

מספר המחקר במשרד לאיכות  
הסביבה: 9-2-5

שם המוסד המחלקה והמוסד המגישים:

אוניברסיטת תל אביב, ביה"ס פורטר

כותרת המחקר בעברית:

ההשפעה המשולבת של שינויי אקלים ואי החום העירוני על מגמת  
עומס החום בישובים עירוניים בישראל – מגמות עדכניות ותחזיות  
לעתיד

כותרת המחקר באנגלית:

**The combined effect of global warming and the urban  
heat island and its impact on human heat stress increase  
in Israeli cities– current trends and future predictions.**

סוג הדו"ח (חצי שנתי, שנתי או מסכם)

ושנת המחקר (ראשונה שניה או שלישית)

חצי שנתי, סיום שנה א'

מוגש ע"י

חוקרים ראשיים:

(בעמודה ימנית שם ותואר אקדמי, בעמודה השמאלית מוסד או מחלקה):

גיאופיסיקה	מדעים מדויקים	פרופ' פינחס אלפרט
גיאוגרפיה	מדעי הרוח	דר' עודד פוצ'טר

חוקרים נוספים:

(בעמודה ימנית שם מלא ותואר אקדמי, בעמודה השמאלית מוסד או מחלקה):

מדעים מדוייקים- גיאופיזיקה	דר' רנה סמואל

מוגש למדען הראשי  
המשרד לאיכות הסביבה

תאריך הגשה: דצמבר 2011

## תקציר בעברית

האוכלוסייה העירונית חשופה לתעוקות אקלימיות הנובעות משני גורמים עיקריים: ברמת המקרו - ההתחממות הגלובלית וברמת המיקרו - ההתחממות העירונית. שתי תופעות אלו מלוות גם בשינויים אקלימיים נוספים כמו שינויים בלחות ובעוצמת הרוח. שינויים אלו מכתיבים את תחושת הנוחות התרמית של האדם ואת רמת התעוקה האקלימית בה הוא נמצא.

על פי דוח של ה- IPCC (2007), במהלך המאה העשרים הטמפרטורה העולמית הממוצעת עלתה ב- $0.76^{\circ}\text{C}$ . מגמת ההתחממות הליניארית בחמישים השנים האחרונות הייתה כפולה מהמגמה במאה השנים האחרונות. מגמת ההתחממות צפויה להימשך גם במאה השנים הבאות. במקביל להתחממות הגלובלית זוהתה תופעה של התחממות אורבאנית מקומית, הידועה בשם אי החום העירוני Urban Heat Island (UHI), המוגדרת ונמדדת על ידי הפרשי הטמפרטורות בין העיר לסביבתה הבלתי מופרעת. מחקרים שנערכו לאחרונה מצאו כי ההתחממות האורבאנית עלולה להגביר את השפעת ההתחממות הגלובלית בתוך המרחב העירוני ובעקבות כך, להגביר את תדירות גלי החום הקיצוניים, להאריך את משכם ולהעצים את אפקט אי החום העירוני ומשכו בחודשי הקיץ. השילוב שבין שתי התופעות; ההתחממות הגלובלית וההתחממות העירונית המקומית עלול להחריף את אי הנוחות התרמית לאדם בעונת הקיץ, בפרט בשעות הצהריים.

במחקר זה אנו נבדוק האם העלייה בעומס החום במרחב העירוני היא כתוצאה מההתחממות האורבאנית או כתוצאה מההתחממות הגלובלית, או שמא ההשפעה היא תוצאה של סינרגיה בין שתי התופעות: ההתחממות הגלובלית וההתחממות העירונית המקומית יחד. כמו כן, נבדוק מהו הגורם המחריף את התופעה. חשוב לציין כי מחקר ארוך טווח הבוחן את מגמת שינויי עוצמת אי החום העירוני, על רקע ההתחממות הגלובלית והשלכותיה על העלייה בערכי עומס החום על האדם טרם נערך בישראל.

המחקר המוצע ינסה להעריך כמותית תופעה זו בערים הגדולות בישראל. בשלב הראשון תיערך השוואה בין שינויי האקלים בערים הגדולות ובמרחב הכפרי שסביבן (טמפרטורה, לחות ורוח) ויחושבו מגמות העקות האקלימיות לאורך השנים. במקביל לאיסוף ובחינה של הנתונים המטאורולוגיים שנקבל מהשם"ט, אנו נערוך איסוף נתונים נוסף של הפרמטרים באתר אינטרנט של MODIS L3 GIOVANI. אתר זה יוכל לשמש כביקורת וכמסד נתונים נוסף למחקר לעשור האחרון 2000-2010. בשלב השני נשתמש במודל האקלימי RegCM בעזרת המודל האקלימי תובא בחשבון תחזית של שינויי האקלים על ידי עליית הטמפרטורות הצפויה עד שנת 2060, תוך הבחנה בין העיר לסביבה הפתוחה, ותחושב העקה האקלימית הצפויה עקב עלייה זו.

### **Abstract**

The urban population is exposed to environmental stressors stemming from two main sources: global warming on the macro level, and urban warming on the micro level. These two phenomena coincide with other environmental changes such as changing humidity and wind velocity. These changes dictate human thermal comfort.

According to the IPCC 2007, the global temperature increased by  $0.76^{\circ}\text{C}$  over the course of the 20<sup>th</sup> century. The linear warming trend of the past 50 years was double that of the past 100 years. The trend of global warming is expected to continue in the next 100 years. Concurrently with global warming, a phenomenon of urban warming known as Urban Heat Island (UHI) has also been observed, measured and defined by the temperature discrepancy between urban areas and their untouched surroundings. Recent studies have found that urban warming may intensify the effects of global warming within the urban area resulting in longer, more frequent extreme heat waves and in a general intensification of the UHI effect during the summer months. The combination of these two phenomena – global warming and urban warming – may exacerbate human thermal discomfort during midday hours, in the summer season especially.

This study will examine whether a rise in the discomfort index in the urban area is a result of either urban warming or global warming, or whether the effect is the result of synergy between the two phenomena. In addition, we will investigate the factor exacerbating the urban warming phenomenon. It is important to note that no long-term study tracking changes in the intensity of the UHI in the context of global warming and its impact on the rising discomfort index has been heretofore conducted in Israel.

The proposed study aims to quantitatively measure this phenomenon in large Israeli cities. The first stage of the study will be a comparative assessment of the climatic changes (temperature, humidity and wind velocity) in the major cities and in the rural areas surrounding them. This stage will also include a calculation of trends in environmental stressors over the years. In the second phase of research, we will use

the climatic model RegCM to forecast climate change using predicted rising temperatures up to the year 2060, with distinctions between the urban and rural environments, and the environmental discomfort that will accompany said climate change.

## מילות מפתח

עומס חום, אי החום העירוני, אי נוחות אקלימית, התחממות גלובלית ועירונית, מדד PET, מדד DI, המודל האקלימי RegCM.

## תוכן עניינים

6.....	הצגת הנושא
7.....	סקירה ספרותית
7.....	השינוי האקלימי הגלובלי
7.....	מגמת שינויי הטמפרטורה הגלובלית
8.....	מגמת שינויי הלחות הגלובלית
8.....	מגמת שינויי עומס החום העולמיים
9.....	העיר כגורם לשינויי אקלים
10.....	מטרות העבודה
11.....	שלבי הביצוע
12.....	תוצאות
13.....	חלק 1: מגמת טמפרטורת האוויר 1967-2007
15.....	חלק 2: חיזוי שיפוע המגמה של טמפרטורת האוויר לפי 3 תרחישים

## רשימת איורים

6.....	איור 1: גידול האוכלוסייה בעיר באר שבע
13.....	איור 2: מגמת הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 06:00 לאורך השנים 1967-2007
13.....	איור 3: מגמת הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 15:00 לאורך השנים 1967-2007
14.....	איור 4: מגמת שיפוע הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 06:00 לאורך השנים 1967-2007 (מימין)
14.....	איור 5: מגמת שיפוע הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 15:00 לאורך השנים 1967-2007 (משמאל)
15.....	איור 6: מפת התפתחות העיר באר שבע 1958-2006
16.....	איור 7: חיזוי שיפוע המגמה לפי 3 תרחישים (אופטימי, פסימי ועסקים כרגיל) לגידול האוכלוסייה בעיר באר שבע

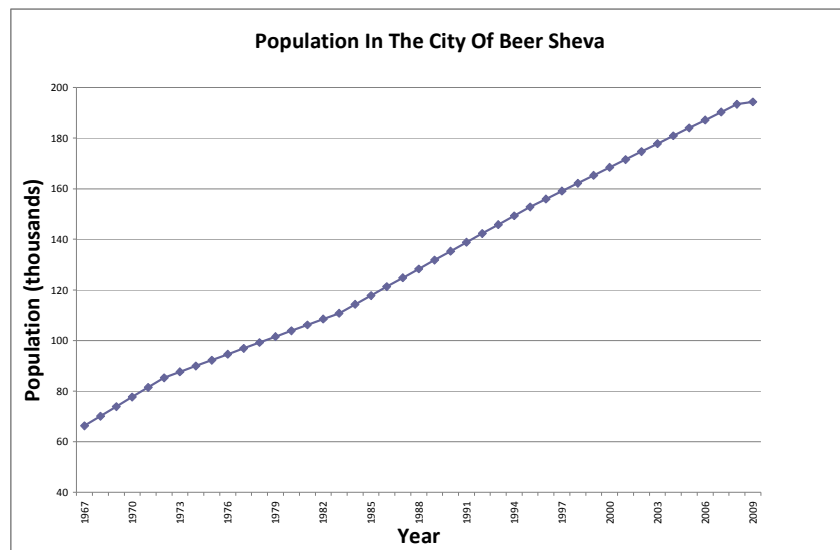
## רשימת טבלאות

15.....	טבלה 1: התפתחות העיר באר שבע 1958-2007 (שנתון סטטיסטי לישראל 2007)
---------	--

## הצגת הנושא

עבודה זו תבחן את ההשפעה האנטרופוגנית על שינויי האקלים ותחושת הנוחות, בישראל בעזרת קצב גידול האוכלוסייה, במשך הארבעים השנים האחרונות והחמישים השנים הקרובות. המחקר יתמקד ב-5 תחנות מטאורולוגיות שונות (שיורחבו בהמשך) המייצגות אזור עירוני ובמקביל יבחנו 5 אזורים כפריים בעלי אקלים דומה.

בעבודה זו יינתנו תוצאות לעיר באר שבע ותחנת הביקורת, הכפרית, נחל חצרים. התוצאות יינתנו אך ורק לאזור האקלימי הזה מפאת אי קבלת נתונים מהתחנות המטאורולוגיות השונות. להלן ניתן לראות דוגמה של גידול האוכלוסייה בעיר באר שבע בארבעים השנים אחרונות 1967-2009.



איור 1: גידול האוכלוסייה בעיר באר שבע

## סקירה ספרותית

### השינוי האקלימי הגלובלי

אקלים כדור הארץ עובר כיום תמורות משמעותיות ביותר המיוחסות לפעילות האנושית. עיקר השינוי האקלימי הנוכחי בא לידי ביטוי החל מסוף המאה ה-19 ועד היום, בעוד שבאלף השנים הקודמות השינויים האקלימיים היו מתונים יחסית (IPCC, 2007), השינוי האקלימי הנוכחי בה לידי ביטוי מובהק בעלייה של ערכי הטמפרטורות, הידועה בשם ההתחממות הגלובלית. יחד עם זאת, במקביל לעליית הטמפרטורות נמדדה גם עליה בערכי הלחות המוחלטת, עובדה שגרמה גם לעליית ערכי עומס החום. בנוסף נמצאו גם שינויים במשטר המשקעים ובשינויי קרינה. להלן סקירה קצרה על שינויי האקלים הרלוונטיים לעבודה זו – טמפרטורה, לחות ועומס חום.

### מגמת שינויי הטמפרטורה הגלובלית

ההתחממות הגלובלית מתבטאת בעליית הטמפרטורה הממוצעת של כדור הארץ. סך שיעור עליית הטמפרטורה בין טווח השנים 1850-1899 לבין טווח השנים 2001-2005 הוא  $0.76^{\circ}\text{C}$ , כאשר ב-100 השנים שבין 1906-2005 נרשמה עלייה של  $0.74^{\circ}\text{C}$ . עליית טמפרטורות חריפה שכזאת לא התרחשה ב-10,000 השנים האחרונות. יש לציין כי שיעור הטמפרטורה הגלובלית בטווח הקרוב עשוי להיות גבוה יותר מזו הנצפית מכיוון ששיעור ההתחממות במהלך המאה ה-20 היה איטי וכלל תנודות גדולות כולל ירידה של הטמפרטורה בין שנות הארבעים לשנות ה-70. למעשה החל משנת 1975 ועד היום שיעור ההתחממות הגלובלית עומד על  $0.2^{\circ}\text{C}$  לעשור (IPCC, 2007).

כמו כן נמצא כי באגן הים התיכון צפויה, עד סוף המאה הנוכחית, עליית טמפרטורה ממוצעת בשיעור של בין  $1.5^{\circ}\text{C}$ - $2.2^{\circ}\text{C}$  וירידה בכמויות הגשמים בשיעור שבין 4% ל-27% בהשוואה לסוף המאה העשרים. בנוסף, צפויה עלייה בעוצמת אירועי גשם קיצוניים, עליה בטמפרטורת הקיץ המרבית והממוצעת (IPCC, 2007; Zahng et al, 2005). מחקרים שונים ייחסו את שינויי האקלים לשינויי שימושי הקרקע בישראל. כלומר, בתחילת שנות ה-60 שטחי הבור הפכו לשטחים חקלאיים מושקים והאזורים העירוניים גדלו והתרחבו.

מחקרם של Ben Gai et al (1999), בחן את מגמות שינויי הטמפרטורה ב-40 תחנות נבחרות בארץ מצפון לדרום בשנים 1964-1994 מצא שטמפרטורות המכסימום והמינימום בעונת הקיץ עלו כל עשור בקצב של  $0.21^{\circ}\text{C}$  ו- $0.26^{\circ}\text{C}$  בהתאמה. עובדה זו עומדת בהתאמה למגמות החזויות מאפקט החממה גם כאשר לכך שהאמפליטודה היומית קטנה, כלומר קצב עליית טמפרטורת המינימום גבוה יותר מאשר טמפרטורת המכסימום. כמו כן במקביל בעונת החורף, נמצא כי טמפרטורת המכסימום והמינימום נמצאות דווקא במגמת ירידה, כל עשור בקצב של  $0.38^{\circ}\text{C}$  ו- $0.12^{\circ}\text{C}$  בהתאמה. לסיכום, מגמה זו מנוגדת למגמה הכללית בעולם של עלייה ניכרת במיוחד בטמפרטורת החורף מחמת אפקט החממה.

מספר מחקרים מוגבל, באזורים שונים בעולם, הראה כי גם בהם אפקט החממה מלווה דווקא בירידת טמפרטורות בעונות מסוימות. Ben-Gai et al (2001), הראו כי ניתוח המגמה בטמפרטורה ממוצעת שנתית, איננו מראה בהכרח עליה בטמפרטורה כפי שזו מתבטאת באזורים רבים בעולם, למרות שגם זו ככל הנראה תוצאה של אפקט החממה.

מחקרם של Ziv and Saaroni (2009), הראה כי בין השנים 1975-2007 נצפתה ב-16 תחנות נבחרות בישראל עליה חדה יותר, בערכי הטמפרטורה, שנעה בשעורים שבין  $0.4-1.1^{\circ}\text{C}$  לעשור. נראה שהשונות בתוצאות בין שני המחקרים נובעת מסדרות נתונים קצרות זמן וכתוצאה שטווח השנים שנבחרו היה שונה בכל אחד מהמחקרים, ובנוסף גם התחנות שנבחרו למחקרים לא היו חופפות ובין התחנות הנבחרות היו שטחים לא מכוסים. שונות זו נמצאה גם במחקרם של Zahng et al (2005), אשר בדקו שינויים אקלימיים ב-12 שונות במזרח התיכון וב-52 תחנות מטאורולוגיות.

### **מגמת שינויי הלחות הגלובלית**

עליית הטמפרטורה בגוש אוויר, תגרור ירידה בערכי הלחות היחסית (טריוורתה, 1963). כלומר, במקרה שהלחות היחסית נשמרת והטמפרטורה עולה, הלחות המוחלטת עולה גם כן. זאת למרות שבמחקרים עדכניים עולה כי עליית הטמפרטורה העולמית מלווה גם בשינויים בערכי הלחות כגון: לחות יחסית ולחות ספציפית (Gaffen and Rosse, 1999; Wang and Gaffen, 2001; Willett et al., 2008). בישראל נצפו מספר מחקרים בהם נצפתה עלייה בערכי הלחות היחסית. מחקרם של Ben Gai et al (2001), בחן את שינויי יחס העירוב (כמות אדי המים למשקל נפח אוויר) בבית דגן בין השנים 1964-1995 ואת מפל הלחות עם הגובה מעל פני הקרקע ומצא כי תכולת אדי המים באוויר עלתה לגובה שכבת העירוב האטמוספירית. לדעת החוקרים חלק משינויים אלו נבעו כתוצאה מהעלייה של כמות האידוי-הנובעת משינוי שימושי הקרקע, בעשור האחרון שכללו הגדלת השטחים המושקים. מחקרם של Ziv and Saaroni (2009), מצא כי בין השנים 1975-2007 נצפתה ב-16 תחנות נבחרות בישראל עליה בערכי הלחות היחסית בשעורים שבין  $0.5-2.2\%$  לעשור. המחקר לא בחן פרמטרים נוספים כמו לחות ספציפית, נקודת הטל או לחץ אדים, אך עצם העלייה בלחות היחסית במקביל לעליית הטמפרטורות גרמה בהכרח לעלייה בלחות האוויר, לחות ספציפית ואו לחץ אדים. מחקרם של Itzhak et al (2009), מצאו שבין השנים 1967-2007 הלחות הספציפית בחצרים עלתה בעיקר בשעות הלילה והבוקר בצורה מובהקת בעוד שבצהרים העלייה הייתה קטנה.

### **מגמת שינויי עומס החום העולמיים**

העלייה המקבילה של ערכי הטמפרטורות והלחות גורמת להכבדה של עומס החום בעונת הקיץ. תופעה זו נצפתה בארצות הברית (Gaffen and Rosse, 1998). במחקרם של Willett et al (2008), נצפתה עלייה של ערכי הטמפרטורה העלולים להעלות את ערכי הלחות הספציפית ברמת המקרו. Ziv and Saaroni (2009), מציינים שהשפעה המשולבת של עליית הטמפרטורות וערכי הלחות בישראל גורמת



לעליית ערכי עומס החום בעונת הקיץ. נראה איפה שנושא השפעת השינויים האקלימיים הנוכחיים על ישראל נמצא בראשיתו וההשפעה על עומס החום טרם כומתה, אף לא בתחנות נבחרות.

## **העיר כגורם לשינויי אקלים**

הסביבה העירונית הבנויה יוצרת תנאי אקלים שונים מהסביבה הכפרית הפתוחה המקיפה אותה. מחקרים שונים הראו כי האקלים העירוני מתאפיין לרוב בירידה בלחות, החלשות עוצמת הרוח, עליית הטמפרטורה ועלייה בריכוזי האירוסולים והמזהמים.

השפעת העיור על מגמת ערכי הטמפרטורה: תופעה זו המכונה בשם אי החום העירוני. ניתן לומר כי תופעה זו מושפעת מגודל העיר, צפיפות האוכלוסייה ומשני גורמים עיקריים:

1. גורמים פיזיים- המאפיינים אזור אקלימי נתון.
2. גורמים האנתרופו גיאוגרפים- הנגזרים מהיקף ומאופי הפעילות העירונית, מאפייני הסביבה הבנויה וארגון המרחב העירוני.

תופעת אי החום העירוני בולטת במיוחד בחורף, בחודשים היבשים, בעת שמזג האוויר יציב, בשעות לילה ולפני עלות השחר. כמו כן, אי החום העירוני מפותח יותר בקווי רוחב גבוהים בהשוואה לקווי רוחב בינוניים ונמוכים (Oke, 1987). עם זאת, קיומם של משטחים עירוניים ירוקים גדולים, אופי חומרי הבנייה ומוליכות החום תורמים את חלקם בהתפתחות או החלשות אי החום העירוני (Comrie, 2000).

מחקרים שונים מראים כי עליית הטמפרטורה בישובים עירוניים נובעת גם מהתרחבות השטחים העירוניים הבנויים. De Gaetano and Allen (2002), בדקו ומצאו כי בארה"ב שיפוע עליית הטמפרטורה בתחנות עירוניות היה כמעט פי שלושה מאלו שבתחנות הכפריות. Fujibe (2009b), מצא כי בערים היפניות הגדולות נמדדה בעשורים האחרונים עליה חדה בערכי הטמפרטורות. כלומר, נמצא כי מחקרים שונים בעולם מצאו כי העיור והפיתוח העירוני משפיע יותר על מגמת ערכי עליית הטמפרטורה בעיר, מאשר ההתחממות הגלובלית (Fujibe, 2009a; Thorsson, 2008).

השפעת העיור על מגמת ערכי הלחות: בעקבות עליית הטמפרטורה בעיר ושינוי פני השטח- בעיקר כתוצאה מייבוש מקורות מים והשקיית צמחייה- ערכי הלחות, אמורים לרדת, בעקבות ירידה באידי (Henry and Dirks, 1985). הערים, בעלות אקלים דומה לאקלים של ארץ ישראל, אשר חקרו תחום זה הם: Jauregui and Tejed (1997) במקסיקו סיטי. Um et al (2007) בסאול, דרום קוריאה. Liu et al (2009) בביג'ין, סין. Brazel and Bailing (1986) בפניקס, אריזונה. Cicek and Tu'rkog'lu (2009), בטורקיה. Itzhak et al, (2009) בבאר שבע, ישראל.

השפעת העיור על מגמת ערכי עוצמת הרוח: עוצמת הרוח הנמדדת באזור העירוני תהיה נמוכה בהשוואה לאזור החשוף בשל מקדם החספוס הגבוה של העיר. לעומת זאת, כאשר עוצמת הרוח המקומית נמוכה, ושמי הלילה בהירים- שני תנאים אופטימאליים להתפתחות אי החום העירוני- תיווצר בריזה לילית מהאזור הכפרי הפתוח לעיר (Oke, 1987).

ההשפעה המשולבת של ההתחממות הגלובלית והתחממות העירונית על העקה האקלימית

מרכזי ערים הם האזורים הרגישים ביותר לאי נוחות אקלימית. שילוב של תופעת אי החום העירוני בשילוב עם איכות האוויר הירודה, משפיעות בעיקר על מרכזים עירוניים וגורמים לעליית הטמפרטורה ולעקה אקלימית, במיוחד בעונת הקיץ. כתוצאה מהחימום יגבר השימוש במזגנים, לקירור במבנים ולשחרור של CO<sub>2</sub> לאוויר. שינויי האקלים ושחרור חום לאוויר יגרמו בעתיד לגלי חום. גלי החום יתרחשו בתדירות גבוהה יותר, יהיו אינטנסיביים יותר וימשכו לאורך זמן ארוך יותר. מספר מחקרים חזו כי צפויה עליה במספר החולים והנפטרים עקב עליית הטמפרטורה באזורים עירוניים (Thorsson, 2008). בישראל מחקרים שונים הראו מגמה דומה, לדוגמא: מחקרם של Ben Gai et al (1999), מצאו כי ישנה הגברה בתנודה העונתית בטמפרטורה הקייצית. כלומר, ניתוח התפלגויות של טמפרטורות המכסימום היומיות בישראל בעלת נטייה מובהקת להגברה בשכיחות ערכי הקיצון. כלומר, הקיץ חם יותר והחורף קר יותר. Ziv et al (2005), הצביעו על ההתחממות בולטת וגבוהה מן השיעור הגלובלי המלווה בעלייה של גלי החום ושכיחותם (Alpert et al (2008), חזו ירידה משמעותית בכמות המשקעים וצורך מחייב של בחינה מדוקדקת ורציפה של התנודות הנצפות באזור – במהלך השנים האחרונות, בטמפרטורה ובעומסי החום.

חשוב לציין כי מטרדים סביבתיים כמו זיהום אוויר גורמים לחוסר נוחות תרמי ולתעוקה אקלימית, לתעוקות סביבתיות אחרות ולהרעה במצבם הבריאותי וברווחתם (Wellbeing) של תושבי הערים, Oke (1987). מחקרים רבים העוסקים גם בנושא איכות האוויר במרחב העירוני מדגישים כי זיהום האוויר נחשב, כיום כגורם התחלואה ראשי למחלות ריאה אצל ילדים וקשישים.

על רקע נתונים אלה ישנה חשיבות רבה לחקר האקלים העירוני והשפעתו על נוחות האדם ועל הפוטנציאל להרעה באיכות האקלימית בעיר והחרפת התעוקה הסביבתית במרחב מגורי האדם. זאת מכיוון שאחת ההשלכות החשובות של תופעת אי החום העירוני היא עלייה בערכי עומס החום במהלך היום בעונת הקיץ, אשר מחמירה את אי הנוחות התרמית של האדם (Comrie, 2000; Baker et al, 2002, Golden, ). (2004; Sofer and Potchter, 2006; Grimmond, 2007; Thorsson, 2008). ניתן לומר כי מחקר ארוך טווח של מגמת שינויי עוצמת אי החום העירוני, על רקע ההתחממות הגלובלית והשלכותיו על העלייה בערכי עומס החום הנוכחיות והעתידיות על האדם הוא נושא חשוב שעדיין לא נבדק בישראל.

## מטרות העבודה

בחינה של ההשפעה המשולבת על שינויי אקלים (קרינה, טמפרטורה, לחות ורוח) עקב ההתחממות הגלובלית ועקב אי החום העירוני על מגמת שינויי עומס החום ביישוביים עירוניים בהתאם לגודלם ובהתאם לתפרוסתם הגיאוגרפית בישראל.

חיזוי מגמת שינויי האקלים ביישובים עירוניים בישראל עד לשנת 2060 וחיזוי של התעצמות עומס החום הנובעת משינויים אלה.

בחינה ובדיקה של רזולוציית הזמן והמרחב ע"י הפרמטרים השונים (טמפרטורה, לחות לסוגיה ורוח).

## שילבי הביצוע

במחקר זה נאסוף מידע ממספר אזורי אקלים שונים, אשר הושפעו מההתחממות העולמית והעירונית במהלך חודשי הקיץ. בכל אזור אקלימי נבחרו גם 5 תחנות כפריות, לייצג את תחנות הביקורת, כלומר בכל אזור אקלימי נבחרה תחנה עירונית ותחנה כפרית.

אקלים צחיח ויבש- בעיר אילת

אקלים צחיח למחצה- בעיר באר שבע

אקלים חם ולח בשלושה אזורים שונים בארץ המיוצגים, בעיר תל-אביב, חיפה וירושלים

מכל תחנה מטאורולוגית נאסף מידע לפחות מה- 30 שנה האחרונות, כלומר 1980-2010. הנתונים המטאורולוגיים שנתמקד בהם למחקר זה הם: טמפרטורה יבשה, לחות ספציפית ועוצמת הרוח (ראה איוורים 2,3 לדוגמה). כמו כן בעזרת הפרמטרים הללו נריץ שני מדדים: DI ו-PET שיפורטו בפרק הבא. כלומר במחקר זה אנו נבחן את רזולוציית הזמן והמרחב ע"י בחינה ובדיקה של העבר בעזרת טמפרטורה, לחות ועוצמת רוח ומדדי עומס חום.

בכדי להשוות את הגידול העירוני ולבחון את הממצאים שנקבל מול התחנה הכפרית, אנו נאסף מידע על השינוי העירוני שחל במהלך העשורים האחרונים, באותו אזור אקלימי, לדוגמה: מיפוי של תצאות לאורך השנים ומידע של כמות וגידול אוכלוסייה. בעזרת הבנת המתרחש במהלך השנים נוכל ללמוד על השינוי הדמוגרפי בעיר, את השינוי בעומס החום והשפעתו על רמת החיים והאוכלוסייה בערים השונות ובאזורי האקלים השונים.

לאחר ניתוח והבנת "העבר" נוכל להתמקד בחיזוי של השינויים האקלימיים בערים השונות ובאזורי האקלים השונים בישראל. את הערכים החזויים נחשב עד 2060 לשלושת הפרמטרים (טמפרטורה, לחות ועוצמת רוח). בעזרת קבלת המידע והחיזוי של הערכים לפרמטרים האלו נוכל לבחון את השינויים של האינדקסים לעומס החום ולחיזוי השינוי האקלימי על האדם.

## תוצאות

בפרק זה מוצגים משתנים אקלימיים שהתקבלו משני מקורות. האחד, מהשירות המטאורולוגי לאורך 41 שנה, בין השנים 1967-2007, בחודש יולי בשעות 06:00 לפנות בוקר ובשעה 15:00 בצהריים בשתי תחנות מטאורולוגיות: התחנה העירונית בבאר שבע מול התחנה המדברית החשופה בנחל הצרים. המקור השני הינו מהמודל האקלימי RegCM, לאורך 94 שנה בין השנים 1967-2060, בחודש יולי בשעות 06:00 לפנות בוקר ובשעה 15:00 בצהריים על פי שתי נקודות ציון אחת בקירוב לעיר בבאר שבע והשנייה בקירוב לנחל הצרים.

פרק זה מחולק לשני חלקים:

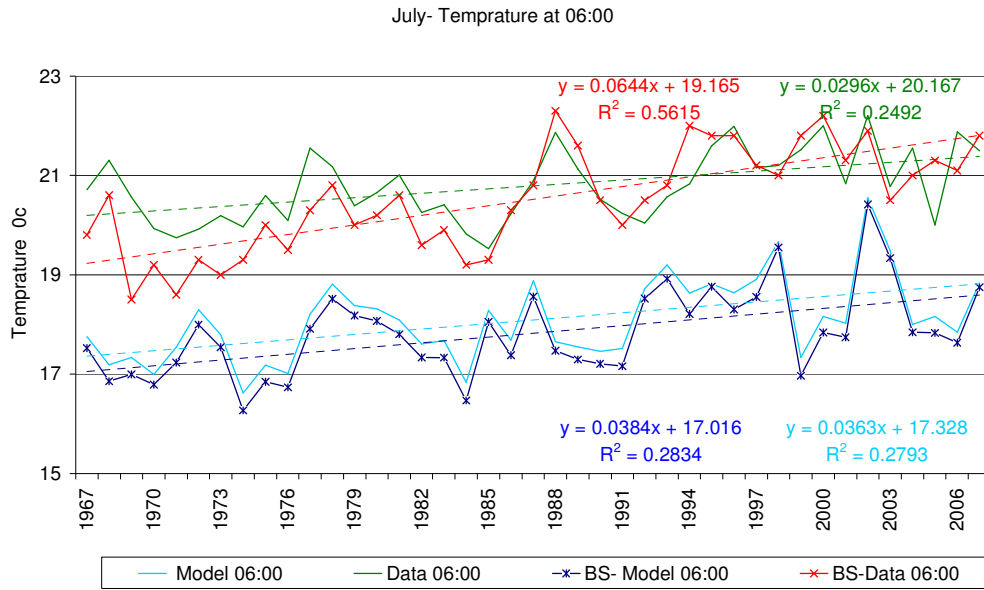
הראשון – הצגת מגמת ערכי הטמפרטורה והשיפועים לשנים 1967-2007. השני- הצגת חיזוי מגמת השיפוע של טמפרטורת האוויר לפי 3 תרחישים: כאשר כמות האוכלוסייה נשאר זהה, כמות האוכלוסייה גדל ב- 100,000 נפש ותרחיש שלישי, המוכפל פי 2. השנים שנבדקו הן 1967-2060. כלומר, בעזרת השיפוע (Slope) ניתן לראות את קצב השינוי החיובי או השלילי במגמה לאורך זמן.

בשעות הבוקר המוקדמות (איור 2) נמצא כי ישנה עלייה חזקה בטמפרטורת האוויר בעיר באר שבע ( $R^2=0.56$ ) לעומת נחל הצרים ( $R^2=0.249$ ), בנוסף לכך, ניתן לראות כי טמפרטורת האוויר בעיר הייתה נמוכה מזו שנצפתה בתחנה הכפרית, נחל הצרים בשנות השישים המאוחרות, מצב זה התהפך באמצע שנות ה-90 כאשר טמפרטורת האוויר בעיר עלתה מעל התחנה הכפרית. מצב זה אינו נראה במודל האקלימי RegCM, כלומר המודל האקלימי המראה שינויים אקלימיים בלבד, מראה כי הטמפרטורה בתחנה הכפרית גבוהה יותר מהתחנה העירונית, לאורך השנים שנבחנו 1967-2007.

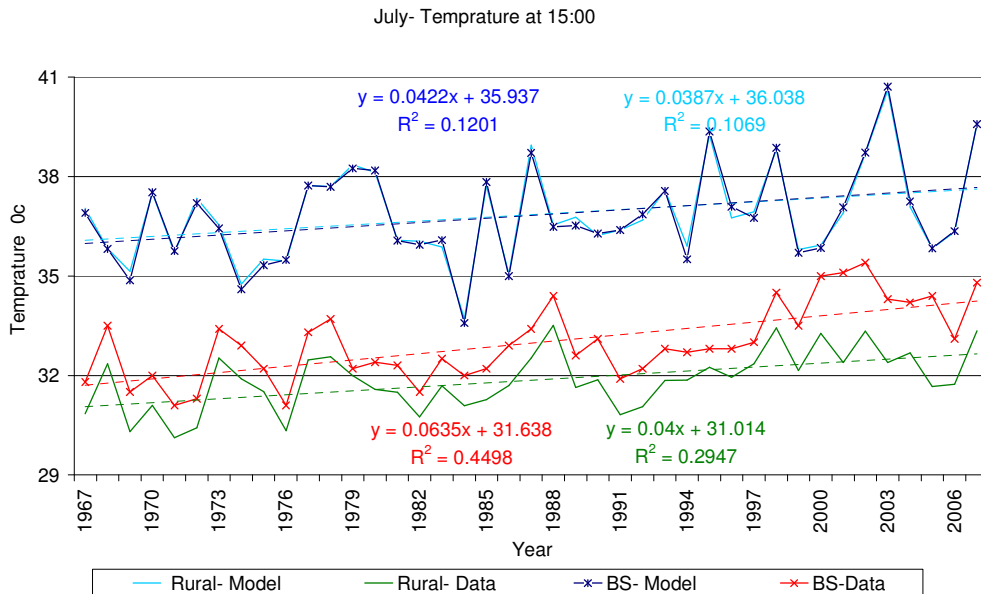
בשעות הצהריים החמות (איור 3) נמצאה עלייה חזקה במיוחד בטמפרטורת האוויר בעיר באר שבע ( $R^2=0.449$ ). כמו כן ניתן לראות כי טמפרטורת האוויר עלתה גם בתחנה בנחל הצרים ( $R^2=0.294$ ) ובמודל האקלימי RegCM אך לא באופן משמעותי כמו בעיר באר שבע. כלומר, באקלים המדברי, בשעות החמות של צהרי היום, נצפית עליה של  $R^2$  חזק בתחנה העירונית, ראה איורים 4,5 בו ניתן לראות את מגמת שיפוע הטמפרטורה בשעה 06:00 ו-15:00 לאורך השנים 1967-2007. במקביל לעליית הטמפרטורה בחנו גם את הגידול העירוני בעיר באר שבע לאורך החמישים השנים האחרונות 1958-2007 (ראה איור 6 וטבלה 1). בעזרת השיפועים שהתקבלו מהחלק הקודם ובעזרת מידע מהלשכה המרכזית לסטטיסטיקה יכולנו לחשב ולבחון את גידול האוכלוסייה בעיר ולערך אינטרפולציה עד שנת 2060 (ראה איור 7).

לסיכום, נמצא כי בחודש יולי, בשעה 06:00 נמצא כי עליית הטמפרטורה לכל 100,000 איש היא 0.85. ובשעה 15:00 עליית הטמפרטורה לכל 100,000 איש היא 0.7.

חלק 1: מגמת טמפרטורת האוויר 1967-2007



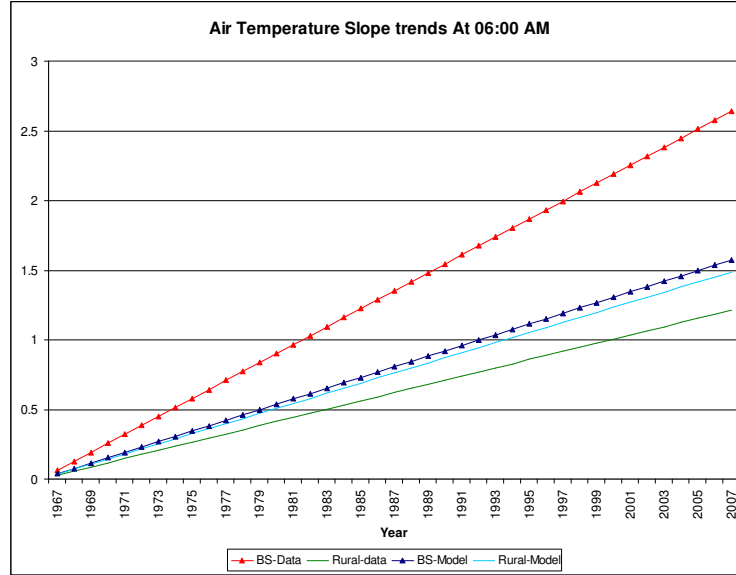
איור 2: מגמת הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 06:00 לאורך השנים 1967-2007



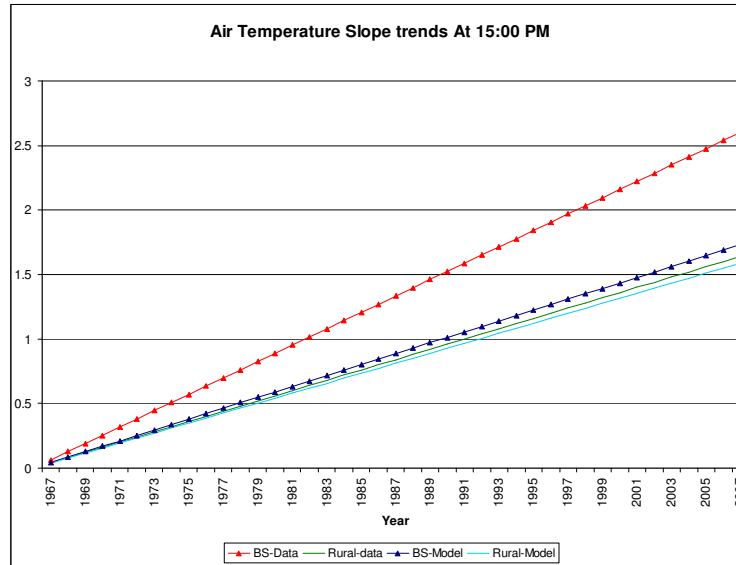
איור 3: מגמת הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 15:00 לאורך השנים 1967-2007

הקו האדום מסמל את העיר באר שבע. הקו הירוק את התחנה הכפרית נחל חצרים, על פי הנתונים מהשרות המטאורולוגי. הקו הכחול מסמל את העיר באר שבע. הקו התכלת את התחנה הכפרית נחל חצרים, על פי הנתונים

שהתקבלו מהמודל RegCM.



איור 4: מגמת שיפוע הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 06:00 לאורך השנים 1967-2007 (מימין).

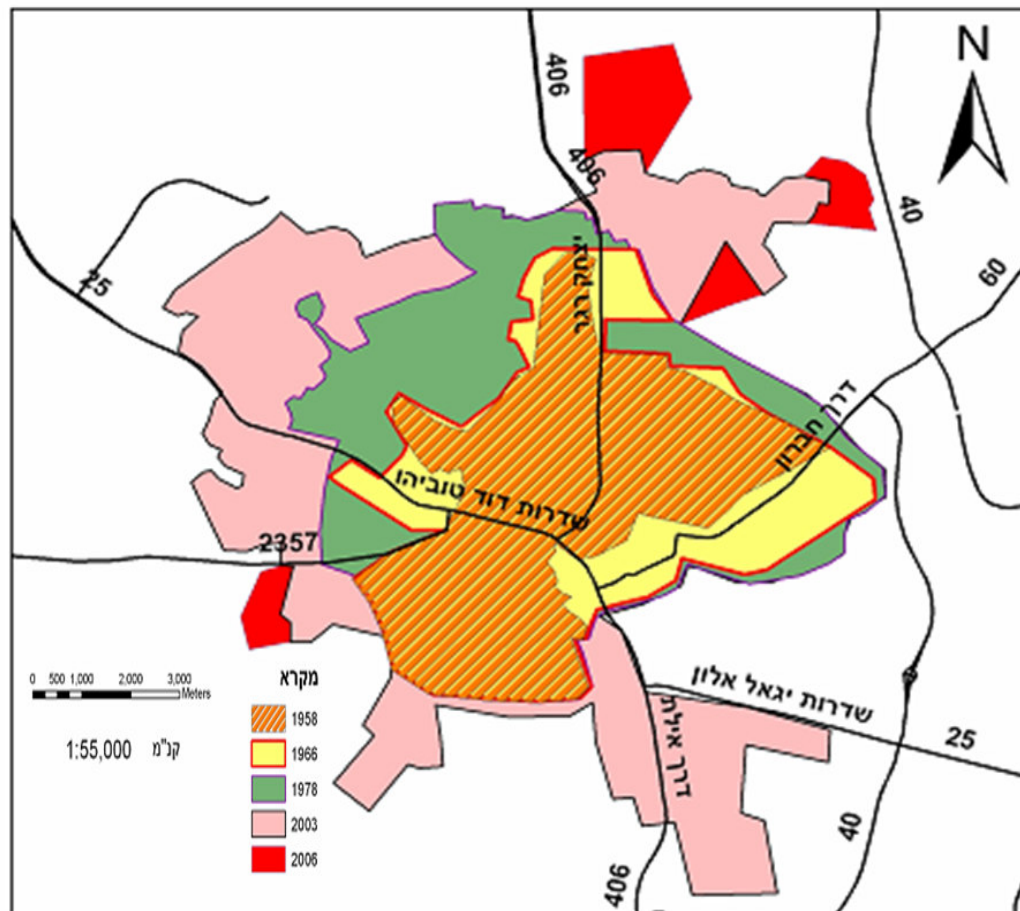


איור 5: מגמת שיפוע הטמפרטורה בבאר שבע, בחודש יולי בשעה 15:00 לאורך השנים 1967-2007 (משמאל).

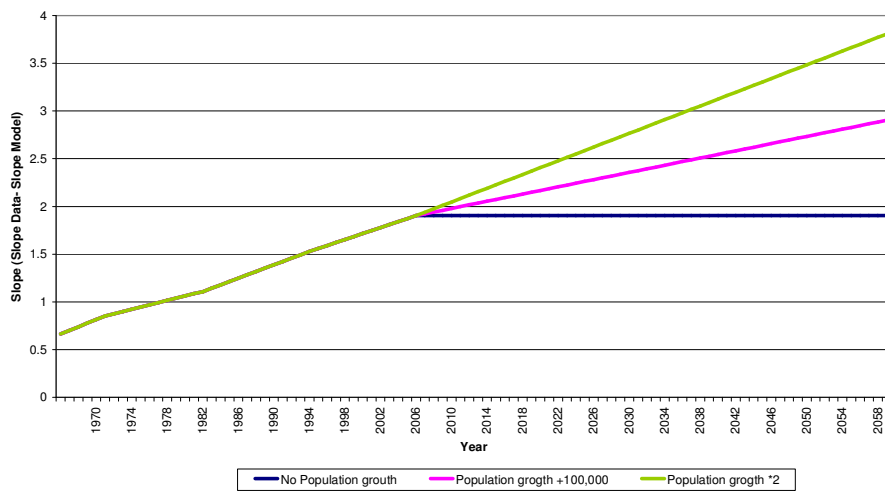
חלק 2: בחינת גידול האוכלוסייה ותחזית לעתיד

טבלה 1: התפתחות העיר באר שבע 1958-2007 (שנתון סטטיסטי לישראל 2007)

שנת תצלום האוויר	שטח בנוי בקמ"ר ע"פ תצלום האוויר (כולל א.תעשייה)	גודל אוכלוסייה משוער ע"פ מפקד האוכלוסין	צפיפות נפש לקמ"ר (כולל א.תעשייה)	מחקר אקלימי רלוונטי
1958	8.806	40,000	4542	
1966	12.310	45,000	3655	גנור א', 1965
1978	17.799	90,000	5056	סקיבין ד', 1978
2006	30.985	185,300	5980	Potchter et al, 2006



איור 6 : מפת התפתחות העיר באר שבע 1958-2006



איור 7: חיזוי שיפוע המגמה לפי 3 תרחישים (אופטימי, פסימי ועסקים כרגיל) לגידול האוכלוסייה בעיר באר שבע.



## דיון בתוצאות

מחקר זה מנסה להסביר את הפער בין אזורי אקלים שונים על ידי שינויים אנטרופוגניים, לדוגמה גידול אוכלוסייה. באיורים 4 ו-5 ניתן לראות את קצב השינוי (השיפוע) הגדל בבאר שבע לעומת התחנה הכפרית, נחל חצרים והמודל האקלימי RegCM בכל שנה ושנה.

על פי איור 4 המתאר את שעות הבוקר המוקדמות, ניתן לראות כי ישנה עלייה בנתונים של המודל האקלימי והתחנה הכפרית, נחל חצרים של  $1.5^{\circ}\text{C}$  כלומר עליית השיפוע בטמפרטורת האוויר נובעת כתוצאה מעלייה בשינויים אקלימיים. לעומת זאת העלייה בשיפוע בתחנה העירונית בבאר שבע של כ-  $2.6^{\circ}\text{C}$ .

כלומר עליית השיפוע בטמפרטורת האוויר נובעת כתוצאה משולבת של ההשפעה האקלימית וההשפעה האנטרופוגנית.

על פי איור 5 המתאר את שעות הצהריים החמות, ניתן לראות כי ישנה עלייה בנתונים של המודל האקלימי והתחנה הכפרית, נחל חצרים של  $1.7^{\circ}\text{C}$ . כלומר עליית השיפוע בטמפרטורת האוויר נובעת כתוצאה מעלייה בשינויים אקלימיים.

בדומה לשעה 06:00 גם בשעה זו העלייה בשיפוע בתחנה העירונית בבאר שבע של כ-  $2.6^{\circ}\text{C}$ .

**כלומר עליית השיפוע בטמפרטורת האוויר נובעת כתוצאה משולבת של ההשפעה האקלימית וההשפעה האנטרופוגנית.**

מחקר זה ננסה להוכיח את ההפרש בין העליות  $1.1^{\circ}\text{C} = 2.6^{\circ}\text{C} - 1.5^{\circ}\text{C}$ , כלומר מה הגורם המסביר את ההפרש של  $1.1^{\circ}\text{C}$  בשעה 06:00 בחודש יולי, ואת ההפרש בשעה 15:00 בחודש יולי העומד על כ-  $0.9^{\circ}\text{C}$  ( $0.9^{\circ}\text{C} = 2.6^{\circ}\text{C} - 1.7^{\circ}\text{C}$ ). כיום במחקר זה האפשרות היחידה שניתן להסביר הפרש זה הוא ע"י גידול אוכלוסייה כפרוקסי.

## רשימת ספרות

גנור א', (1965), אקלימה של באר שבע. עבודה לתואר מוסמך המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

השנתון סטטיסטי לישראל (2007), באינטרנט

[http://www.cbs.gov.il/reader/shnatonhnew\\_site.htm](http://www.cbs.gov.il/reader/shnatonhnew_site.htm)

טריוורתה, ג' ט', (1963), מבוא לתורת האקלים, יהדין, ירושלים.

סקיבין ד', (1979), איכות החיים בבאר שבע- היבטים מטאורולוגים, בתוך: גרדוס, י', ושטרן, א' (עורכים). ספר באר שבע, כתר, ירושלים, 323-331.

Alpert, P., Ilani, R., da-Silva, A., Rudack A., and Mandel, M. M. (2006), Seasonal prediction for Israel winter precipitation based on northern Hemispheric EOF, MERCHAVIM special issue in honour of Prof. Arie Bitan, 397-412.

Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., and Osetinsky, I., (2008), Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean, *Global and Planetary Change*, 63: 163-170.

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

Ben Gai, T., Bitan, A., Manes, A., Alpert, P., and Rubin, S., (1999), Temporal and spatial trends of temperature patterns in Israel, *Theoretical and Applied Climatology*, 64: 163-177.

Ben Gai, T., Bitan, A., Manes, A., and Alpert, P., (2001), Climate variations in the moisture and instability patterns of the atmospheric boundary layer on the east Mediterranean coastal plain of Israel. *Boundary- layers meteorology*, 100: 363-371.

Brazel, S. W., Bailing, J. R. (1986), Temporal analysis of long-term atmospheric moisture levels in Phoenix, Arizona. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, 25(2): 112-117.

Cicek, I., Tu'rkog'lu, N. (2009), The effects of urbanization on water vapor pressure in a semi-arid climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 95: 125-134.

Comrie, A. C., (2000), Mapping a wind-modified urban heat island in Tucson, Arizona (with comments on integrating research and undergraduate learning). *Bulletin of American Meteorological Society*, 81: 2417-2431.

- Fujibe, F., (2009a), Detection of Urban Warming in Recent Temperature Trends in Japan. *International Journal of Climatology*, 29: 1811–1822.
- Fujibe, F., (2009b), Urban warming in Japanese Cities and its relation to climate change monitoring. *Proceeding of The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Gaffen, D.J., Ross, R.J., (1998), Increased summertime heat stress in the U.S. *Nature* 396: 529-530.
- Gaffen, D.J., Ross, R.J., (1999), Climatology and trends in U.S. surface humidity and temperature. *Journal of Climate*, 12: 811–828.
- Golden, J.S. (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.
- Grimmond, C.S.B., (2007), Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Journal compilation*, 173: 83-88.
- Henry, J.A., Dirks, S.E., Marotz, G.A., (1985), Urban and rural humidity distribution: relationships to surface materials and land use. *Journal of Climatology* 5: 53-62.
- IPCC (2001), *The Scientific Basis, Contribution of WG I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Solomon, S. Qin, D., Manning, M.,
- Itzhak, B.S.H., Potchter, O., Tsoar, H., (2009), The effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city, *Proceeding book of The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Jauregui, A., Tejed, A. (1997), Urban-rural humidity contrasts in Mexico City. *International Journal of Climatology* 17: 187–196.
- Liu, W., You, H., Dou, J. (2009), Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing Area. *Theoretical and Applied Climatology*, 96: 201–207.
- Oke, T.R., (1987), *Boundary layer climates*. 2nd Ed. New York. Methuen, pp: 435.
- Potchter, O., Yaakov, Y., 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*, Gothenburg, Sweden, 450-453.
- Sofer, M., Potchter, O., (2006), The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, 85: 81–88.

- Thorsson, S., (2008), Increased heat stress in Swedish cities due to climate change: the impact of urban geometry on thermal comfort. *Urban Climate News*, 29: 11-13.
- Um, H.H., Ha, K.J., and Lee, S.S., (2007), Evaluation of the urban effect of long-term relative humidity and the separation of temperature and water vapor effects. *International Journal of climatology*, 27:1531 – 1542.
- Willett, K.M., Jones, P.D., Gille, N.P., Thorne, P.W., (2008), Recent changes in surface humidity: development of the HadCRUH Dataset, *Journal of Climate*, 21: 5364-5383.
- Zhang, X., Aguilar, E., Sensoy, S., Melkonyan, H., Tagiyeva, U., Ahmed, N., Kotaladze, N., Rahimzadeh, F., Taghipour, A., Hantosh, T.H., Alpert, P., Semawi, M., Ali, M.K., Al-Shabibi, M.H.S., Al-Oulan, Z., Zadari, T., Al Dean Khelet, T., Hamoud, S., Sagir, R., Demircan, M., Eken, M., Adiguzel, M., Alexander, L., Peterson, T.C., and Wallis, T., (2005), Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003, *J. Geophys. Res.*, 110, D22104.
- Ziv, B., Saaroni, H., Baharad, A., Yekutieli, D., and Alpert, P., (2005), Indications for aggravation in Summer heat conditions over the Mediterranean basin, *Geoph. Res. Lett.*, 32, L12706.
- Ziv, B., and Saaroni, H., (2009), The contribution of moisture to heat stress in a period of global warming: the case of the Mediterranean. *Climatic Change*, 104: 305–315.