



יוצא לאור על-ידי המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב



פרוינדליך, א. 2016. המורכבות התרמית-אנושית בסביבה הפתוחה: השפעתם של גורמים מיקרו-מטאורולוגיים על העומס התרמי בתנאי חוץ בישראל – ניתוח תיאורטי באמצעות מודל ביו-מטאורולוגי. הרשת הגאוגרפית, כרך 9, עמודים 1-14.

#### חברי וחברות המערכת

פרופ' רחל אלתרמן  
הקתדרה לארכיטקטורה/תכנון  
ערים ע"ש דוד עזריאלי, הטכניון

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

פרופ' חיים צוער  
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח  
סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון  
בנגב

פרופ' ברוך קיפניס  
החוג לגאוגרפיה ולימודי סביבה,  
אוניברסיטת חיפה

פרופ' רות קרק  
המחלקה לגאוגרפיה,  
האוניברסיטה העברית בירושלים

פרופ' יוסי שלהב  
המחלקה לגאוגרפיה וסביבה,  
אוניברסיטת בר-אילן

#### צוות העורכים

##### פרופ' שאול קרקובר

עורך ראשי - תחומים: גאוגרפיה עירונית, כלכלית ותכנון  
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

##### פרופ' יוסי כץ

עורך תחומי: גאוגרפיה היסטורית  
המחלקה לגאוגרפיה וסביבה, אוניברסיטת בר-אילן

##### פרופ' יונתן לרון

עורך תחומי: גאומורפולוגיה, גאולוגיה וקלימטולוגיה  
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

##### פרופ' טל סבוראי

עורך תחומי: מערכות מידע גאוגרפיות וחישה מרחוק  
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

##### פרופ' מיכאל סופר

עורך תחומי: גאוגרפיה כפרית  
המחלקה לגאוגרפיה וסביבה, אוניברסיטת בר-אילן

##### פרופ' נעם שובל

עורך תחומי: גאוגרפיה של תיירות ופנאי  
המחלקה לגאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

##### פרופ' יצחק שנל

עורך תחומי: גאוגרפיה חברתית-תרבותית  
המחלקה לגאוגרפיה וסביבת האדם, אוניברסיטת תל-אביב

כתב העת 'הרשת הגאוגרפית' מוכר ע"י הו"ת ככתב עת מדעי לצורך תקצוב האוניברסיטאות

כתובת: המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר-שבע 84105

טלפון: 08-6472001/2/3 e-mail: shaul@bgu.ac.il פקס: 08-6472821

# המורכבות התרמית-אנושית בסביבה הפתוחה: השפעתם של גורמים מיקרו-מטאורולוגיים על העומס התרמי בתנאי חוץ בישראל - ניתוח תיאורטי באמצעות מודל ביו-מטאורולוגי

אריאל פרוינדליך

## תקציר

תיירות ונופש הינן מסוג הפעילויות אשר מחד נערכות כשיגרה בסביבה הפתוחה, ומאידך, הינן רגישות מאוד לעקות אקלימיות, ולכן קיים שם צורך מובהק בחקירת ההשפעה של הגורמים המטאורולוגיים הרלוונטיים על העומס התרמי. עם זאת, חקירה כזו אינה פשוטה מכיוון שהעומס התרמי הפועל על האדם בסביבה הפתוחה תלוי בגורמים מטאורולוגיים מגוונים, וההשפעה המשולבת של הגורמים הללו על האדם מורכבת ואינה קלה להערכה. המחקר הנוכחי מנתח את השפעתם של גורמים מטאורולוגיים שונים על העומס התרמי, באתרי תיירות פתוחים בישראל, במצבים אקלימיים אופייניים, באמצעות מודל תיאורטי (RayMan) ומודל תרמי (PET) המותאמים לסביבה הפתוחה, ובאמצעות הדמיות שונות. ממצאי המחקר חושפים את המורכבות התרמית הגדולה בתנאי חוץ, ומגוון המצבים התרמיים האפשריים בקנה המידה המיקרו-מטאורולוגי, ומצביעים בין היתר על ההשפעה הגדולה של הרוח והקרנה על העומס התרמי בתנאי הארץ. מסקנות המחקר מציעות את האפשרות לעצב ולשפר את הסביבה התרמית באמצעים פשוטים כגון, הצללה, שוברי רוח, ומשטחי צמחייה.

**מילות מפתח:** עומס תרמי בסביבה פתוחה, מדדים תרמיים, מורכבות תרמית, מדד PET, מודל RayMan



## Thermal Complexity in Outdoor Environment: Effects of Micro-Meteorological Factors on Thermal Stress in Typical Outdoor Conditions in Israel – a Theoretical Analysis

Ariel Freundlich

### Abstract

Tourism and recreation are activities generally conducted in an open environment and thus they are very sensitive to climatic stress; therefore there is a clear need in investigating effects of relevant meteorological factors on thermal load. However, such an investigation is not simple due to the complex interaction between man and thermal environment. The current research analyzes the effect of different meteorological factors on thermal load, in outdoor tourist sites in Israel, in a variety of typical climate conditions, using a theoretical model (RayMan) and a bio-meteorological index (PET) suited for outdoor environment. Research findings reveal great thermal complexity, and a variety of thermal conditions that are possible on the micro-meteorological scale. Findings also indicate the large effect of wind velocity and sun radiation on thermal load in Israel's climate. The results of the study lead to recommend modifying the outdoor thermal environment using simple means such as shading, wind breaking, and areas of vegetation.

**Key words:** Thermal load, Outdoor environment; Thermal indexes; Thermal complexity; PET index; RayMan model.

אריאל פרוינדליך, המכללה האקדמית אחווה, ariel-fr@bezeqint.net  
Ariel Freundlich, Achva Academic College, ariel-fr@bezeqint.net

## מבוא

התחושה התרמית מוגדרת כתחושת ה-"חום-קור" שחש האדם. ידוע זה מכבר כי התחושה התרמית של האדם אינה תלויה בהשפעתו של משתנה יחיד אלא בהשפעה המשוקללת של שישה גורמים: טמפרטורת האוויר, הקרינה, הלחות היחסית, והרוח, שהינם משתנים אקלימיים-חיצוניים, וכן רמת המטבוליזם של האדם וסוג לבושו, שהינם משתנים התלויים באדם עצמו (גבעוני, 1963). כל הגורמים הללו קובעים, למעשה, את העומס התרמי הפועל על האדם. הערכת ההשפעה המשוקללת של ששת הגורמים הללו אינה פשוטה, שכן הקשרים בין המשתנים הללו מורכבים, ומידת ההשפעה של כל גורם על האדם - תלויה בעוצמתם של הגורמים האחרים (Tromp, 1979, 1980; Mieczkowski, 1985; Givoni, 1974). לכן, הערכת העומס התרמי שמפעילה הסביבה על האדם מצריכה שימוש במדדים תרמיים. מדד תרמי הינו נוסחה או סידרת נוסחאות המאחדים את הגורמים האקלימיים לגורם חדש, סינתטי, המהווה את הבסיס של המדד, כאשר ערכים שווים של המדד התרמי אמורים לבטא עומסי חום זהים, או תחושות תרמיות דומות, אצל בני אדם. מאז שנות ה-20 של המאה הקודמת נעשו מאמצים רבים לפיתוח מדדים תרמיים, לצרכים שונים. המדדים התרמיים המוקדמים והפשוטים התבססו על קשר אמפירי עם משתנה אחד או כמה משתנים מטאורולוגיים, בעוד שהמדדים המאוחרים (מאז אמצע שנות ה-70) התבססו על מודלים ביו-מטאורולוגיים כוללים המחשבים את המאזן הכולל של חילופי החום ביחסי אדם-סביבה, ותוך הדמיית התהליכים הפיסיולוגיים המתרחשים בגוף האדם בתגובה לעומסי חום וקור. רוב המדדים, הן המוקדמים והן המודרניים יותר, תוכננו לשימוש בסביבה "הסגורה" (indoors), ולכן לא הושם בהם דגש על חישוב השפעות קרינת השמש והרוח על מאזן החום של האדם, גורמים העשויים להיות משמעותיים מאוד בסביבה הפתוחה."

בניגוד לתחומי חיים אחרים, בתחום התיירות, הנופש, והפנאי, גורמי מזג האוויר והאקלים עדיין ממלאים תפקיד חשוב ועשויים להוות גורמים מגבילים או גורמי משיכה רבי עוצמה. זאת מפני שחלק ניכר מפעילויות הנופש והתיירות מבוצעות בשטח הפתוח ללא אמצעי מחסה ומיזוג, ובכלל, חלק ממהות התיירות הינו הרצון לחוות את הסביבה באורח בלתי אמצעי. אולם, הערכת העומס התרמי בסביבה הפתוחה, באמצעות המדדים התרמיים הנפוצים, עשויה להיות בעייתית, מפני שמדובר כאמור בסביבה פתוחה, עם חילופי שמש וצל, ומהירויות רוח משתנות - מצב שרוב המדדים אינם יכולים להתמודד עמו. לדוגמא, השירות המטאורולוגי הישראלי משתמש כבשגרה במדד אי הנוחות (Discomfort Index; Thom, 1959) כביטוי לעומס החום בתנאי אקלים שונים; אולם, המדד פותח במקורו לסביבה הסגורה, ומשקלל בתוכו את הטמפרטורה היבשה והטמפרטורה הלחה בלבד, ולכן אינו

נותן ביטוי לעומס התרמי הנוסף בתנאי שמש - לעומת תנאי צל, וכן אינו נותן ביטוי להשפעת הרוח.

בקירוב, מאז שנות ה-90 של המאה העשרים ואילך, התרחב השימוש במדדים מתקדמים ומורכבים יותר המותאמים מחד, גם לסביבה הפתוחה, ומאידך הינם מדדים אוניברסאליים אשר מתחשבים בכל הגורמים המטאורולוגיים הרלוונטיים ומותאמים הן לתנאי עומס חום והן לתנאי עומס קור. מדדים אוניברסאליים בולטים הינם: מדד PET<sup>2</sup> (Höppe, 1993, 1999; Mayer and Höppe, 1987; Matzarakis et al, 1999), מדד UTCI<sup>3</sup> (Jendritzky et al, 2009), ומדד OUT\_ SET<sup>4</sup> (Pickup and de Dear, 2000). חוקרים שונים אכן עשו שימוש במדדים אלו ואחרים, וחלקם (Becker, 1998; Matzarakis et al, 1999; Pochter, et al, 2006; Cohen et al, 2013; Pantavou et al, 2012) אף ביצע חישוב תרמי מרחבי מפורט המסתמך על נתוני קלט מדויקים.

מדד הטמפרטורה הפיסיולוגית השקולה (PET) שהוזכר לעיל, משקלל את המשתנים האקלימיים הרלוונטיים (קרינה, טמפרטורה, רוח, לחות) השוררים בסביבה הממשית הנבחנת למונחים של מעלות °C שוות ערך, ומבטא את השפעתם הפיסיולוגית על האדם. ערך של טמפרטורה בחדר סגור (מוצל, ללא רוח, 50% לחות) שיגרום להשפעה פיסיולוגית זהה לזו המתקבלת בסביבה הממשית המורכבת - הוא מדד הטמפרטורה הפיסיולוגית השקולה. כך למשל, המדד מנבא בקירוב כי שילוב של הגורמים: טמפרטורת אוויר בת 30 מעלות, לחות יחסית של 65%, קרינה האופיינית לצהרי יום בהיר באמצע יוני בישראל, ורוח במהירות 1 מ/ש - ישפיעו על האדם פיסיולוגית כאילו היה בתנאי חדר (ללא רוח, ללא קרינה, 50% לחות) ובטמפרטורה של 44 מעלות. בדוגמא זו, הערך שהתקבל, 44 מעלות °C, הוא ערכה של הטמפרטורה השקולה. שני המדדים האחרים שהוזכרו לעיל (OUT\_SET\*, UTCI) הינם בעלי עקרונות דומים.

חיסרון עיקרי של המדדים האוניברסאליים, נובע ממורכבותם ומהקושי בחישובם, וכן מהצורך בנתוני קלט רבים, אשר בחלקם עשויים להיות מורכבים למדידה, חישוב, או הדמיה. אחד מנתוני הקלט המורכבים הינו "טמפרטורת הקרינה הממוצעת" (T<sub>mrt</sub>), משתנה יסודי אשר יש לחשבו, והנותן ביטוי להשפעה התרמית של הקרינה על עצם כלשהו בסביבה<sup>5</sup>. מחקרים שבוצעו בסביבה הסגורה (Fanger, 1970; Kantor and Unger, 2011; Walikewitz et al, 2015) הניחו למען הפשטות כי בסביבה סגורה הומוגנית T<sub>mrt</sub> שווה בקירוב לטמפרטורת האוויר, אולם כמובן שהנחה זו אינה יכולה להיות תקפה בסביבה הפתוחה והמורכבת מבחינה תרמית. על רקע זה יש לציין את המודל RayMan (Matzarakis et al, 1999, 2000) אשר מאפשר בקלות יחסית את חישוב T<sub>mrt</sub> גם בסביבה הפתוחה, כמו גם חישוב המדד PET ועוד מדדים אוניברסאליים, בעזרת נתוני קלט פשוטים ונגישים. המודל והמדד נבדקו ותוקפו במחקרים שונים (פרוינדליך, 2003;

בתחומים אלו נערכות בסביבה הפתוחה כדבר שבשיגרה. לצורך המחקר נבחרו 7 אתרים, ערים, או אזורים בעלי ערך תיירותי, שעבורם בוצעו הדמיות והערכות של העומס התרמי. האתרים נבחרו על פי הקריטריונים הבאים:

- אתרי תיירות החשופים לגורמי מזג האוויר במידה זו או אחרת.
  - אתרי תיירות מרכזיים וחשובים הנחשבים בעלי כוח משיכה תיירותי רב.
  - אתרים אשר יכולים לייצג סוגי תיירים שונים, מניעים שונים, ופעילויות שונות.
  - אתרים ממקומות שונים בארץ בפריסה מרחבית נאותה, שתוכל לייצג את טיפוסי האקלים העיקריים בארץ.
- בהתאם לקריטריונים אלה נבחרו האתרים או האזורים הבאים (בסוגריים מצוינות דוגמאות לנקודות בעלות עניין תיירותי):
- נצרת (כנסית הבשורה, באר מרים, השוק)
  - קיסריה (הגן הלאומי, הנמל העתיק, חוף הים)
  - תל אביב-יפו (אתרים שונים בעיר, שווקים, פארקים, חופי ים)
  - ירושלים (אתרים שונים בעיר; העיר העתיקה; רחבת הכותל המערבי; הר הבית, עיר דוד)
  - אתרים באזור ים המלח (שמורת עין גדי, אתר מצדה, אזור עין בוקק)
  - מצפה רמון (מייצג אקלימית את אזור הר הנגב)
  - אילת (אתרים שונים בתוך העיר ומחוצה לה: חופי הרחצה, שמורת האלמוגים, פארק הצפרות הבינלאומי, בקעת תמנע)

יש לציין כי על פי סקרי תיירות שונים (משרד התיירות, 2011, 2015) בין 30-80% מהתיירים המגיעים לארץ מבקרים לפחות באחד מהאתרים שצוינו לעיל.

יוזכר שוב, כי כל האתרים שצוינו הינם אתרים פתוחים, ולכן צפויים להיות מושפעים מגורמי מזג אוויר ואקלים, ומאידך, האתרים הללו נחשבים בעלי כוח משיכה תיירותי רב.

## ב. מודל RayMan, נתוני הקלט למודל ואופן ההדמיה

לצורך המחקר הנוכחי נבחר המודל התרמי PET, מפני שהוא נחשב אמין בטווח רחב של מצבים תרמיים, ומותאם במיוחד לסביבה הפתוחה (Cohen et al, 2013). הפלט של מודל PET הינו ביחידות של מעלות צלסיוס שוות ערך. במחקר הנוכחי PET חושב בעזרת המודל RayMan (Matzarakis et al 1999, 2006, 2007, 2010), המותאם ספציפית לחישוב המודל PET (וכן מדדים אוניברסאליים נוספים) בסביבה עירונית או בשטח פתוח, ע"י חישוב או הדמיית הקרינה ואופן השפעתה על העומס התרמי האנושי בסביבה הפתוחה.

נתוני הקלט הדרושים למודל RayMan הינם: הטמפרטורה היבשה ( $C^\circ$ ), הלחות היחסית (%), מהירות הרוח (מ/ש), העננות (שמיניות), קרינת השמש (גלובאלית, ישירה,

(Höppe, 1999; Matzarakis et al, 2000, 2006, 2010), וחוקרים נוספים שנעזרו בהם במחקרים אקלימיים. למשל, כוהן וחובריה (Cohn et al, 2013) השתמשו במודל כדי לכייל את ערכי מדד PET לסולם תחושת באזור האקלים הים-תיכוני; וכן, פוצ'טר וחובריו (2012) השתמשו במודל כדי לאבחן את השפעת הצמחייה על עומס החום בשטחים פתוחים בבאר שבע.

קושי נוסף בתיאור הסביבה התרמית בסביבה הפתוחה באמצעות מדדים מהסוג שהוזכר, נובע מאופי נתוני הקלט המטאורולוגיים עצמם, ומאופי פני השטח של האתרים הנבחרים. ככלל, המשתנים המטאורולוגיים המשפיעים על העומס התרמי הינם בעלי שונות רבה בזמן ובמרחב, ובמיוחד בקנה המידה המיקרו-מטאורולוגי (סקאלה אופקית הפחותה מ-1 ק"מ) הרלוונטי בדרך כלל לגודלם של אתרים תיירותיים (Höppe, 1993). מלבד זאת, האתרים הרלוונטיים לפעילויות נופש או תיירות (רחבה, רחוב עירוני, פארק, אתר עתיקות, שמורת טבע, וכו') רויים על פי רוב בעצמים טבעיים ומלאכותיים אשר יכולים ליצור הצללות שונות מחד, ולהשפיע מאוד על הרוח בגובה הנמוך (1.5 מ'), מאידך. מאפיינים אלה עשויים לשנות ולהטות לגמרי את העומס התרמי הרלוונטי גם בטווחים קצרים מאוד. לכן ייתכן וניתוח מפורט של התנאים התרמיים באתר מסוים – יהיה בעל רלוונטיות מועטה בלבד באתר הסמוך. לאור זאת ייתכן שניתוח תיאורטי כללי של הסביבה התרמית, החותר למציאת חוקיות כללית במרכיבי הסביבה התרמית, עשוי להיות מועיל יותר מאשר ניתוח מפורט (מבוסס תצפיות), שנמדד באתר ספציפי.

בהמשך לדברים אלו המאמר הנוכחי יתרכז בניסיון לאבחון תיאורטי של הגורמים המטאורולוגיים המשפיעים על העומס התרמי בתנאי חוף. בקנה המידה המיקרו-מטאורולוגי, ובחינת ההשפעה היחסית של הגורמים הללו בתנאים האקלימיים האופייניים לתנאי הארץ.

מטרות המאמר הינן: להציג את המורכבות התרמית הרבה בסביבה הפתוחה; לדמות את העומס התרמי בסביבה הפתוחה במצבי צל-שמש ורוח בסיסיים שונים; וכן לאבחן (לצרכים פרקטיים בתחום התכנון, הנופש והתיירות) את העוצמות היחסיות של המשתנים המטאורולוגיים השונים מבחינת השפעתם על העומס התרמי בתנאי האקלים השכיחים בארץ ישראל. (המאמר מתבסס באופן חלקי על נתונים מעבודת דוקטורט של המחבר, פרוינדליך, 2003, בהנחייתם של פרופ' חיים קותיאל וד"ר יואל מנספלד).

## מתודולוגיה ונתונים

### א. האתרים הנבחרים

כפי שצוין במבוא, היישום העיקרי של תוצאות המחקר הנוכחי הינו בתחומי הנופש והתיירות, זאת מכיוון שפעילויות





איור 1: למעלה - המחשת מצב "שמש" ומצב "הצללה חלקית" (מסומנים באותיות A ו-B, בהתאמה); פארק הירקון, תל אביב. למטה - המחשת מצב "צל מלא" (צל של חופת עצים צפופה, מסומן באות C) : פארק הירקון, תל אביב

## ממצאים

### א. בחינת אמינות הדמיות המודל לגבי הקרינה

כאמור לעיל, המודל מחשב את המדד התרמי PET בעזרת נתוני קלט שונים, אחד מהם הינו קרינת השמש הגלובאלית השוררת במקום. היות ולא קיימים נתוני קרינה מדודים ואמינים ברמת העשרת (ממוצע לכל 10 ימים), נעשה לכן שימוש בנתוני הקרינה המחושבים ע"י המודל, כדי לבחון את אמינות הדמיות הקרינה המתקבלות באופן הזה, נערכה סידרת בדיקות שבהן הושוו נתוני קרינה חודשיים ממוצעים מדודים, מול המחושבים, בתחנות שבהן קיימות תצפיות (בית דגן, ירושלים, באר שבע, מצפה רמון, אילת). נמצאו מקדמי מתאם גבוהים מאוד בנתוני הקרינה הגלובאלית (בסדר גודל של  $r=0.98$  בממוצע), וערכים נמוכים יותר בנתוני הקרינה הישירה ( $r=0.76$  בממוצע).

הדמיות המודל נוסו בכייוני עננות שונים: בתחילה בהנחה של שמיים בהירים (0 שמיניות עננות), ואח"כ בהדמיות של 1/8, 2/8 ו-3/8 עננות, בהתאמה, ולבסוף בשילובי עננות המשתנים במהלך חודשי השנה. ההתאמה הטובה ביותר בין

מפוזרת), ונתוני שטח שונים (אלבדו, מתאר פני השטח). הפלט של המודל כולל בין היתר את טמפרטורת הקרינה הממוצעת ( $T_{mrt}$ ), וכמוכן המדד PET. במקרים שבהם נתוני הקרינה חסרים ניתן לחשבם לפי המודל RayMan, באמצעות הנתונים הגיאוגרפיים המדויקים של האתר (תאריך, שעה, אורך ורוחב גיאוגרפיים, כיסוי עננות, גובה מעל פני הים).

לצורך ההדמיות נאספו מתוך פרסומי השירות המטאורולוגי (1983) ממוצעי הטמפרטורה היבשה, והלחות היחסית (לתקופה 1964-79), לכל עשרה ימים (עשרת), במהלך השנה, בשעות הצהריים, מהתחנות המטאורולוגיות הסמוכות לאתרים התיירותיים הנחקרים, ואשר הוזכרו לעיל. בהקשר זה יצוין כי אמנם כבר קיימים נתונים מודרניים יותר, אולם לא ברמת הפירוט המבוקשת, ולא באתרים הרצויים; עם זאת, לאור מטרות המאמר כפי שנוסחו לעיל (אבחון תיאורטי; הצגת המורכבות התרמית), נראה כי גם הנתונים הישנים יהיו מתאימים בהחלט.

המודל הורץ עם נתוני הקלט שהוזכרו – טמפרטורה ולחות יחסית, והנתונים הגיאוגרפיים של האתרים; הקרינה הגלובאלית חושבה ע"י המודל בהתאם לנתוני תאריך ושעה שהוזנו, ובהתאם לתנאי ההצללה; מהירות הרוח, וכיסוי העננות, שימשו כגורמים מוסתים. ברוב ההדמיות הונח אלבדו ממוצע של 0.30 וזאת בעקבות Becker (1998);

### ג. סוגי הצללות

לגבי הדמיות של תנאי צל-שמש, יודגש כי במציאות, בסביבה הפתוחה, קיימים אינספור מצבים תרמיים עם שילובים שונים של תנאי צל ושמש, אשר יוצרים תנאים תרמיים שונים. במחקר הנוכחי הוגדרו ונבחנו 3 מצבי צל-שמש בסיסיים:

1. מצב "שמש", שבו האובייקט הנחקר חשוף לגמרי לקרינת השמש לסוגיה, ללא הצללה כלשהי, וללא הגבלה של קו הרקיע.
2. מצב "צל חלקי", כגון זה השורר ברחובות עירוניים, תחת סככה, או עץ בודד, אשר חוסמים אמנם את קרינת השמש הישירה, אך מאפשרים לקרינת השמש המפוזרת לחדור. יודגש כי מדובר כאן בהנחה כי האובייקט המצל (עץ בודד, סככה) אכן חוסם במלואו את קרינת השמש הישירה.
3. מצב של "צל מלא", כגון זה השורר בתוך מבנה, או תחת גג רחב, החוסמים את קרינת השמש הישירה, באופן מלא, ואת רוב קרינת השמש המפוזרת (בהדמיית מצב זה הונח כי  $T_{mrt}$  יהיה שווה לטמפרטורת האוויר, וזאת בעקבות Walikewitz וחובריו (2015)).

יצוין כי בסביבה הפתוחה, המצב האחרון ("צל מלא") הינו פחות שכיח ביחס למצבים האחרים, ועם זאת עדיין עשוי להתקיים, למשל, בתוך רחוב מחופה בסביבה העירונית, או תחת צל עבות של עצים סמוכים בפארק או שמורת טבע. המחשבות מציאותיות למצבי ההצללה השונים מודגמות באיור 1.

איור 4 מציג את המהלך השנתי של PET בתל אביב, וממחיש את ההבדלים בין תנאי השמש והצל השונים. טבלאות 1א, 1ב מציגות את ההבדלים הממוצעים בין תנאי השמש והצל השונים עבור כלל האזורים שנבחנו. בכל המקרים לעיל, מדובר על הדמיות שבוצעו בהנחה של היעדר רוח ( $V = 0$ ) (m/s). טבלאות 2-4 בהמשך מציגות את תנאי השמש והצל גם עבור הדמיות רוח במהירויות 1-3 מ/ש.

**טבלה 1א:** הבדלים שנתיים ממוצעים בין תנאי שמש וצל (הדמיות רוח = 0 מ/ש)

	PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
תל אביב	24.1	32.1	45.9	22.9	
אילת	30.6	37.1	51.2	30.2	
ירושלים	21.4	27.9	42.5	20.3	
נצרת	22.7	29.9	44.0	21.6	
מצפה רמון	24.8	30.6	45.5	23.9	
עין גדי	29.2	37.1	50.6	28.6	
קיסריה	24.1	32.1	45.8	22.9	
ממוצע	25.3	32.4	46.5	24.3	
ס. תקן	3.1	3.3	3.0	3.4	
שונות	11.2	12.4	10.4	13.5	

**טבלה 1ב:** הבדלים בין תנאי שמש וצל: קיץ וחורף (הדמיות רוח = 0 מ/ש)

	קיץ			חורף			טמפ' אוויר (°C)	
	PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	PET צל מלא	PET צל חלקי		
תל אביב	29.3	40.7	54.1	28.2	17.7	22.8	35.3	16.2
אילת	38.4	48.1	61.4	38.7	21.0	25.1	38.4	19.9
ירושלים	28.9	38.6	52.6	28.2	11.9	16.1	29.7	10.4
נצרת	29.6	40.1	53.7	28.8	13.3	18.1	30.9	11.8
מ. רמון	32.3	41.2	55.3	31.9	15.3	19.0	32.9	13.9
עין גדי	37.4	48.7	61.6	37.5	19.8	25.0	37.3	18.5
קיסריה	29.3	40.7	54.1	28.2	17.7	22.8	35.1	16.2
ממוצע	32.2	42.6	56.1	31.6	16.7	21.3	34.2	15.3
ס. תקן	3.8	3.8	3.5	4.3	3.1	3.3	3.0	3.2
שונות	16.7	16.5	14.2	21.3	11.1	12.5	10.3	11.9

ההדמיות לתצפיות התקבלה כאשר הונח כי בחודשי הקיץ המרכזיים (יוני, יולי, אוגוסט) שוררים שמיים בהירים (0/8 עננות), בחודשי החורף המרכזיים (דצמבר, ינואר, פברואר) שוררים בממוצע שמיים מעוננים חלקית (3/8 עננות), ובשאר החודשים – מצבי ביניים (1/8 עד 2/8 עננות). איור 2, מדגים את ההתאמה המתקבלת בין נתוני הקרינה הגלובלית המדודים והמחושבים עבור בית דגן, לשעות הצהריים, בהנחת שילובי עננות; איור 3 מציג את מקדמי הרגרסיה  $r^2$ , וקווי הרגרסיה, המתארים את הקשר בין הקרינה הגלובלית המחושבת, ובין המדודה - עבור בית דגן.

## ב. ההשפעה התרמית של הצללה

הממצאים ממחישים כיצד הצללה מפחיתה דראסטית את העומס התרמי. למשל, בתל אביב, הטמפרטורה השנתית הממוצעת (טמפרטורת האוויר) הינה 22.8 מעלות צלסיוס, אולם ערכו השנתי הממוצע המחושב של המדד PET היה 45.8 מעלות בתנאי שמש מלאים, 32.1 מעלות בתנאי צל חלקיים, ו-24.1 מעלות בלבד בתנאי צל מלאים. במילים אחרות, מעבר מתנאי שמש מלאים בתל אביב, לתנאי צל חלקיים, מפחית את העומס התרמי בכ-14 מעלות (הפחתה של כ-30% בעומס התרמי). ההבדל נעשה בולט ומוחשי עוד יותר בהדמיית צל מלא ומגיע להפרש של 21.8 מעלות בין תנאי שמש מלאים ובין תנאי צל מוחלט (הבדל המתבטא בהפחתה של כ-47% בעומס החום!).

הבדלים אלו (בין תנאי שמש ותנאי הצל למיניהם) נמצאו דומים בכל האזורים שנבחנו, וערכם הממוצע עמד על 14.1 מעלות PET, כ-30% (הבדל בין תנאי שמש, לתנאי צל חלקי), ו-21.2 מעלות, כ-46% - ההפחתה בעומס החום עקב הצללה מלאה.

כאשר נבחנו ההבדלים בנפרד עבור תנאי קיץ ותנאי החורף (תקופת אמצע יולי ייצגה את תנאי הקיץ; אמצע ינואר ייצג את תנאי החורף) נמצא כי ההבדל הממוצע (לכל האזורים) בחורף, בין תנאי שמש ובין תנאי צל עמד על כ-13 מעלות (הפחתה של כ-37% בעומס החום) במקרה של צל חלקי, אולם הבדל של כ-17 מעלות (כ-51%) במקרה של צל מלא. בקיץ, ההפחתה הממוצעת המקבילה בעומס התרמי נעה בין קרוב ל-14 מעלות – כ-24% (עבור הצללה חלקית), ועד 24 מעלות - כ-43% (עבור הצללה מלאה). שוב, הממצאים ממחישים את ההשפעה הרבה של הצללה על העומס התרמי בסביבה הפתוחה, ומראים כיצד הסתמכות על טמפרטורת האוויר בלבד עשויה להטעות במידה רבה, היות ובאוויר החופשי, טמפרטורת האוויר אינה כמעט בצל או בשמש.

**טבלה 3ב: הבדלים בין תנאי שמש וצל: קיץ וחורף**  
(הדמיות רוח = 2 מ/ש)

קיץ				חורף				
PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
26.4	32.9	38.5	28.2	11.8	14.1	18.8	16.2	תל אביב
39.7	45.2	50.8	38.7	15.7	17.6	23.1	19.9	אילת
25.9	31.4	37.4	28.2	5.6	7.3	12.2	10.4	ירושלים
26.9	32.8	38.7	28.8	7.1	9.0	13.8	11.8	נצרת
30.9	35.9	41.9	31.9	9.3	10.8	16.0	13.9	מ. רמון
38.3	44.6	50.1	37.5	14.3	16.6	21.4	18.5	עין גדי
26.4	32.9	38.5	28.2	11.8	14.1	18.7	16.2	קיסריה
30.6	36.5	42.3	31.6	10.8	12.8	17.7	15.3	ממוצע
5.5	5.4	5.3	4.3	3.4	3.6	3.7	3.2	ס. תקן
35.5	34.5	33.2	21.3	13.5	14.9	15.6	11.9	שונות

**טבלה 2א: הבדלים שנתיים ממוצעים בין תנאי שמש וצל**  
(הדמיות רוח = 1 מ/ש)

PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
20.7	25.8	33.8	22.9	תל אביב
29.6	33.4	41.7	30.2	אילת
19.0	21.7	29.9	20.3	ירושלים
20.4	23.7	31.7	21.6	נצרת
22.8	25.5	33.9	23.9	מצפה רמון
28.0	32.5	40.3	28.6	עין גדי
20.7	25.8	33.8	22.9	קיסריה
23.0	26.9	35.0	24.3	ממוצע
3.8	4.0	4.0	3.4	ס. תקן
17.0	19.1	19.0	13.5	שונות

**טבלה 2ב: הבדלים בין תנאי שמש וצל: קיץ וחורף**  
(הדמיות רוח = 1 מ/ש)

קיץ				חורף				
PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
27.2	35.0	42.4	28.2	13.0	15.9	22.7	16.2	תל אביב
39.5	45.8	53.3	38.7	17.7	19.2	27.1	19.9	אילת
27.7	33.3	41.2	28.2	8.8	9.0	15.9	10.4	ירושלים
28.3	34.7	42.5	28.8	10.3	10.8	17.4	11.8	נצרת
31.9	37.2	45.2	31.9	12.1	12.5	19.6	13.9	מ. רמון
38.3	45.6	52.8	37.5	16.6	18.4	25.5	18.5	עין גדי
27.2	35.0	42.4	28.2	13.0	15.9	22.7	16.2	קיסריה
31.4	38.1	45.7	31.6	13.1	14.5	21.6	15.3	ממוצע
5.0	4.9	4.8	4.3	2.9	3.6	3.8	3.2	ס. תקן
28.7	28.4	26.8	21.3	10.1	14.9	17.0	11.9	שונות

**טבלה 4א: הבדלים שנתיים ממוצעים בין תנאי שמש וצל**  
(הדמיות רוח = 3 מ/ש)

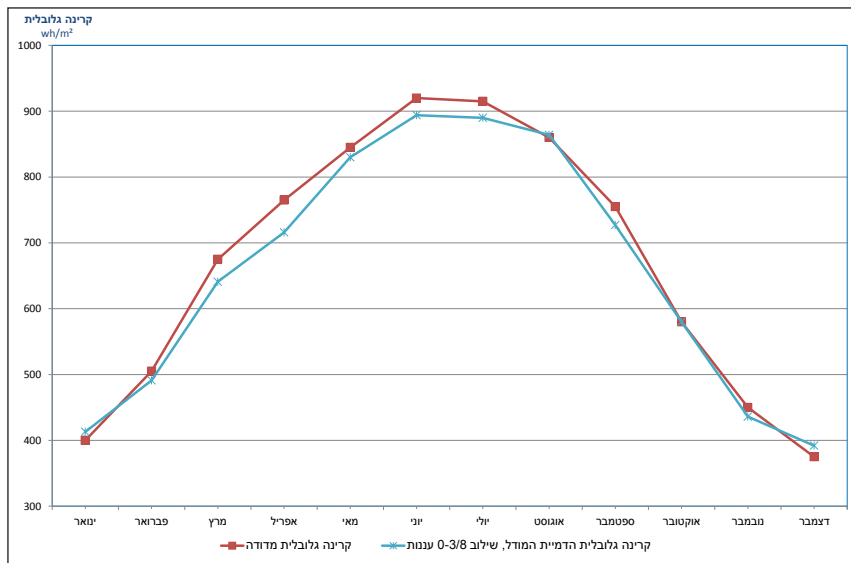
PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
19.0	22.6	27.3	22.9	תל אביב
28.3	31.5	36.6	30.2	אילת
15.9	18.7	23.6	20.3	ירושלים
17.4	20.6	25.4	21.6	נצרת
20.3	22.9	28.0	23.9	מצפה רמון
26.3	30.0	34.9	28.6	עין גדי
19.0	22.6	27.3	22.9	קיסריה
20.9	24.1	29.0	24.3	ממוצע
4.3	4.4	4.5	3.4	ס. תקן
21.4	22.8	23.6	13.5	שונות

**טבלה 3א: הבדלים שנתיים ממוצעים בין תנאי שמש וצל**  
(הדמיות רוח = 2 מ/ש)

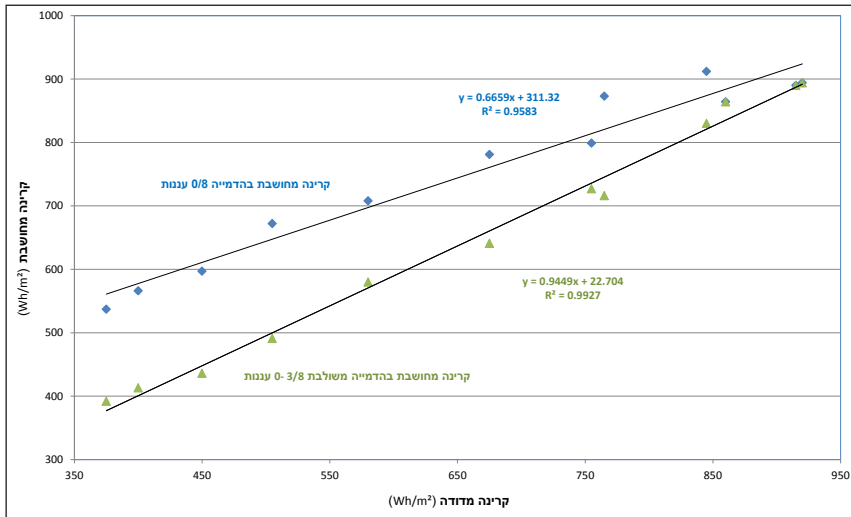
PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
19.6	23.8	29.7	22.9	תל אביב
28.6	32.2	38.5	30.2	אילת
16.6	19.8	25.8	20.3	ירושלים
18.1	21.7	27.7	21.6	נצרת
20.9	23.9	30.2	23.9	מצפה רמון
26.6	30.9	36.9	28.6	עין גדי
19.6	23.8	29.7	22.9	קיסריה
21.4	25.2	31.2	24.3	ממוצע
4.1	4.3	4.3	3.4	ס. תקן
20.0	21.3	22.0	13.5	שונות

**טבלה 4ב: הבדלים בין תנאי שמש וצל: קיץ וחורף**  
(הדמיות רוח = 3 מ/ש)

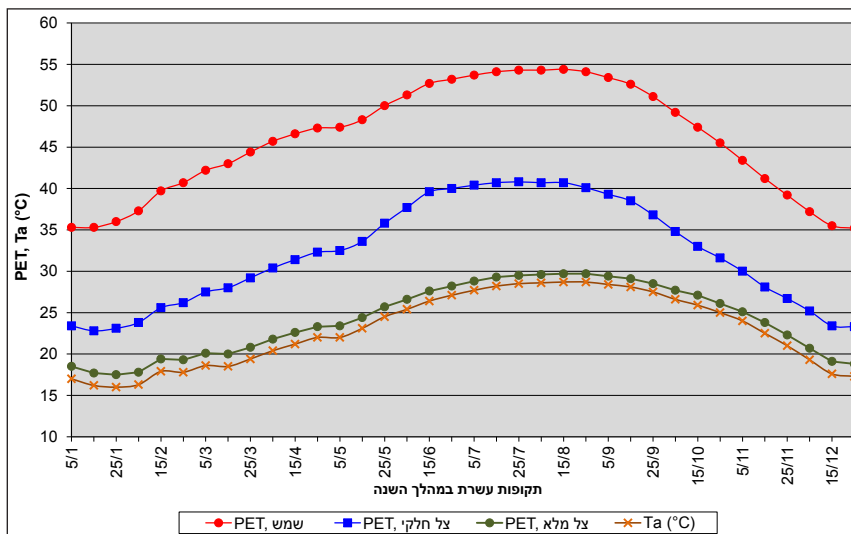
קיץ				חורף				
PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	PET צל מלא	PET צל חלקי	PET שמש מלא	טמפ' אוויר (°C)	
25.8	31.6	36.2	28.2	11.2	13.1	16.9	16.2	תל אביב
39.9	44.8	49.4	38.7	15.1	16.7	20.7	19.9	אילת
25.4	30.2	35.1	28.2	4.9	6.3	10.3	10.4	ירושלים
26.3	31.6	36.4	28.8	6.4	8.0	11.9	11.8	נצרת
30.6	35.0	40.0	31.9	8.6	9.9	14.1	13.9	מ. רמון
38.4	44.1	48.5	37.5	13.6	15.6	19.3	18.5	עין גדי
25.8	31.6	36.2	28.2	11.2	13.1	16.8	16.2	קיסריה
30.3	35.6	40.3	31.6	10.1	11.8	15.7	15.3	ממוצע
5.8	5.8	5.7	4.3	3.4	3.6	3.5	3.2	ס. תקן
39.7	39.1	37.7	21.3	13.8	15.0	14.5	11.9	שונות



איור 2: מהלך שנתי של הקרינה הגלובלית המדודה והמחושבת, בבית דגן, בשעות הצהריים, 2010-2001

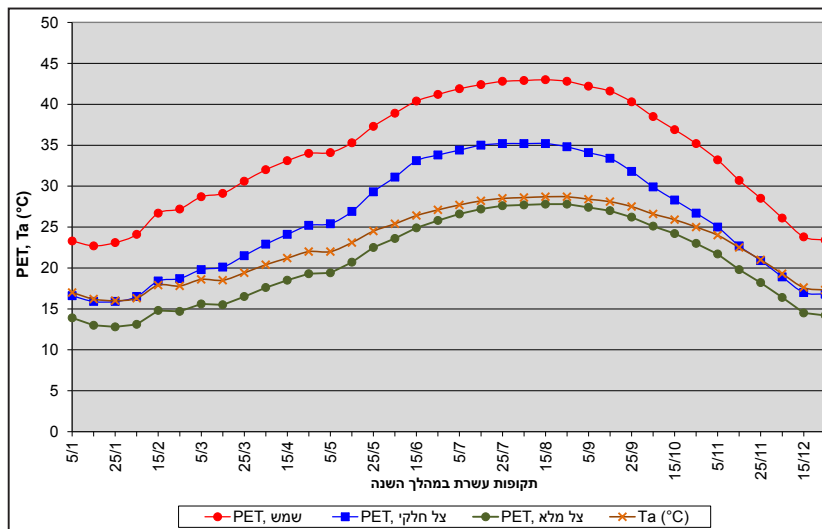


איור 3: קרינה גלובלית מדודה (בית דגן, 2010-2001), ומחושבת (לפי הדמיות המודל)

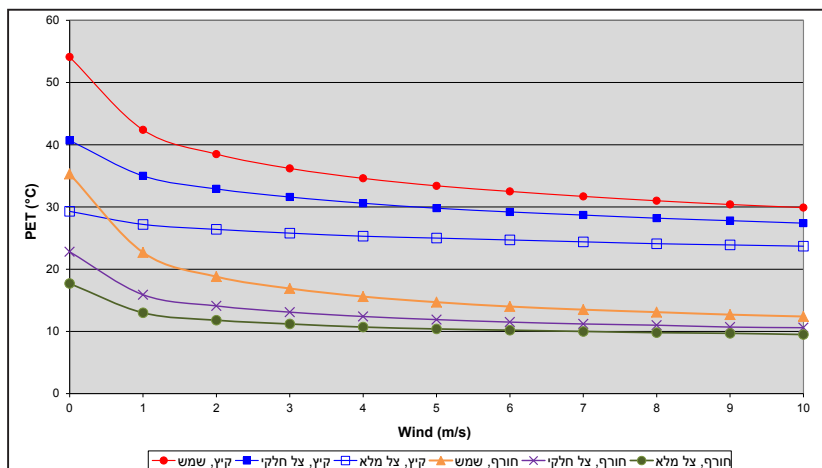


איור 4: הדמית המהלך השנתי של PET בתל אביב בשעות הצהריים (הדמית רוח = 0 מ/ש)

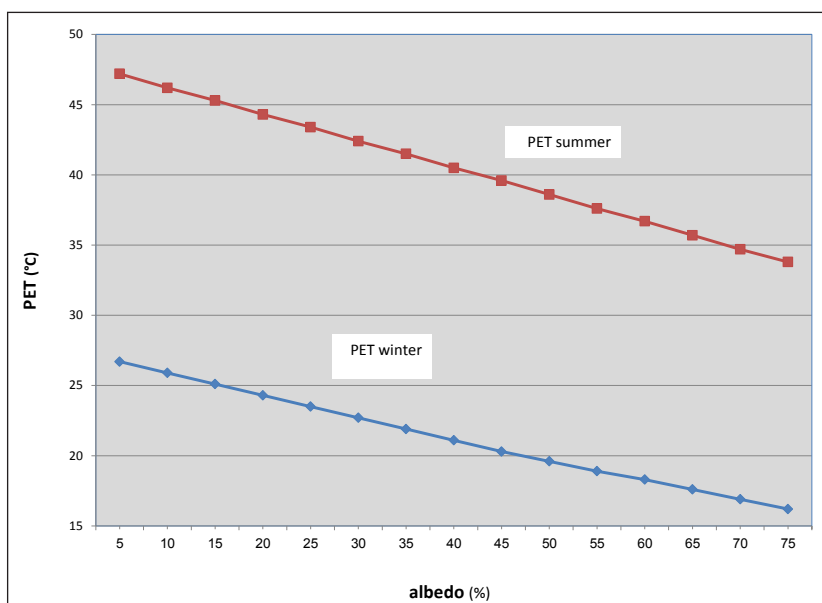




איור 5: הדמיית המהלך השנתי של PET בתל אביב בשעות הצהריים (הדמיית רוח = 1 מ/ש)



איור 6: תל אביב - הדמיית PET לשעות הצהריים, במהירויות רוח שונות, בתנאי קיץ וחורף, שמש וצל



איור 7: תל אביב, קיץ וחורף: השתנות PET בהתאם לאלבדו

## ג. ההשפעה התרמית של הרוח

### ג.1. מצב של היעדר רוח, ומצב של רוח הלשה

עם זאת, הממצאים הראו כי גם לרוח תפקיד חשוב ובלוט בקביעת העומס התרמי בסביבה הפתוחה. כעיקרון, הרוח נמצאה מורידה את העומס התרמי בתנאי חום (מפחיתה מעומס החום). אולם נמצא בנוסף, כי הרוח מטשטשת את הבדלי עומס החום בין מצבי שמש וצל: בתנאי רקע של העדר רוח ( $v=0$  m/s) ההבדלים בין תנאי שמש וצל נמצאו הבולטים ביותר, וככל שמהירות הרוח גדלה – ההבדלים נעשו פחות מובחנים. כך למשל, בתנאי רקע של  $v=0$  ההבדל השנתי הממוצע בין תנאי שמש וצל חלקי, בת"א, עמד על 13.8 מעלות PET (הפחתה של 30% בעומס התרמי), אך הצטמצם להבדל של 7.9 מעלות בתנאי רקע של  $v=1$  m/s (הפחתה של 24%), הבדל של כ-5.9 מעלות בתנאי רקע של  $v=2$  m/s (כ-20% הפחתה), והבדל של כ-4.8 מעלות בהדמיה בה הוערכה מהירות הרוח לפי  $v=3$  m/s (קרוב ל-18% הפחתה). בשאר האתרים הנחקרים, המגמה נמצאה דומה. השפעות הרוח על טשטוש ההבדלים התרמיים בין תנאי צל ושמש נמצאו הן בהשוואת הממוצעים השנתיים של PET, והן בהשוואות שבוצעו בנפרד בתנאי חורף, ובתנאי קיץ.

איור 5 מציג המהלך השנתי של PET בתל אביב, בתנאי רקע של רוח במהירות 1 מ/ש. טבלאות 1-4 מציגות את ההבדלים בין תנאי שמש וצל שונים עבור כלל התחנות, בטווח מהירויות הרוח 0-3 מ/ש.

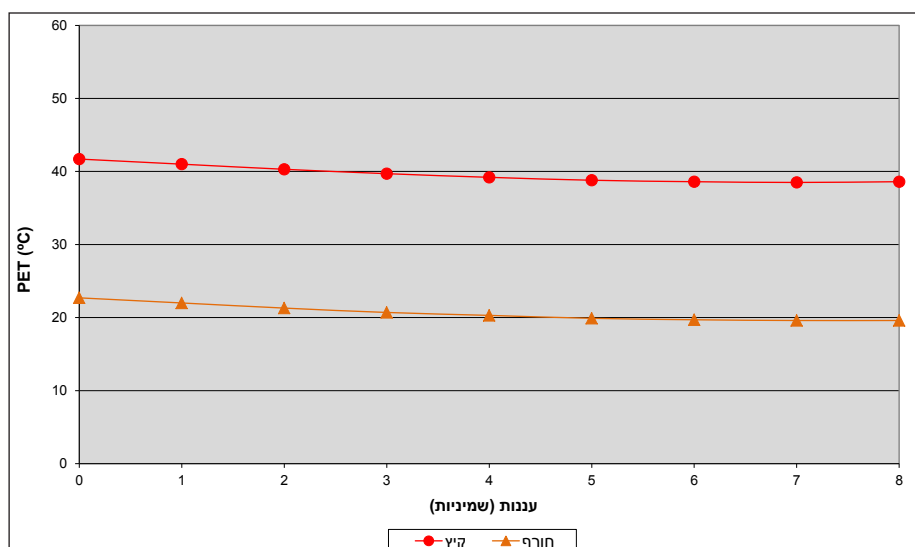
### ג.2. השתנות העומס התרמי בטווח מהירויות הרוח 0-10 מ/ש

כדי לבחון בפירוט את השפעות הרוח על העומס התרמי, בוצעו הדמיות בהן רק מהירות הרוח היתה הגורם שהשתנה,

ונבדקה השפעת הרוח על העומס התרמי בטווח המהירויות 0-10 מ/ש. יודגש כי חלק מהמצבים התרמיים שנבחנו עשויים להיות תיאורטיים בלבד, שכן רוח במהירות 10 מ/ש (כ-36 קמ"ש) בגובה 1.5 מ' אינה שכיחה, וסביר להניח כי תגרום למצב חוסר נוחות עבור האדם יותר בגלל האפקט המכני-פיסי, מאשר האפקט התרמי. כמו כן, סביר להניח כי מקום המוגן לגמרי מקרינת השמש (מצב "צל מלא") - עשוי גם להיות מוגן חלקית מהרוח. נמצא כי השפעת הרוח על העומס התרמי חלה בעיקר בטווח המהירויות 0-3 מ/ש, כאשר מתוך זה – עיקר ההשפעה חל בטווח 0-1 מ/ש. מעל 3 מ/ש, עדיין הרוח נמצאה משפיעה, אולם ההשפעה היחסית הלכה והצטמצמה לאחוזים בודדים. איור 6 מדגים את ההשפעה של הרוח על העומס התרמי בטווח המהירויות 0-10 מ/ש, עבור ת"א. בשאר האתרים הנחקרים, המגמה נמצאה דומה מאוד.

### ד. ההשפעה של האלבו

העומס התרמי נבחן גם בתנאי אלבו שונים בפני השטח. כצפוי נמצא כי ככל שהאלבו גדל בערכו (כלומר, % הקרינה המוחזרת גדל), כך ערכי המדד התרמי PET הולכים וקטנים באופן ליניארי (איור 7). למשל, עבור תל אביב התקבלו בקיץ, ערכי PET של כ-47 מעלות, בהדמיית אלבו ממוצע 5%. ערך המקביל לאלבו של משטח אספלט וחדש; אולם עבור הדמיית אלבו ממוצע של 30% (השווה בערכו לאלבו הפלנטרי הממוצע) התקבלו ערכי PET של כ-42 מעלות, ובמקרה של אלבו השווה לכ-70-75% (ערך המתקבל במצב של משטחים לבנים, כגון גגות מסוידים, או משטחי שלג) ערך ה-PET צנח ל-34 מעלות בקירוב. כלומר, משטח לבן מפחית את העומס התרמי ביחס למשטח שחור בכ-13 מעלות PET (הפחתה של קרוב ל-28% בעומס התרמי).



איור 8: תל אביב - הדמיות PET בשעות הצהריים, במצבי עננות שונים, קיץ וחורף (בהדמיית רוח = 1 מ/ש; טמפרטורת קיץ ממוצעת  $28.2^{\circ}\text{C}$ ; טמפרטורת חורף ממוצעת  $16.2^{\circ}\text{C}$ )

## ה. ההשפעה התרמית של העננות

במקביל, נבחנה גם ההשפעה התרמית התיאורטית של כסות העננות. השפעה זו נמצאה קטנה ביחס: בתל אביב, בתנאי חורף, כיסוי עננות מלא הקטין את עומס החום ב-3.2 מעלות ביחס למצב של שמיים בהירים לגמרי (הפחתה של 13.6% בעומס החום), ובתנאי קיץ ההבדל היה 3.1 מעלות (הפחתה של 7.4% בעומס התרמי). בתחנות האחרות נמצאו ממצאים דומים. אזור 8, ממחיש את השפעת העננות על העומס התרמי בת"א, בתנאי קיץ וחורף.

## ו. המורכבות התרמית: ההשפעה התרמית המשולבת בתנאי צל-שמש, רוח, ועננות על מדד PET, בקיץ ובחורף - טבלאות סיכום

כדי לבחון את ההשפעה המשולבת של כל הגורמים שהוזכרו לעיל (חילופי צל-שמש, מהירויות רוח שונות, ותנאי עננות שונים), ותחת ההבנה כי הרוח כגורם רקע הינה משמעותית מאוד, וקובעת גם את השפעות הגורמים הנוספים, נבחנו הללו במהלך שתי סדרות של בדיקות: האחת, בתנאי רקע התחלתיים אחידים של רוח חלשה (מהירות 1 מ/ש), והשנייה בתנאי רקע התחלתיים אחידים של היעדר רוח (0 מ/ש). בשתי הסדרות הללו נבחנו ההשפעות על העומס התרמי של שינויים קטנים וגדולים<sup>6</sup> במשטחים הקלימטולוגיים המלווים (צל-שמש, רוח, עננות), וזאת בנפרד עבור תנאי חורף אופייניים ממוצעים, ותנאי קיץ אופייניים ממוצעים. בחינת ההשפעה התרמית המשולבת בוצעה על הממוצעים של כלל האתרים שנסקרו במחקר. התוצאות מוצגות בטבלאות הסיכום 5-6, ומהן עולה כי, לפחות בתנאים האקלימיים של הארץ, הן ההצללה והן הרוח הינם גורמים דומיננטיים ביותר, העשויים להפחית את העומס התרמי בסדר גודל של 50%-20, ובתנאים מסוימים ההפחתה מגיעה אפילו עד 63%. השפעת העננות נמצאה קטנה באופן יחסי - סדר גודל של כ-16%-5 הפחתה בעומס התרמי, לכל היותר.

**טבלה 5: השפעת שינויים בתנאי צל-שמש, רוח, ועננות על מדד PET – בקיץ, ובחורף (בתנאי רקע של רוח = 1 מ/ש) \***

א: השפעת שינויים קטנים בהצללה, רוח, ועננות

המשתנה	מהות השינוי	ערך השינוי בחורף	ערך השינוי בקיץ
צל-שמש	שינוי ב-PET במעבר מתנאי שמש לתנאי צל רגילים	הפחתה של 7.4 מעלות (-35%)	הפחתה של 8.7 מעלות (-19%)
רוח	שינוי ב-PET במעבר מ-1 מ/ש, ל-3 מ/ש	הפחתה של 5.9 מעלות (-28%)	הפחתה של 5.2 מעלות (-46%)
עננות	שינוי ב-PET במעבר מ-0/8 עננות ל-4/8 עננות	הפחתה של 2.2 מעלות (-11%)	הפחתה של 2.3 מעלות (-5%)

ב: השפעת שינויים גדולים בהצללה, רוח, ועננות

המשתנה	מהות השינוי	ערך השינוי בחורף	ערך השינוי בקיץ
צל-שמש	שינוי ב-PET במעבר מתנאי שמש לתנאי צל מלאים	הפחתה של 9.9 מעלות (-46%)	הפחתה של 14.2 מעלות (-31%)
רוח	שינוי ב-PET במעבר מ-1 מ/ש, ל-6 מ/ש	הפחתה של 8.8 מעלות (-42%)	הפחתה של 8.2 מעלות (-46%)
עננות	שינוי ב-PET במעבר מ-0/8 עננות ל-8/8 עננות	הפחתה של 2.9 מעלות (-14%)	הפחתה של 2.5 מעלות (-6%)

\* בהדמיות צל-שמש ועננות הוצב ערך קבוע למהירות הרוח = 1 מ/ש; הדמיות צל-שמש ורוח בוצעו בהנחה של 0/8 עננות; כל ההדמיות בוצעו עבור השעה 13:00; הדמיות קיץ בוצעו עבור אמצע יולי, הדמיות חורף בוצעו עבור אמצע ינואר; ערכי השינויים המופיעים בטבלה מבטאים את השינוי הממוצע של כל האתרים.

## דיון

### א. הדמיות הקרינה ע"י המודל

במחקר הנוכחי נעשה שימוש רחב בהדמיות תיאורטיות של הקרינה – באמצעות המודל RayMan לצורך חישוב המדד התרמי. אמנם התקבלו התאמות טובות מאוד בחישובי הקרינה הגלובאלית אולם אין ספק שתמיד עדיף להשתמש בנתוני קרינה אמתיים – מדודים. יצוין עם זאת כי מדידות קרינה אמיתיות ולטווח זמן ארוך מצויות רק עבור חלק מהאתרים הנחקרים, ובד"כ לא ברמת הפירוט הרצויה. לכן, בהתחשב בקורלציה הגבוהה בין ההדמיות לנתונים המדודים, נראה שההדמיות שבוצעו יכולות בהחלט למלא את החסר במקרה הנוכחי.

### ב. סוגי ההצללות

בסביבה הפתוחה יש משמעות רבה להשפעתה של קרינת השמש על העומס התרמי. אולם, כאמור, עוצמת הקרינה תלויה מאוד בעובדה האם האובייקט הנחקר מצוי בשמש או בצל, ומה אופי ההצללה. יצוין כי בסביבה הפתוחה, עשויים להתקיים אופנים רבים של מצבי צל ושמש – ולכולם עשויה להיות השפעה ניכרת על הקרינה ועל העומס התרמי. לאור זאת, נראה לכאורה כי כדי לקבל את הקרינה המדויקת בכל נקודה באתר, נדרשות מדידות מפורטות רבות באתר הנחקר, או לפחות ביצוע הדמיות אשר ייקחו בחשבון את כל פרטי האתר המשפיעים על ההצללה (טופוגרפיה, עצים, בנינים, ומצגם ביחס לנקודה הנבחנת). בגישות אלו נקטו למשל Cohen et al, 2013; Lay et al, 2014; Matzarakis et al, 1999; Pantavou et al, 2013.

במחקר הנוכחי ננקטה גישה אחרת. נבחנו כאן רק שלושה מצבים בסיסיים של יחסי צל-שמש המהווים למעשה מצבי גבול בסביבה הפתוחה: הצללה מינימאלית - מצב שמש, ללא צל, שבו הקרינה הגלובאלית מגיעה לשיאה, והאובייקט חשוף

**טבלה 6:** השפעת שינויים בתנאי צל-שמש, רוח, ועננות על מדד PET – בקיץ, ובחורף (בתנאי רקע של רוח = 0 מ/ש) \*\*

א: השפעת שינויים קטנים בהצללה, רוח, ועננות

המשתנה	מהות השינוי	ערך השינוי בחורף	ערך השינוי בקיץ
צל-שמש	שינוי ב-PET במעבר מתנאי שמש לתנאי צל רגילים	הפחתה של 13.4 מעלות (-39%)	הפחתה של 15.0 מעלות (-27%)
רוח	שינוי ב-PET במעבר מ-0 מ/ש, ל-3 מ/ש	הפחתה של 18.7 מעלות (-55%)	הפחתה של 15.3 מעלות (-56%)
עננות	שינוי ב-PET במעבר מ-0/8 עננות ל-4/8 עננות	הפחתה של 4.1 מעלות (-12%)	הפחתה של 4.6 מעלות (-8%)

ב: השפעת שינויים גדולים בהצללה, רוח, ועננות

המשתנה	מהות השינוי	ערך השינוי בחורף	ערך השינוי בקיץ
צל-שמש	שינוי ב-PET במעבר מתנאי שמש לתנאי צל מלאים	הפחתה של 17.9 מעלות (-53%)	הפחתה של 23.4 מעלות (-42%)
רוח	שינוי ב-PET במעבר מ-0 מ/ש, ל-6 מ/ש	הפחתה של 21.5 מעלות (-63%)	הפחתה של 18.3 מעלות (-56%)
עננות	שינוי ב-PET במעבר מ-0/8 עננות ל-8/8 עננות	הפחתה של 5.6 מעלות (-16%)	הפחתה של 5.8 מעלות (-10%)

\*\* בהדמיות צל-שמש ועננות בטבלה זו, הוצב ערך קבוע למהירות הרוח = 0 מ/ש; כל שאר הפרטים בטבלה הינם כמו בטבלה 5.

הרוח מורידה את ה-PET), במיוחד בטווח המהירויות 0-3 מ/ש, כאשר בתוך טווח זה עיקר ההשפעה חל במעבר בין המהירויות 0 עד 1 מ/ש. נשאלת השאלה האם השפעה גדולה זו הינה ריאלית, והאם יש לכך השלכה מעשית בהדמיות PET בתנאי חוץ (outdoors) כאשר מהירות הרוח אינה ידועה במדויק. בספרות העוסקת בתחום הביו-מטאורולוגיה (Fanger, 1970; Gagge, et al, 1970, Höppe, 1993) או בתחום ההנדסה (Zhang et al, 2011) מתוארת תופעה דומה ושם מצוין כי הדבר נובע בעיקר מהסעת החום (קונוקציה) שנגרמת בשל משבי הרוח. מקדמי חילוף החום (Heat transfer coefficients) הקובעים השפעה זו, משתנים עם מהירות הרוח, אולם לא באופן רציף: במהירות רוח הגבוהה מ-1-2 מ/ש האפקטיביות של חילוף החום יורדת בצורה חדה, ובכך השפעתה היחסית של הרוח על המאזן התרמי קטנה באופן ניכר, כפי שמודגם באיור 6.

יש להדגיש, עם זאת, כי מדובר בהשפעה יחסית, דהיינו בוודאי שככל שמהירות הרוח גוברת תגבר עוצמת הקירור שלה - רוח במהירות 3 או 4 מ/ש מקררת יותר מאשר רוח במהירות 2 מ/ש - אלא שהתוספת היחסית של קירור זה קטנה בהרבה (יש לציין עם זאת כי במצבים שבהם טמפרטורת האוויר עולה על טמפרטורת העור הממוצעת, דהיינו כ-35°C-33, הרוח הופכת להיות גורם מחמם, אלא שהשפעת החימום במקרה זה הינה קטנה מאוד, פחות מחצי מעלה, וניכרת רק בשילוב של טמפרטורות קיצוניות, מעל 50°C, ורוחות חזקות). באורח מעשי, כאשר עוסקים בתנאי חוץ, צפוי כי מהירות הרוח לא תפחת בדרך כלל מ-1 מ/ש. על סמך הנחה זו, ולאור הידוע מהמחקרים הביו-מטאורולוגיים שהוזכרו לעיל, ניתן, כקירוב טוב, לצמצם את בעיית ידיעת מהירות הרוח לטווח המהירויות 1-2 מ/ש.

ממצא נוסף שעלה מהדמיות הרוח היה טשטוש ההבדלים בין מצבי שמש וצל, ככל שמהירות הרוח גוברת. לכאורה הדבר נראה בלתי מובן שכן ההבדל העיקרי בין מצב שמש ומצב צל הוא קרינת השמש הישירה (קיימת במצב שמש, לא קיימת

הן לקרינה הישירה והן לקרינה המפוזרת; הצללה בינונית - הצללה של אובייקט בודד, שבה הצל שמטיל האובייקט חוסם לגמרי את הקרינה הישירה, אך אינו מונע את מעבר הקרינה המפוזרת; והצללה מלאה - המצמצמת למינימום גם את הקרינה המפוזרת, ומתבטאת בכך שטמפרטורת הקרינה (T<sub>air</sub>) של הסביבה תשתווה בערכה לטמפרטורת האוויר. מצב אחרון זה אופייני יותר לסביבה עירונית צפופה המטילה צל בכל הכיוונים (כגון רחובות צרים המוקפים בנינים גבוהים) או סביבה של צמחייה עבותה המטילה צל מרובה בכל הסביבה.

לכאורה, שתי הגישות שהוצגו קודם לכן עדיפות, עקב דיוקן הרב יותר, עם זאת, גישות אלו הינן עתירות זמן ומשאבים. בנוסף, ייתכן ודווקא רמת הפירוט הגבוהה שלהן - היא חולשתן העיקרית: הן עשויות לתת תמונה פרטנית מאוד אשר תהיה ייחודית לאתר הספציפי הנחקר, ולא בהכרח תלמדנו על הנוחות התרמית באתר סמוך, עקב השונות והגיוון הרב של מצבי הצללה והמורכבות התרמית הנגזרת מכך. לאור חסרונות אלו, ייתכן והגישה שנקטה במחקר הנוכחי (בחינת שלושה מצבי הצללה בסיסיים) עשויה להיות עדיפה.

### ג. ההשפעה הרבה של הרוח על העומס התרמי

יצוין כי הרוח נחשבת משתנה כאוטי למדי, עם שונות מרחבית ועיתית גדולה, ולכן הינה קשה למיצוע בצורה מהימנה. זאת ועוד, כפי שנאמר במבוא, האתרים התיירותיים מהסוג הנחקר, רוויים בדרך כלל במתקנים ומכשולים מלאכותיים אשר עשויים להשפיע מאוד, או אף להטות לגמרי את הרוח בגובה הנמוך (כ-1.5 מ'). לכן, ספק אם גם נתוני רוח מדודים מתחנה מטאורולוגית אמינה, וסמוכה - יוכלו לייצג את אשר קורה בפועל באתר התיירותי בקנה המידה המיקרו-מטאורולוגי. לאור זאת, הועדף במחקר הנוכחי לבצע סדרת הדמיות עם טווח של מהירויות רוח שונות ולנסות להסיק מטווח זה.

מההדמיות אשר בוצעו, נמצא כי הרוח הינה גורם דומיננטי מאוד בהשפעתה על ה-PET (ככלל, עלייה במהירות

ההצללה ע"י העננות תמשך פרק זמן ממושך (דיו), ובהמשך לירידת ה-Tmrt וטמפרטורת האוויר: תהליכים שעשויים לגרום לירידה ניכרת יותר של PET.

### סיכום ומסקנות

המחקר הנוכחי מנתח באופן תיאורטי את העומס התרמי, בסביבה הפתוחה בתנאי ישראל, במספר אתרי תיירות פתוחים, ובמגוון מצבים תרמיים אפשריים, וממחיש את המורכבות התרמית בסביבה הפתוחה. ממצאי המחקר ממחישים באופן ברור את השפעתן הרבה של הצללה והרוח על העומס התרמי בסביבה הפתוחה: נמצא כי הן הצללה והן הרוח עשויים להיות גורמים משמעותיים ביותר בסביבה הפתוחה (הפחתה של עד 63% בעומס התרמי עבור הרוח, ועד כ-52% במקרה של הצללה). ההשפעה של האלבדו של פני השטח על העומס התרמי, נמצאה בינונית (הפחתה של עד 28% בעומס התרמי), והשפעת העננות נמצאה קטנה יחסית (עד 16% הפחתה). היות שכל הגורמים הללו (קרניה והצללה, רוח, אלבדו, עננות) אינם פועלים בנפרד אלא בצורה משולבת, הדבר מעצים את המורכבות התרמית בסביבה הפתוחה. למרות זאת, ממצאי המחקר תורמים להבנה טובה יותר של הסביבה הפתוחה מבחינת התנאים התרמיים, ומאפשרים את הערכת עוצמתם היחסית של המשתנים הנחקרים על העומס התרמי, בתנאים האקלימיים של ארץ ישראל.

לאור הממצאים מהמחקר הנוכחי, ולאור ממצאים ממחקרים אחרים (Shahidan et al, 2010; Sarat and Eusuf, 2012; Li et al, 2013; Lee et al, 2013), עולה האפשרות לעיצוב הסביבה התרמית בסביבה הפתוחה. בסקאלה המיקרו-מטאורולוגית הרלוונטית לגודלם של אתרים תיירותיים, בהחלט ניתן לתכנן משטחי צל מתאימים (סככות, עצים, בנינים מצלים) אשר יוכלו להפחית בצורה דרמטית את העומס התרמי בתקופות החמות. עלות הקמת משטחי הצל הינה זולה יחסית ותועלתם מרובה מאוד. מוצע במקרה זה להקפיד על פיזור נכון של משטחי צל ושמש לסירוגין, כך שהמבקרים באתר יוכלו לבחור האם לשהות בצל או בשמש, ובכך לעצב לעצמם כרצונם את התנאים התרמיים בהתאם לעונות השנה ותנאי מזג האוויר השוררים במקום. עיצוב האלבדו של האתר הנבחן עשוי להיות מועיל אף הוא. הוספת משטחים בהירים, והפחתה במשטחים כהים מסייעים להקטנת עומס החום בתקופה החמה. בנוסף, בסביבה העירונית, תכנון נכון של השטחים הבנויים וחומרי בנייה עשוי גם הוא לסייע בהפחתת עומס החום בתנאי הקיץ. הגדלת הנוחות התרמית יכולה להתקבל מחד, על ידי צמצום משטחים בנויים והפחתה של חומרים בעלי קיבולת חום גבוהה כגון אספלט ובטון, ומאידך, באמצעות הגדלתם של משטחי צמחייה כגון עצים או דשאים (Pochter et al, 2006; Shahidan and Jones, 2008; Thani et al, 2012; פוצ'טר וחובריו, 2012).

תכנון אקלימי של אתרים תיירותיים עשוי לסייע אף בעיצוב

במצב צל), ולרוח אין כל השפעה על קרינה זו. אולם, יש לזכור כי בנוסף להשפעתה של הרוח ישירות על גוף האדם (קירור ע"י הסעה), יש לרוח השפעה דומה על הסביבה: הרוח עשויה לקרר גם את המשטחים הקורנים שמסביב לאדם, ובכך להפחית את ה-Tmrt של הסביבה. במצב של העדר רוח, המשטחים אשר שרויים בשמש יתחממו מאוד בהשוואה למצב צל; אולם רוח חזקה תגרום לחילופי חום יעילים בין משטחי הצל והשמש, ותשטט את הבדלי הטמפרטורה ביניהם, דבר שיתבטא בצמצום הבדלי ה-Tmrt וה-PET בין מצבי שמש וצל, עם הגברת מהירות הרוח, כפי שאכן נמצא בהדמיות הרוח.

מכאן שהרוח הינה גורם חשוב ביותר בהשפעתה על העומס התרמי, שכן בנוסף להשפעתה הישירה היא גם תורמת להפחתה או העצמה של גורמים אחרים (למשל תנאי רקע של חוסר רוח מעצימים את השפעת הצללה והעננות, בהשוואה לתנאי רקע של רוח במהירות 1 מ/ש).

### ד. ההשפעה התרמית של העננות

הממצאים הראו כי העננות אמנם מורידה את מדד ה-PET אולם השפעתה זו הינה קטנה יחסית. גם ממצא זה נראה לכאורה לא מובן, שכן ידוע כי העננות מורידה באופן ניכר את הקרינה הישירה והגלובאלית המתקבלת בפני האדמה. כך למשל, על פי ההדמיות שבוצעו, נמצא כי בצהרי יום קיץ, במצב של שמיים בהירים, תתקבל בנצרת קרינה גלובאלית של  $894 \text{ W/m}^2$  וקרינה ישירה של  $686 \text{ W/m}^2$ . לעומת זאת, במצב של שמיים מעוננים לגמרי, הקרינה הגלובאלית תצטמצם ל-  $250 \text{ W/m}^2$  והקרינה הישירה ל- 0. ממצאים דומים התקבלו גם בתחנות ואזורים אחרים, הן בהדמיות והן בתצפיות. מדוע אם כן, המדד מושפע פחות ע"י העננות? נראה כי ההסבר לכך תלוי באופן חישוב מדד ה-PET. מדד זה מבוסס על מודל ביו-מטאורולוגי המחשב את מאזן האנרגיה בין האדם וסביבתו. מאזן זה מחושב עבור אדם עומד. במצב זה, שטח פני הגוף החשוף לקרינה ישירה של השמש, הינו מצומצם יחסית, והדבר בולט דווקא במצבים שבהם זווית השמש הינה גבוהה מעל לאופק (למשל בצהרי היום, בקיץ, בא"י).

במקביל לפחיתת הקרינה הישירה העננות דווקא גורמת להגברת הקרינה המפוזרת (כיסוי עננות מלא עשוי להגביר את הקרינה המפוזרת בכ- 25-30%, ביחס למצב של שמיים בהירים), וזו דווקא משפיעה על שטח גוף גדול יחסית במצב של אדם עומד. לפיכך, שני הגורמים הללו - הגברת הקרינה המפוזרת מחד, ושטח פנים אפקטיבי מצומצם לקרינה הישירה מאידך - תורמים יחד להשפעה מתונה של העננות על מדד ה-PET. עם זאת, צריך לסייג קביעות אלו, שכן בהדמיה שבוצעה כאן הונח שהגברת העננות לא תשפיע על טמפרטורת האוויר; במציאות, הפחתת הקרינה עקב העננות עשויה להביא גם לירידה של טמפרטורת פני השטח (אם



## מקורות

גבעוני, ב. 1963. הערכת השפעת האקלים על האדם: פיתוח אינדקס תרמי חדש. התחנה לחקר הבנייה, הטכניון.

השירות המטאורולוגי הישראלי, 1983. עיבודים אקלימיים רב שנתיים, 1964-79. כרך א' (טמפרטורה ולחות יחסית), סדרה א', מס' 41, בית דגן.

משרד התיירות, 2011. סקר תיירות נכנסת: דו"ח שנתי 2010.

משרד התיירות, 2015. סקר תיירות נכנסת: דו"ח שנתי 2014.

פוצ'טר, ע., יעקב, י., בר (שעשוע), ל., כהן, ש., טנאי, י., בר (קוחיאל), פ. 2012. מיתון עומס חום בערים מדבריות באמצעות צמחים - באר שבע כמקרה בוחן. אקולוגיה וסביבה, 1, 33-43.

פרוינדליך, א. 2003. הערכת אקלים ישראל על פי קריטריונים תיירותיים. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, אוניברסיטת חיפה, חיפה.

Becker, S. 1998. Heat-stress regions in Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, 59, 251-259.

Cohen, P., Potchter, O., and Matzarakis, A. 2012. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment*, 51, 285-295.

Cohen, P., Potchter, O., and Matzarakis, A. 2013. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37, 1-10.

Fanger, P.O. 1972. *Thermal Comfort: analysis and Application in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Gagge, A.P., Stolwijk, J.J., and Nishi, Y. 1970. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 70, 247-257.

Givoni, B. 1974. Prediction of human subjective response to thermal stress. In: Tromp, S.W. (ed.), *Progress in Biometeorology*, Vol 1 Part 1A, Amsterdam: Swets and Zeitlinger, 146-152.

Höppe, P.R. 1993. Heat balance modeling. *Experientia*, 49, 741-746.

Höppe, P.R. 1999. The physiological Equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.

Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P. and Batchvarova, E. (eds) 2009. Towards a Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessing the thermal environment of the human being. Final Report, COST Action, Bruxelles.

Kántor, N. and Unger, J. 2011. The most problematic variable in the course of human-bio-meteorological comfort assessment - the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3(1), 90-100.

Kofoed, N.U. and Gaardsted, M. 2004. Consideration of the wind in open spaces. In: Nikolapoulou, M. (Ed.): *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S.), pp. 7-11.

תנאי הרוח המשפיעים גם הם דרמטית על העומס התרמי. שוברי רוח ניידים בסביבה פתוחה עשויים להפחית את מהירות הרוח ובכך להפחית מאוד את תחושת הקור בתקופות של עומס קור (פעולה כזו אכן ננקטת במקומות שונים בעולם, בעיקר בחופי רחצה). מאידך, תכנון עירוני של רחובות במקביל לכיוון הרוח השכיחה, עשוי לתעל את הרוח, וליצור תנאים תרמיים קרירים הנדרשים בעונה החמה (Kofoed and Gaardsted, 2004). חשוב לציין כי בכל הדוגמאות לעיל (עיצוב הצללה; עיצוב אלבדו; עיצוב משטחי צמחייה; עיצוב הרוח) צריך להתחשב גם בגורם האסתטי העשוי להיות חשוב מאוד באתרים תיירותיים ועירוניים. בנוסף, נדרשים מחקרים נוספים הן בתחום הקלימטולוגי, והן בתחום התכנון העירוני והסביבתי, כדי להבין טוב יותר את אפשרויות הגלומות בעיצוב התרמי של אתרים בסביבה הפתוחה.

## הערות

1. בסביבה הפתוחה יש להבחין בין סוגי הקרינות: קרינה קיצרת גל מהשמש (מכונה קרינה גלובאלית, ונחלקת לרכיבים: קרינה ישירה, וקרינה מפורזת); קרינת השמש המוחזרת מעצמים בסביבה - גם היא קיצרת גל; וקרינה ארוכת גל הנפלטת מהאדמה; כל הקרינות הללו משפיעות, באופנים שונים, על העומס התרמי המופעל על האדם.

2. PET: Physiological Equivalent Temperature

3. UTCI: Universal Thermal Climate Index

4. SET: Standard Effective Temperature

5.  $T_{mrt}$  הינו מדד יסודי בתחום הביו-מטאורולוגיה ומשמש להערכת הקרינה של הסביבה במונחים של טמפרטורה. מדד זה מוגדר על ידי Mather (1974) "כטמפרטורה הממוצעת המשוקללת על בסיס פליטת הקרינה של כל המשטחים המקיפים את הגוף הנבחן".

6. שינוי קטן בהצללה הוגדר כמעבר מתנאי שמש לתנאי צל חלקיים; שינוי גדול בהצללה הוגדר כמעבר מתנאי שמש לתנאי צל מוחלט. שינוי קטן ברוח הוגדר כמעבר מרוח במהירות 0 או 1 מ/ש, למהירות 3 מ/ש; שינוי גדול ברוח הוגדר כמעבר מרוח במהירות 0 או 1 מ/ש - למהירות של 6 מ/ש. שינוי קטן בעננות הוגדר כמעבר משמיים בהירים, לשמיים מעוננים חלקית (4/8 עננות); שינוי גדול בתנאי עננות הוגדר כמעבר משמיים בהירים לשמיים מעוננים לגמרי.

7. עם זאת, וכפי שנמצא בחלק מהמחקרים המצוטטים לעיל, לעיתים תוספת משטחי צמחייה עלולה דווקא להכביד את עומס החום, עקב השפעתם על הגברת הלחות היחסית.

- Pickup, J. and de Dear, R. 2000. An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT\_SET\*) - Part I - The Model and its Assumptions. In: de Dear, R., Kalma, J., Oke, T. and Auliciems, A. (eds.). *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium*. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8-12 Nov. 1999). WMO, Geneva, WCASP-50, pp. 279-283.
- 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.
- Sarat, A. A and Eusuf, M.A 2012. Effects of pavement surface temperature on the modification of urban thermal environment. *Journal of Architecture and Built Environment*, 39(1), 1-4.
- Shahidan, M.F., and Jones, P. 2008. Plant canopy design in modifying urban thermal environment: theory and guidelines. In: *The 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Dublin, October 22-24.
- Shahidan, M.F., Shariff, M.K.M., Jones, P., Salleh, E., & Abdullah A. M. 2010. A comparison of Mesua ferrea L. and Hura crepitans L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Journal of Landscape and Urban Planning*, 97, 168-181.
- Thani, SKSO., Mohamad NHN., and Idilfitri, S. 2012. Modification of Urban Temperature in Hot-Humid Climate through Landscape Design Approach: A review. *Social and Behavioral Sciences*, 68, 439 - 450.
- Thom, E.C. 1959. The Discomfort Index. *Weatherwise*, 12, 57-60.
- Tromp, S.W. 1979. Studies of the effect of the physical environment on human comfort. In: *Bio-meteorological Survey, Vol. 1, Part A*. London: Heyden, 11-20.
- Tromp, S.W. 1980. *Biometeorology: The impact of Weather and Climate on Humans and their Environment*. London: Heyden.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I. and Holmer, B. 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 1983-1993.
- Walikewitz, N., Janicke, B., Langner, M., Meier, F. and Endlicher, W. 2015. The difference between the mean radiant temperature and the air temperature within indoor environments: A case study during summer conditions. *Building and Environment*, 84, 151-161.
- Zhang, D., Yang, Y., Pan, M. and Zhen G. 2011. Toward a heat recovery chimney. *Sustainability*, 3, 2115-2128.
- Lay, D., Zhou, C., Huang, J., Jiang, Y., Long, Z., and Chen, Q. 2014. Outdoor space quality: a field study in an urban residential community in central China. *Energy and Buildings*, 68, Part B, 713-720.
- Lee, H., Holst, J. and Mayer, H. 2013. Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. *Advances in Meteorology*, Article ID 312572 (13 pages).
- Li, H., Harvey, J. and Kendall, A. 2013. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment*, 59, 536-546.
- Mather, J.R. 1974. *Climatology, Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Matzarakis, A., Meyer, H. and Iziomon, M. 1999. Application of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. 2000. Estimation and calculation of mean radiant temperature within urban structures. In : de Dear, R.J, Kalma, J.D., Oke, T.R., and Auliciems, A.(Eds.), *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium: Selected papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No. 1026*, 273-278.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H., 2006. Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model. *PLEA 2006, Vol. II*, 449-453.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H., 2007. Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 323-334.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H., 2010. Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131-139.
- Mayer, H., and Höpfe, P.R. 1987. Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38, 43-49.
- Mieczkowski, Z. 1985. The Tourism Climatic Index: A method of Evaluating World Climate For Tourism. *The Canadian Geographer*, 29, 220-233.
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. 2013. Outdoor thermal sensation in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment*, 66, 82-95.