אי חום עירוני – טמפרטורות גבוהות בעיר בהשוואה לשטח הפתוח הסובב אותה, כתוצאה מהבדלים בתכסית ובפעילות האדם בה | צילום: Alan Alew ©

מיתון עומס חום בערים מדבריות באמצעות צמחים – באר שבע כמקרה בוחן

עודד פוצ'טר
החוג לגאוגרפיה, אוניברסיטת תל-אביב; החוג לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, מכללת בית ברל

ירון יעקב
החוג לגאוגרפיה, אוניברסיטת תל-אביב

לימור שעשוע-בר
תכנון סביבתי, מחוז דרום, המשרד להגנת הסביבה

שבתאי כהן
מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

יוסי טנאי
מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

פועה בר (קותיאל)
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

חזית המחקר | גיליון אביב 2012 / כרך 3(1) / הנגב | 5 בפברואר, 2012

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

פוצ'טר ע, יעקב י, שעשוע-בר ל ואחרים. 2012. מיתון עומס חום בערים מדבריות באמצעות צמחים – באר שבע כמקרה בוחן. *אקולוגיה וסביבה* **3**(1): 33–43.

על קצה המזלג

סיכום ומשמעויות

השימוש בצמחים בתוך המרחב העירוני לצורך קירור סביבתם הוצע בשנים האחרונות כחלק ממדיניות לפיתוח בר-קיימא הבאה לחסוך אנרגיה ולשפר את נוחות האדם. מהמחקר עולה שבערים המדבריות יש לצומח תפקיד חשוב במיתון עומס החום. במהלך שעות היום, עם עליית הטמפרטורות וערכי הקרינה, עולה מידת מיתון עומס החום בשטחים הירוקים. ככל שהשטח הירוק גדול יותר, כך גדלה השפעתו על יכולת המיתון. יחד עם זאת, נמצא כי מספיקות שתי שורות עצים בוגרים הנטועים לאורך רחוב עירוני, כדי ליצור מיתון אקלימי משמעותי שיכול להיות גדול מזה של פארק עירוני גדול.

לצומח העירוני יש יכולת קירור של מספר מעלות צלזיוס בודדות, אך ההשפעה על מיתון עומס החום יכולה להגיע אף ל-18 מעלות, בהתאם למדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה, שמשמעותה הפחתה של כשתי דרגות עומס חום (מחם מאוד לניטרלי). לפיכך, יש לבחון את יכולת מיתון תנאי האקלים של הצומח לא רק מבחינת טמפרטורת האוויר, אלא גם, ובעיקר, בהפחתת עומס החום. עוד עולה מהמחקר שבעוד שעצים בוגרים מסוגלים להפחית את עומס החום בצורה משמעותית על-ידי הצללה, הרי שלדשא השפעה שולית בלבד על עומס החום בשל העובדה שאינו מַצל. לאור מסקנות אלה נראה כי דרוש ניהול זהיר ושקול של הצומח העירוני, וכי יש להרבות בעצי צל ולהמעיט במרבדי דשא כדי להשיג את מיתון עומס החום המרבי בערי מדבר. האזורים הצחיחים בישראל הם חלק נכבד מהעתודה הקרקעית להתיישבות עירונית, ולכן ישנה חשיבות רבה ליצירת מיקרו-אקלים נוח לאדם בסביבה העירונית הממוקמת באזורים אלו.

המערכת

אקולוגיה וסביבה
כתב עת למדע ולמדיניות הסביבה

תקציר

המאמר בוחן את ההשפעה של שטחים עירוניים המכוסים בצומח על אקלים של עיר מדברית, בהדגמה בבאר שבע. העיר באר שבע מוקפת סביבה מדברית חשופה, לא חקלאית ובעלת טופוגרפיה מישורית. השפעת הצמחים לסוגיהם על מיתון עומס החום בבאר שבע נבדקה בשלושה דגמים שונים: א. עצי רחוב בתוך שטח בנוי; ב. גינות עירוניות קטנות השונות זו מזו מבחינת הרכב הצומח (עצי מכנף נאה, עצי אשל ודשא, בהתאמה); ג. פארק עירוני גדול. נבדקו שני רחובות בעיר העתיקה, בעלי גאומטריה דומה (רוחב הרחוב, המפנה שלו וגובה הבתים בו). באחד עצים בוגרים ומצלים, והשני חשוף לקרינת השמש. נמצא כי בשעות אחר הצהריים הייתה טמפרטורת האוויר ברחוב ללא העצים גבוהה בכ-3°C מזו שברחוב עם העצים, ועומס החום בו היה כבד לעומת עומס חום קל ברחוב עם העצים. הפארק העירוני הגדול מורכב ממשטח דשא בן כמה עשרות דונמים וסביבו מקבצים של עצי ינבוט ועצי אשל. נמצא שיכולת מיטבית בהפחתת הטמפרטורה הייתה במקבץ האשלים, אך מיתון עומס החום הטוב ביותר נמצא במקבץ עצי הינבוט, וזאת בשל ההצללה הטובה יותר שלהם. השפעת הדשא על הטמפרטורה ועל עומס החום הייתה קטנה. בכל הגינות הקטנות היה מיתון הטמפרטורות הגדול ביותר בשעות אחר הצהריים, והגיע לכדי 3°C–2°C בהשוואה לתחנת המדידות במרכז העיר שמפעיל השירות המטאורולוגי. אולם בעוד שגינות עם עצים (מכנף נאה ואשל) הפחיתו את עומס החום בצורה משמעותית, בגינה עם הדשא מיתון עומס החום היה קטן, אף על פי שהפחתת הטמפרטורות הייתה דומה. מתוצאות המחקר עולה שבשטחים עירוניים ירוקים נמצא מיתון טמפרטורות והפחתה משמעותית בעומס החום ביחס לשטח הבנוי סביבם. יחד עם זאת, הפחתת הטמפרטורות הודות לצמחים אינה גורמת בהכרח למיתון עומס החום. לפיכך, יש צורך בשימוש נכון ומושכל בצמחים לצורך מיתון עומס החום בעיר מדברית.

מבוא

אחת התופעות המאפיינות את אקלים העיר היא ההתפתחות של "אי חום עירוני", שמשמעותה עלייה של הטמפרטורה בתוך השטח הבנוי של העיר בהשוואה לסביבה הלא-בנויה המקיפה אותה. תופעת אי החום העירוני מוגדרת ונמדדת על-ידי ההפרש בין הטמפרטורה הנמדדת בתוך העיר לבין זו הנמדדת בסביבה הכפרית המקיפה את העיר ואינה מושפעת ממנה [26]. אחת ההשלכות החשובות ביותר של תופעת אי החום העירוני היא עלייה בערכי עומס החום במשך היום בעונת הקיץ, המחריפה את התעוקה האקלימית בסביבה העירונית [7, 14, 17], וכך נמצא גם בבאר שבע [8]. השימוש בצמחים בתוך המרחב העירוני לצורך קירור הסביבה העירונית הוצע בשנים האחרונות כחלק ממדיניות פיתוח בר–קיימא שמטרתה חיסכון באנרגיה ושיפור נוחות האדם [5, 16, 35]. מחקרים רבים חקרו את ההשפעה של עצי רחוב ופארקים עירוניים על הפחתת הטמפרטורות בסביבה העירונית הבנויה במפלס הולכי הרגל, ומצאו שיכולת הקירור העירונית של הצמחים נעה בשיא היום בין [3, 4, 9, 12, 32, 36] 4°C–2°C . החוקרים חלוקים בסיבות הגורמות לאפקט הקירור של הצומח. יש הסבורים שאפקט הקירור מושג בעיקר בשל תופעת הקירור באידוי [26, 34], ואחרים סבורים שאפקט הקירור נגרם בשל חסימת הקרינה [15].

אפקט הקירור של הצומח חשוב במיוחד באקלים חם וצחיח, בשל השפעתו על הפחתת עומס החום. יחד עם זאת, חשוב לציין שישנם מחקרים המראים שצמחים מסוימים הנמצאים בתוך המרחב העירוני, יכולים לגרום דווקא לעלייה בערכי הטמפרטורה, הלחות ועומס החום בהשוואה לשטח הבנוי [19, 27].

בשל המספר המועט של מחקרים שעוסקים בתופעת אי החום העירוני באזורים צחיחים, קשה עדיין לאפיין תופעה זו באזורים אלו. עם זאת, מהמקרים שנחקרו עד כה, כמו פניקס שבאריזונה [7, 10], אילת שבישראל [33], קהיר שבמצרים [29], חרטום שבסודן [13] ובאר שבע שבישראל [28, 30], ניתן ללמוד שאי החום העירוני בעונת הקיץ יכול להיות אינטנסיבי מאוד ולהתפתח גם בשעות היום (בניגוד לאזורים ממוזגים שבהם אי החום דומיננטי בלילה). גידול עירוני מהיר יכול להעצים מאוד את התופעה [7].

מחקרים שבחנו את השפעת הצומח על נוחות האדם מצאו שהיא משמעותית יותר מאשר הפחתת הטמפרטורות בשל הצל שמטילים העצים, בפרט עצים בוגרים [27, 31]. הצללה גורמת לירידה משמעותית בטמפרטורת הקרינה הממוצעת (Mean Radiant Temperature – Tmrt) שבני האדם חשים בשטח חשוף לשמש [6, 20, 25]. למרות מחקרים אלה, נראה שיש פער מחקרי בכימות השפעת הצומח במרחב העירוני על תחושת הנוחות האקלימית של האדם תוך שימוש במדדים פיזיולוגיים מתקדמים כדוגמת מדד הטמפרטורה הממוצעת החזויה (Predicted Mean Vote – PMV) ומדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה (Physiological Equivalent Temperature – PET), המשלבים בין התנאים הסביבתיים האובייקטיביים לבין משוואת האיזון

הסובייקטיבית של האדם. במאמר זה אנו מעוניינים להרחיב את המידע הכמותי על הפחתת עומס החום על-ידי צומח בעיר.

מטרות המחקר היו לבחון את השפעת הצומח בעיר הממוקמת באקלים חם וצחיח על תנאי המיקרו-אקלים ועל הנוחות התרמית של האדם בשתי רקמות עירוניות שונות: פארקים עירוניים בעלי מרקם צומח שונה ורחובות שלאורכם נטועים עצים, במקרה הבוחן של העיר המדברית באר שבע. העיר באר שבע גדלה בצורה מהירה מכ-45,000 נפש בשנת 1965 ועד לכ-201,000 נפש בשנת 2011. גידול חד זה השפיע על עוצמת אי החום העירוני של העיר. מחקרים שנעשו במהלך השנים הראו שאי החום העירוני המרבי של באר שבע גדל עם השנים מ-3°C בחורף 1965 [2] ל-7°C בחורף 2005 ול-4°C בקיץ 2005 [28]! באותה תקופה עלה גם עומס החום [8]. יש לשער שעם המשך גידול העיר בקצב ובצורה הנוכחיים תתגבר תופעת אי החום העירוני של באר שבע ועומס החום בה ימשיך להתגבר.

שיטת המחקר

העיר באר שבע נבחרה לשמש אזור מחקר. העיר ממוקמת בצפון הנגב ואקלימה חם וצחיח, BWh על פי סיווג קפן. בעונת הקיץ תנאי האקלים יציבים למדי ומאופיינים בשמים בהירים ובקרינת שמש חזקה. בחודש יולי, שהוא החודש החם בשנה, ערכי הקרינה הגלובלית היומית הממוצעת מגיעים ל-29 מגה ג'אול למ"ר. טמפרטורת המקסימום היומית הממוצעת היא 33°C , משרע הטמפרטורות היממתי גדול, וטמפרטורת המינימום היומית הממוצעת היא 18.5°C. הלחות היחסית נעה בין מינימום ממוצע של 32% למקסימום ממוצע של 88%, ולעתים שוררים תנאי רוויה (100%). תנאי אקלים אלה גורמים לאי נוחות אקלימית ולעומס חום גבוה [1].

שיטת המחקר כללה שני שלבים: מדידות אקלימיות באתרים נבחרים, עיבוד הנתונים וחישוב תנאי הנוחות התרמיים של האדם.

בשלב הראשון בוצעו מדידות אקלימיות – קרינה גלובלית, קרינה נטו, טמפרטורה, לחות יחסית, מהירות הרוח וכיוונה, וטמפרטורות משטחים וקירות – בשלוש רקמות עירוניות שונות: א. עצי רחוב בתוך שטח בנוי; ב. שלוש גינות עירוניות קטנות שנבדלו בהרכב הצומח שלהן (עצי מכנף נאה [*Tipuana tipu*], עצי אשל [*Tamarix*] ודשא) לאורך רחוב עירוני רחב; ג. פארק עירוני גדול. המדידות נעשו באמצעות תחנות מדידה שהשתמשו באוגר מסוג Campbell 21X. להלן פרטי דיוק המדידה: טמפרטורות ±2.0°C, לחות יחסית ±2%, מהירות רוח ±0.3 מטר לשנייה. הקרינה נמדדה באמצעות מד קרינה Kipp & Zonen CM6 ברמת דיוק יומית של ±2%.

איור 1 מציג תצלומי אוויר של אתרי המדידה, תמונה של כל האזור שנמצאות בו תחנות המדידה, ותמונת "עין הדג" המאפשרת תיאור וחישוב של מִפתח השמים (SVF – Sky View Factor) במקום המדידה (ערך נמוך מראה מִפתח קטן, דהיינו חסימת שמים גדולה על-ידי התכסית).

איור 1
אתרי המחקר (בבאר שבע) ותכונותיהם תצלום אוויר, מיקום התחנות המטאורולוגיות, הנוף העירוני בכל אחת מתחנות המדידות וִמפתח

השמים (SVF)
תצלומי נוף עירוני | צילום: פועה בר

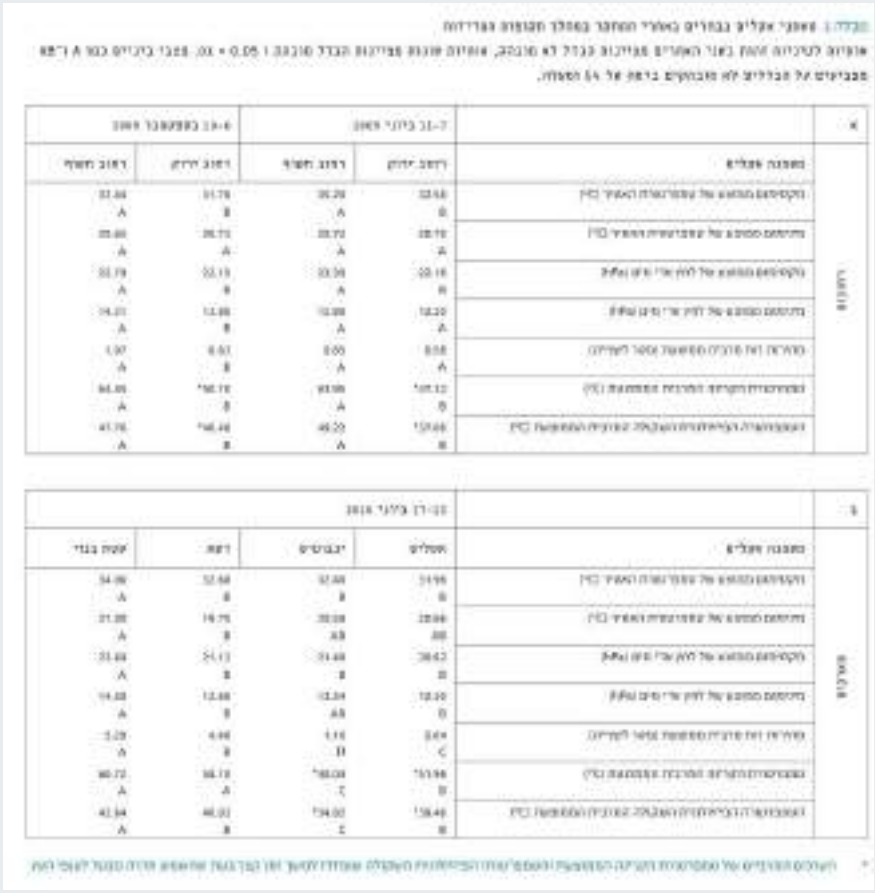
בשלב השני חושבו תנאי הנוחות התרמית של האדם בתחנות המדידה השונות בהתאם למדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה שהוא המדד האוניברסלי המקובל כיום בקרב מדענים העוסקים בביו-אקלים ובאקלים העיר. מדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה פותח בשנת 1987 על בסיס העקרונות של חילופי חום בין האדם לסביבה. המדד משקלל את סך המשתנים האקלימיים (מאזן קרינה, טמפרטורה, לחות ורוח) השוררים בסביבה הפתוחה בהשוואה לטמפרטורה השוררת בחדר סגור ומוצל שהלחות היחסית בו היא 50% ללא רוח. בדרך זו, המדד מאפשר השוואה להשפעות האקלימיות הכוללות של הסביבה הפתוחה (טמפרטורה, לחות, רוח וקרינה). כך למשל, בקיץ בחשיפה לקרינה ישירה יהיו ערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה גבוהים יותר מהערך של טמפרטורת האוויר, ובימי חורף עם רוח חזקה יהיו ערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה נמוכים בהרבה מהערך של טמפרטורת האוויר [18]. חילופי החום עם הסביבה מחושבים בהתאם למדדים סובייקטיביים של האדם - גיל, משקל, גובה, לבוש ורמת פעילות מטבולית. במחקר זה חושבו ערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה בעזרת מודל RayMan Pro [22, 23] המשקלל את תנאי האקלים המדודים בסביבה, מחשב בהתאם למדידות אלה ובהתאם לתמונת "עין הדג" את ערכי טמפרטורת הקרינה ממוצעת ולחץ האדים, ובהתאם להם קובע את ערך הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה. תחושת הנוחות מחושבת לאדם במשקל 75 ק"ג, בגובה 1.75 מטר, בלבוש קל ובעמידה. המודל נבחן ואומת מבחינה מדעית [21, 23].

כדי לבדוק אם קיימים הפרשים מובהקים ($p \leq 0.05$) בין התחנות בכל אחד מן המשתנים שנבדקו, נעשה שימוש במבחן Duncan.

תוצאות

השפעת עצי רחוב על המיקרו-אקלים ועל תחושת הנוחות של האדם – השפעת עצי הרחוב על המיקרו-אקלים בוצעה בעיר העתיקה של באר שבע שרחובותיה אחידים ובמבנה שתי וערב. כך נוצר אתר מחקר כמעט אידֵאלי שבו הכיוון שהרחובות פונים אליו, רוחבם, וגובה הבתים משני צִדי הרחוב כמעט זהים. נבדקו שני רחובות דומים וסמוכים בעיר העתיקה שכיוונם זהה, מצפון-מערב לדרום-מזרח, ולשניהם יחס ממדים שווה (גובה בתים חלקי רוחב). ברחוב אחד נטועות שתי שורות של עצי מכנף נאה בוגרים בעלי צמרת רחבה היוצרים מִפתח שמים קטן של 0.12 (להלן רחוב ירוק), וברחוב השני אין עצים והוא חשוף לקרינת השמש ובעל מִפתח שמים של 0.45. המדידות נערכו בכל שעות היממה בתאריכים 11–17 ביוני 2009 ובתאריכים 6–10 בספטמבר 2009.

טבלה 1א מציגה נתוני אקלים נבחרים משתי תקופות המדידה. הטמפרטורות המרביות הממוצעות ברחוב החשוף היו גבוהות מאלו שברחוב הירוק ב- 2.6°C בחודש יוני וב-1.3°C בחודש ספטמבר. יש לציין שהפרשי הטמפרטורה הבו-זמניים היו גדולים יותר והגיעו לכדי 3°C, מכיוון ששעות טמפרטורת המקסימום בשני האתרים אינן חופפות (איור 2). טמפרטורות המינימום הממוצעות בשני הרחובות היו דומות בשתי תקופות המדידה. ערכי לחץ האדים, המבטאים את תכולת הלחות שבאוויר, היו גבוהים יותר ברחוב החשוף, תופעה שבלטה בחודש יוני. ייתכן שהעלייה בלחץ האדים קשורה לחדירת הבריזה אחר הצהריים, שהורגשה היטב ברחובות חשופים שכיוונם צפון-מערב, ככיוון הבריזה. יש לציין שתופעה דומה נמצאה במחקרים נוספים [11, 24]. יחד עם זאת, יש לציין שהתופעה עדיין זקוקה לאישוש נוסף. טמפרטורת הקרינה המַרבית הממוצעת שחושבה ברחוב החשוף הייתה גבוהה מזו שחושבה ברחוב המוצל ב-19°C בשתי תקופות המדידה, אך טמפרטורת הקרינה המַרבית הממוצעת ברחוב החשוף ביוני הייתה גבוהה ב-2°C מאשר בספטמבר. יש לציין שטמפרטורות הקרינה המרביות מתחת לעצים שררו רק לפרקי זמן קצרים, כאשר קרינת השמש חדרה מבעד לצמרות העצים. הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה המַרבית הממוצעת, ששררה ברחוב החשוף ומבטאת את עומס החום, הייתה גבוהה מזו ששררה ברחוב הירוק בכ-10°C בחודש יוני ובכ-7°C בחודש ספטמבר. ההבדלים בערכים המרביים הממוצעים של המשתנים השונים בין שני הרחובות בשתי תקופות המדידה היו מובהקים (פרט למהירות הרוח בחודש יוני).

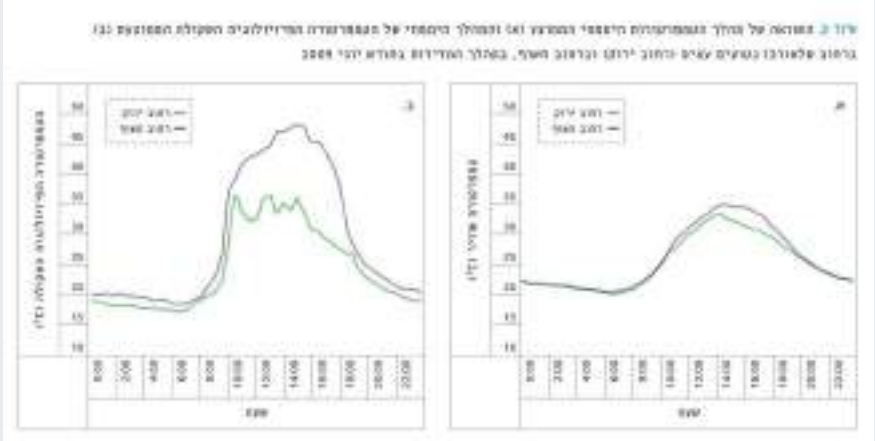


טבלה 1

משתני אקלים נבחרים באתרי המחקר במהלך תקופות המדידות

אותיות לטיניות זהות בשני האתרים מציינות הבדל לא מובהק, אותיות שונות מציינות הבדל מובהק (α = 0.05). מצבי ביניים כמו A ו-AB מצביעים על הבדלים לא מובהקים ברמה של 5% ומעלה.

איור 2 מציג את מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע ואת המהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת במהלך שבוע המדידות בחודש יוני 2009. מהאיור ניתן לראות כי עיקר אפקט המיתון של העצים הוא בְּשעות החמות של היום, ואילו בְּשעות הלילה הוא מזערי. מהלך הטמפרטורה היממתי מראה שאפקט הקירור של העצים במשך השעות החמות של היום נע בין 1.5°C ל-3°C, ושיאו הוא בשעות אחר הצהריים המוקדמות כאשר הטמפרטורות הן הגבוהות ביותר. מהלך ערכי הטמפרטורה השקולה ברחוב הירוק מושפע מחדירת הקרינה דרך ענפי העץ, ולכן ניתן לזהות במהלך היום שינויים מהירים בערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה. כתוצאה מכך, הפרשי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה בין הרחוב החשוף לרחוב הירוק נעים בין 18°C בהצללה מלאה ועד 10°C בהצללה חלקית. נראה שהשפעת עצי הרחוב על מיתון עומס החום מורגשת הרבה יותר מההשפעה על מיתון הטמפרטורות בלבד.



איור 2

השוואה של מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע (א) והמהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת (ב) ברחוב שלאורכו נטועים עצים (רחוב ירוק) וברחוב חשוף, במהלך המדידות בחודש יוני 2009

השפעת פארקים עירוניים על המיקרו אקלים ועל תחושת הנוחות של האדם – השפעה זו נבחנה בשתי רקמות עירוניות; האחת – פארק עירוני גדול בתוך שכונת מגורים עם צומח מגוון, והשנייה – גינות עירוניות קטנות עם צומח אחיד.

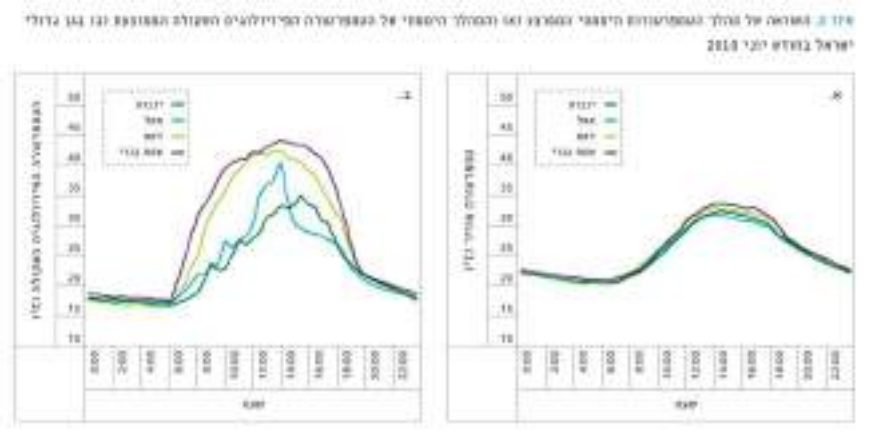
כדוגמה אופיינית לפארק עירוני גדול נבחר פארק "גדולי ישראל" בבאר שבע שגודלו כ-100 דונם, ובמרכזו משטח דשא רציף בשטח של כ-60 דונם. בצדו הצפון-מזרחי נמצא מקבץ של עצי ינבוט בוגרים (*Prosopis alba*) שיצרו נוף נמוך ומלא במקרים שבהם הענפים הצדדיים של העצים הגיעו לרצפה ויצרו מִפתח שמים נמוך של 0.07. בצדו הדרום-מזרחי של הפארק נמצא מקבץ של עצי אשל בוגרים בעלי נוף גבוה ודליל עם מִפתח שמים מעט גדול יותר של 0.17. מִפתח השמים של השטח הבנוי היה 0.5 והמִפתח של משטח הדשא היה הגדול ביותר, 0.75 (איור 1).

בתאריכים 13–17 ביוני 2010 נערכו מדידות אקלים בתוך הפארק ובסביבה הסמוכה לו. יש לציין שנתוני הסביבה הבנויה היו זהים לאלה שנמדדו בתחנה הרשמית של השירות המטאורולוגי הממוקמת במרכז העיר סמוך לבית החולים סורוקה.

טבלה 1ב מציגה נתוני אקלים נבחרים. טמפרטורת המקסימום הממוצעת שנמדדה בסביבה הבנויה הייתה גבוהה מהטמפרטורות שנמדדו בפארק בעד כ-2.1°C. טמפרטורת המקסימום הממוצעת שנמדדה מתחת לעצי האשל הייתה הנמוכה ביותר בפארק. טמפרטורת המקסימום מתחת לעצי הינבוט הייתה גבוהה בכ-0.4°C. מזו שמתחת לעצי האשל. טמפרטורת המקסימום הממוצעת בדשא הייתה גבוהה ב-1.0°C מזו שנמדדה מתחת לעצי האשל ונמוכה בכ-1.1°C מזו שנמדדה בשטח הבנוי. טמפרטורות המינימום הממוצעות שנמדדו מתחת לעצים היו דומות, ונמוכות בעד כ-0.4°C מאלו שבשטח הבנוי. טמפרטורת המינימום של האוויר מעל הדשא הייתה הנמוכה ביותר שנמדדה בפארק ונמוכה ב-1.2°C מזו שבשטח הבנוי.

ערכי לחץ האדים היו גבוהים יותר בשטח הבנוי. טמפרטורת הקרינה המַרבית הממוצעת שנמדדה בשטח הבנוי הייתה גבוהה ב-26.5°C מזו שנמדדה מתחת לעצי הינבוט, ב-14.7°C מזו שנמדדה מתחת למקבץ עצי האשל, ורק ב-3°C מזו שנמדדה בדשא. יש לציין שוב, שטמפרטורות הקרינה המרביות שמדדנו מתחת לעצים, שררו רק לפרקי זמן קצרים כאשר קרינת השמש חדרה מבעד לצמרות העצים. חדירה זו הייתה גדולה יותר מבעד לעצי האשל בשל צמרתם הדלילה יחסית. הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה המַרבית ששררה בשטח הבנוי הייתה גבוהה רק ב-2°C מזו שבדשא, ב-4°C מזו ששרה מתחת לעצי אשל וב-9°C מזו ששררה מתחת לעצי הינבוט. שוב יש לציין שהערכים המרביים שנמדדו מתחת לעצים נמדדו לפרקי זמן קצרים, בפרט מתחת לעצי האשל. במקרה זה ישנה משמעות רבה לנוף העץ, לגודל הצמרת ולמידת הכסות וההצללה שלה על פני הקרקע. ההבדלים בערכים המרביים הממוצעים בכל משתני האקלים בין השטח הבנוי לבין הערכים שנמדדו בנקודות השונות בפארק היו מובהקים. הבדלים מובהקים בערכים המרביים בין מיני הצמחים השונים נמצאו במשתנים מהירות רוח והטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה. בשני המקרים נמצאו הערכים הנמוכים ביותר תחת עצי הינבוט. יש לציין שההבדלים בערכי טמפרטורת הקרינה בין העצים לשטח הבנוי נמצאו מובהקים, בעוד שההבדלים בין הדשא לבין השטח הבנוי לא היו מובהקים.

איור 3 מציג את מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע ואת המהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת במהלך שבוע המדידות בחודש יוני 2010 בפארק גדולי ישראל ובסביבתו. גם במקרה זה, עיקר אפקט המיתון של העצים הוא בשעות החמות של היום ואילו בשעות הלילה האפקט הוא הנמוך ביותר. מהלך הטמפרטורה היממתי מראה שאפקט הקירור של העצים במשך השעות החמות של היום נע בין 5°C ל-2.7°C, וששיאו הוא בשעות אחר הצהריים המוקדמות כאשר הטמפרטורות הן הגבוהות ביותר. מהלך ערכי הטמפרטורה השקולה ברחוב הירוק מושפע מחדירת הקרינה דרך ענפי העצים. הדבר נכון בפרט לגבי עצי האשל שצמרתם דלילה, ולכן ניתן לזהות מתחת לעצי האשל עלייה חדה בערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה למשך זמן קצר בצהרי היום. כתוצאה מכך, הפרשי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה בין עצי האשל לשטח הבנוי נעים בין 4°C בעת חדירת הקרינה לבין 14°C בהצללה מלאה. מתחת לעצי הינבוט ניכרת הפחתה של ערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה למשך זמן ארוך ורציף, המגיעה בשיאה ל-16°C. מידת מיתון הטמפרטורה השקולה בדשא מגיעה עד ל-6°C דווקא בשעות הבוקר ואחר הצהריים, ואילו במשך הצהריים השפעת הדשא על מיתון ערכי עומס החום קטנה יותר ומגיעה ל-2°C בלבד. נראה אפוא, שבפארק כמו ברחובות המוצלים, השפעת העצים על מיתון עומס החום מורגשת הרבה יותר מההשפעה על מיתון הטמפרטורות בלבד. נראה שגם למרקם הצומח בפארק יש השפעה רבה על מיתון עומס החום. ככל שצמרת העץ מלאה יותר ומִפתח השמים הפתוחים קטָן, כך ההשפעה גדולה יותר. הדשא משפיע במידת מה על מיתון טמפרטורת האוויר, והשפעתו על מיתון ערכי עומס החום קטנה בהשוואה לעצים.

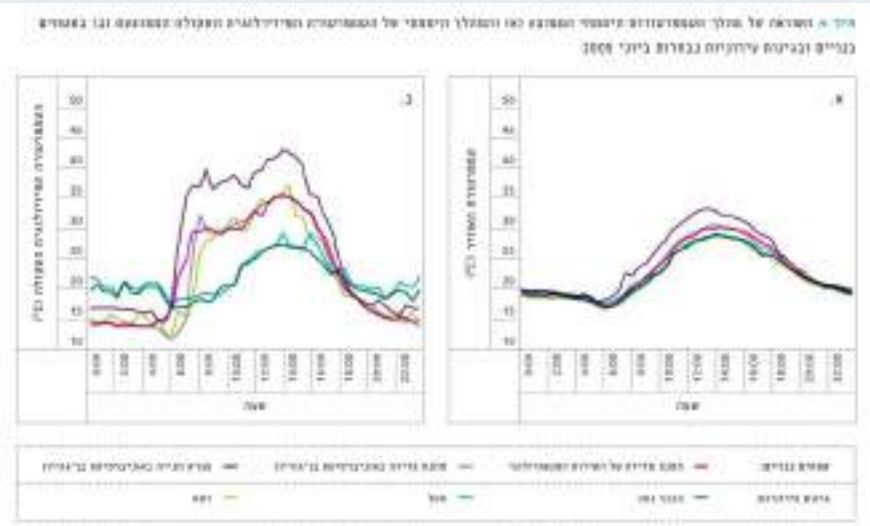


איור 3

השוואה של מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע (א) והמהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת (ב) בגן גדולי ישראל בחודש יוני 2010

מכיוון שגן גדולי ישראל מכיל מספר מיני צמחים הסמוכים זה לזה, תיתכן השפעה אקלימית הדדית ביניהם. בחינת גינות עירוניות בעלות מרקם צומח אחיד יכולה להאיר נקודה זו. בין השנים 2005–2007 בוצעו מדידות בו-זמניות בשלוש גינות עירוניות בבאר שבע – גן ראשונים, שבו עצי אשל בוגרים וצפופים יחסית על פני שטח של 20 דונם; גן סיאטל, ובו מקבץ עצי מכנף נאה על פני 10 דונם; המדשאה המרכזית של בית החולים סורוקה ששטחה 40 דונם. הגינות נמצאות ברחוב רגר לאורך כ-1.5 ק"מ, וביניהן נמצאות התחנות המטאורולוגיות של אוניברסיטת בן-גוריון ושל השירות המטאורולוגי הישראלי, ששימשו תחנות ביקורת. תחנת מדידות נוספת הוצבה במגרש החניה של אוניברסיטת בן-גוריון.

איור 4 מציג את מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע ואת המהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת במהלך יממה טיפוסית בחודש יוני. כמו בכל האתרים האחרים, נראה שעיקר מיתון הטמפרטורות בכל הגינות היה במשך שעות היום ונע בין 1°C ל-2°C ביחס לתחנות אוניברסיטת בן-גוריון והשירות המטאורולוגי, שהטמפרטורות בהן היו דומות. לא היה הבדל בין מהלך הטמפרטורות היממתי בגינות השונות. הטמפרטורות שנמדדו במגרש החניה היו גבוהות בעד כ-5°C מאלו שנמדדו בגינות, ומבחינה זו מגרש החניה מהווה אי של חום בתוך העיר. מהלך יממתי של הטמפרטורה השקולה מראה מבנה אחר מזה של טמפרטורת האוויר. שתי הגינות שנטועים בהן עצים בוגרים הראו מהלך דומה וערכים זהים של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה. המהלך היממתי של גינת הדשא היה זהה לאלו של תחנות הביקורת. ערכי הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הגבוהים ביותר נמדדו במגרש החניה והיו גבוהים בצהרי היום ב-7°C מאלו של תחנות הביקורת והדשא וב-16°C מאלו שבגינות שנטועים בהן עצים. מכיוון שגם הגינות הקטנות וגם גן גדולי ישראל הושוו לנתוני האקלים של תחנת השירות המטאורולוגי בבאר שבע, ניתן להסיק שמיתון טמפרטורת האוויר ועומס החום בגינות העירוניות הקטנות נמוך מזה של פארק עירוני גדול. כמו כן, נראה שמשטחי אספלט חסרי צומח, כמו מגרשי חניה גדולים, יוצרים אי חום משמעותי במרחב העירוני.



איור 4

השוואה של מהלך הטמפרטורות היממתי הממוצע (א) והמהלך היממתי של הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה הממוצעת (ב) בשטחים בנויים ובגינות עירוניות נבחרות ביוני 2005

סיכום ומסקנות

מתוצאות המחקר עולה שבערים הממוקמות באזור מדברי יש לצומח בעיר תפקיד חשוב במיתון עומס החום. בעוד שמיתון הטמפרטורות המרבי נע בין 2°C ל-3°C, מיתון עומס החום משמעותי יותר, ומגיע עד 18°C לפי מדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה. במהלך שעות היום, עם עליית הטמפרטורות וערכי הקרינה, עולה במקביל מידת מיתון עומס החום בשטחים הירוקים, ומגיעה לשיאה בשעות אחר הצהריים המוקדמות. ככל שהשטח הירוק גדול יותר, כך גדלה השפעתו על יכולת המיתון. יחד עם זאת, תוצאות המחקר מראות ששתי שורות עצים בוגרים הנטועים לאורך רחוב עירוני יוצרות מיתון אקלים משמעותי שיכול להיות גדול מזה של פארק עירוני גדול (טבלה 1).

יש להבחין בין מיתון הטמפרטורה לבין מיתון עומס החום. לצומח העירוני יש יכולת קירור של מספר מעלות בודדות, אך השפעתו על מיתון עומס החום משמעותית מאוד, ויכולה להגיע ל-18°C בהתאם למדד הטמפרטורה הפיזיולוגית השקולה, דהיינו הפחתה של כשתי דרגות עומס חום (מחם מאוד לניטרלי). לפיכך, יש לבחון את יכולת מיתון תנאי האקלים של הצומח לא רק מבחינת טמפרטורת האוויר, אלא גם, ובעיקר – בהפחתת עומס החום. בתוך פארק עירוני יש לעצים בוגרים ולמשטחי דשא יכולת למתן את הטמפרטורות במידת מה (עצים עד כ-2°C ודשא עד כ-1.4°C). אולם בעוד עצים בוגרים מסוגלים להפחית את עומס החום בצורה משמעותית על-ידי הצללה, השפעת הדשא על הפחתת עומס החום שולית, בשל העובדה שהדשא אינו מצל ומאחר שהשפעתו על טמפרטורת הקרינה, שהיא גורם האקלים המשמעותי המשפיע על עומס החום, קטנה מאוד. לאור מסקנות אלה נראה שדרוש ניהול זהיר ושקול של הצומח העירוני, וכי יש להרבות בעצי צל ולהמעיט במרבדי דשא כדי להשיג את מיתון עומס החום המרבי, בפרט בערי מדבר.

השאלה אם הגורם המשמעותי המביא למיתון האקלים על-ידי הצומח הוא חסימת הקרינה וההצללה או האידוי, תידון במאמר עתידי שינתח נתוני צריכת מים של עצים.

לצומח העירוני יכולת קירור של מספר מעלות בודדות, אך השפעתו על מיתון עומס החום יכולה להגיע ל-18°C | צילום: פועה בר

תודות

מחקר זה מומן על–ידי קרן המחקר ישראל-גרמניה (GIF), מענק מחקר מספר 955/2007. תודת המחברים נתונה לקרן. תודה לאברהם גרווה, אורי דיקן, טל קנטי, מורן פירקנר, מיכאל בהר, רפאל רוסה ויוני מכמנדרוב, כולם

ממֵנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני, על הסיוע הטכני בביצוע המדידות. תודה לכל הסטודנטים מהמחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי מאוניברסיטת בן-גוריון בנגב שביצעו את המדידות. תודה לד"ר לנה ז'בלב על העיבוד הסטטיסטי.

מקורות

1. ביתן א ורובין ש. 1991. אטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי בישראל. אוניברסיטת תל-אביב: הוצאת רמות.

2. גנור א. 1966. אי החום העירוני של באר שבע (עבודת תזה לתואר שני). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.

3. פוצ'טר ע, סערוני ה, יעקב י, לונקה א, וביתן א. 2002. השימוש בצמחיה ככלי לשיפור האיכות האקלימית באזורים מטרופוליטניים באקלים ים תיכוני, בהדגמה: מטרופולין תל-אביב. *מחקרים בגיאוגרפיה של ארץ ישראל* **ט"ז**: 362-377.

4. פוצ'טר ע ושעשוע-בר ל. 2009. שטחים ציבוריים פתוחים ירוקים בעיר תל-אביב – היבטים סביבתיים, אקלימיים ואקולוגיים. בתוך: קיפניס ב (עורך). תל-אביב–יפו מפרבר גנים לעיר עולם, מאה השנים הראשונות. חיפה: פרדס הוצאה לאור.

5. שפירא ע והאן א. 2008. שטחים ציבוריים פתוחים בערים – מדריך לתכנון. המשרד להגנת הסביבה, משרד הפנים ומשרד הבינוי והשיכון.

6. Ali-Toudert F and Mayer H. 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* **81**: 742-754.

7. Baker LA, Brazel SW, Selover N, Martin C, McIntyre N, Steiner FR, Nelson A, and Musacchio L. 2002. Urbanization and warming in Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation. *Urban Ecosystems* **6**: 183-206.

8. Ben Shalom (Itzhak) H, Potchter O, and Tsoar H. 2009. The effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city, the case of Beer Sheva, Israel. Proceeding of the 7th International Conference on Urban Climate; 29 June-3 July 2009; Yokohama, Japan.

9. 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.

10. Brazel SW and Balling RC. 1986. Temporal analysis of long-term atmospheric moisture levels in Phoenix, Arizona. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **25**: 112-117.

11. Cohen P, Potchter O, and Matzarakis A. 2011. Daily and seasonal climate behavior of green urban open spaces in Mediterranean climate and its impact on human comfort. *Buildings and Environment*. In print.

12. Dimoudi A and Nikolopoulou M. 2003. Vegetation in the urban environment: Microclimate analysis and benefits. *Energy and Buildings* **35**: 69-76.

13. Elagib NA. 2011. Evolution of urban heat island in Khartoum. *International Journal of Climatology* **31**(9): 1377-1388.

Emmanuel R, Johansson EJ, and Rosenlund H. 2007. Urban shading – A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology* **27**: 1995-2004. .14

Givoni B. 1991. Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment* **25B**(3): 289-299. .15

Grimmond CSB. 2007. Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. *Geographical Journal* **173**: 83-88. .16

Golden JS. 2004. The built environment induced urban heat island effect in rapidly urbanizing arid regions – A sustainable urban engineering complexity. *Environmental Sciences* **1**(4): 321-349. .17

Höppe P. 1999. The physiological equivalent temperature – A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* **43**: 71-75. .18

Jauregui E. 1991. Influence of large urban parks on temperature and convective precipitation in tropical cities. *Energy and Buildings* **15-16**: 457-463. .19

Jendritzky G, Menz G, Schirmer H, and Schmidt-Kessen W. 1990. Methodik zur räumlichen bewertung der thermischen komponente im bioklima des menschen. Hannover: Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung. .20

Lin TP, Matzarakis A, and Hwand RL. 2010. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment* **45**: 211-213. .21

Matzarakis A, Rutz F, and Mayer H. 2006. Modeling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* **51**(4): 323-334. .22

Matzarakis A, Rutz F, and Mayer H. 2010. Modeling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the Ray-Man model. *International Journal of Biometeorology* **54**: 131-139. .23

Mayer H and Höppe P. 1984. The importance of forests for recreation from the point of view of human bioclimatology. *Forest Research* **103**(1): 125-131. .24

Mayer H and Matzarakis A. 2006. Impact of street trees on the thermal comfort on people in summer: A case study in Freiburg (Germany). *Merhavim – Studies in the Geography of Israel and the Middle East* **5**: 285-300. .25

Oke TR. 1987. Boundary Layer Climates, 2nd ed. New York: Methuen. .26

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**(12): 1695–1711. .27

Potchter O, Yaron Y, and Oren G. 2006. The magnitude of the urban heat island of a city in an arid zone: The case of Beer Sheva, Israel. Proceeding of the 6th International Conference on Urban Climate; 12–16 July 2006; Gothenburg, Sweden. .28

Robaa SM. 2004. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* **77**: 251-259. .29

Saaroni H and Ziv B. 2010. Isolating the urban heat island contribution in a complex terrain and its application for an arid city. *Journal of Applied Meteorology and* .30

.*Climatology* **49**: 2159-2166

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**(10): 1498-1506 .31

Shashua-bar L, Potchter O, Bitan A, Bolanski D, and Yaakov Y. 2010. Micro-climate modelling of street tree species within the varied urban morphology in the .Mediterranean city of Tel Aviv. *International Journal of Climatology* **30**: 44-57 .32

Sofer M and Potchter O. 2006. The urban heat Island of a city in an arid zone: The .case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology* **85**(1-2): 61-88 .33

Spronken-Smith RA, Oke TR, and Lowry WP. 2000. Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International Journal of Climatology* **20**: 1033- .1047 .34

Steemers K. 2003. Energy and the city: Density, buildings and transport. *Energy and .Buildings* **35**: 3-14 .35

Tsiros IX. 2010. Assessment and energy implications of street air temperature cooling by shade tress in Athens (Greece) under extremely hot weather conditions. .*Renewable Energy* **35**(8): 1866-1869 .36