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy* **84**: 187-201.
5. Botham-Myint D, Recktenwald GW, and Sailor DJ. 2015. Thermal footprint effect of rooftop urban cooling strategies. *Urban Climate* **14**(Part 2): 268-277.
6. Bowler DE, Buyung-Ali L, Knight TM, and Pullin AS. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* **97**: 147-155.
7. Cervený R. 2009. Noah Webster: Lexicographer, Climatologist. *Weatherwise* July/August: 38-43.
8. Coutts AM, Tapper NJ, Beringer J, et al. 2013. Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography* **37**: 2-28.
9. Erell E and Kalman Y. 2015. Impact of increasing the depth of urban street canyons on building heating and cooling loads in Tel Aviv, Israel. ICUC9 – The 9th International Conference on Urban Climate; July 20–24 2015; Toulouse, France.
10. Erell E, Leal V, and Maldonado E. 2005. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: An assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary-Layer Meteorology* **114**: 205-231.
11. Erell E, Pearlmutter D, Boneh D, and Bar Kutiel P. 2014. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate* **10**(Part 2): 367-386.
12. Erell E, Pearlmutter D, and Williamson T. 2011. Urban microclimate – Designing the spaces between buildings. London: Earthscan.
13. Erell E and Williamson T. 2007. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology* **27**: 1243-1255.
14. Ferguson B, Fisher K, Golden J, et al. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies: Cool paving. www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium.
15. Guo Y, Gasparrini A, Armstrong B, et al. 2014. Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: A systematic evaluation. *Epidemiology* **25**: 781-789.

16. Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, et al. 2000. The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings* **32**: 131-141.
17. Howard L. 1820. London: The Climate of London.
18. Jacob DJ and Winner DA. 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* **43**: 51-63.
19. Klein Rosenthal J, Kinney PL, and Metzger KB. 2014. Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006. *Health & place* **30**: 45-60.
20. Laaidi K, Zeghnin A, Dousset B, et al. 2012. The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environmental Health Perspectives* **120**: 254-259.
21. Levinson R, Akbari H, and Reilly J. 2007. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment* **42**: 2591-2605.
22. Nunez M and Oke TR. 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology* **16**: 11-19.
23. Oke TR. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* **7**: 769-779.
24. Oke TR. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **108**: 1-24.
25. Oke TR. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* **1**: 237-254.
26. Pearlmutter D, Berliner P, and Shaviv E. 2007. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons. *Building and Environment* **42**: 2396-2409.
27. Peretz C, Biggeri A, Alpert P, and Baccini M. 2011. The effect of heat stress on daily mortality in Tel Aviv, Israel. In: Fernando HJS, Klaić Z, and McCulley JL (Eds). National security and human health implications of climate change, Netherlands: Springer.
28. Potchter O, Cohen P, and Bitan A. 2006. Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology* **26**: 1695-1711.
29. Saaroni H, Bitan A, Ben Dor E, and Feller N. 2004. The mixed results concerning the 'oasis effect' in a rural settlement in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments* **58**: 235-248.
30. Schiller G and Karschon R. 1974. Microclimate and recreational value of tree plantings in deserts. *Landscape Planning* **1**: 329-337.
31. Schweitzer O and Erell E. 2014. Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy and Buildings* **68**(Part A): 25-32.

32. Shashua-Bar L and Hoffman M. 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings* **31**: 221-235.
33. Shashua-Bar L, Pearlmutter D, and Erell E. 2009. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning* **92**: 179-186.
34. Shashua-Bar L, Pearlmutter D, and Erell E. 2011. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology* **31**: 1498-1506.
35. Snir K, Pearlmutter D, and Erell E. 2016. The moderating effect of water-efficient ground cover vegetation on pedestrian thermal stress. *Landscape and Urban Planning* **152**: 1-12.
36. Spronken-Smith RA and Oke TR. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing* **19**: 2085-2104.
37. Synnefa A, Dandou A, Santamouris M, et al. 2008. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. *Journal of Applied Meteorology & Climatology* **47**: 2846-2856.
38. Upmanis H and Chen D. 1999. Influence of geographical factors and meteorological influences on nocturnal urban-park temperature differences – A case study of summer 1995 in Goteborg, Sweden. *Climate Research* **13**: 125-139.
39. Yaghoobian N, and Kleissl J. 2012. Effect of reflective pavements on building energy use. *Urban Climate* **2**: 25-42.