

פרויקט 2.1:

בחינת פתרונות משולבים לתכנון עירוני רגיש מים

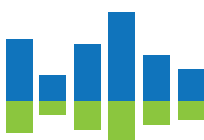
1. מבוא

התכנון ההנדסי שהיה נהוג בישראל במשך עשרות שנים, בדומה לנהוג בארצות רבות אחרות, ראה בנגר העילי העירוני מטרד או בעיה הדורשת פתרון. בתכנון לקוי, מי הגשם עלולים לגרום להצפות של הכבישים, וחדירה של מים לתת-הקרקע סמוך ליסודות הבניינים עלולה להביא לפגיעה ביציבותם. מערכות הניקוז תוכננו בדרך כלל במטרה לאסוף את מרבית מי הגשם ולסלק אותם במהירות וביעילות האפשרית מהמרחב הבנוי. במרבית הישובים, מי הגשם מגיעים בסופו של דבר אל ערוצים טבעיים ומשם, לא אחת, אל הים. בשנים האחרונות התגבשה הבנה, בין היתר בעקבות מחקרים בחו"ל, כי רצוי לנקוט בתכנון עירוני רגיש למים (תר"מ), המבטא יעוד שונה למים ומיישם אמצעים אחרים לשם כך.

פוטנציאל הנגר העילי הבלתי מנוצל בערי ישראל מוערך ב-70-100 מיליון מ"ק בשנה. מים אלו הם משאב אשר בתכנון נכון ניתן להפיק ממנו תועלת. בראש ובראשונה, ניתן לאגום אותם ולהחדיר אותם אל מאגר מי התהום, אם אינם מזוהמים יתר על המידה. מערכות של ביו-פילטרים, המהוות את מושא המחקר של צוותי מחקר אחרים בפרויקט, מאפשרות לשמר חלק מהמים האלה. אולם בתכנון נכון, מי הנגר העילי עשויים גם לתרום לאיכות החיים של תושבי העיר: ניתן להשתמש בהם להשקיה של צמחייה בגנים עירוניים קטנים ובערוגות, בתנאי שמוסטים את מהירות הזרימה ומסיטים אליהם את המים בצורה מושכלת. הצמחייה עשויה לשפר את הנוחות האקלימית של הולכי רגל בשטחים הפתוחים הסמוכים, ולהפחית את צריכת האנרגיה של בניינים למיזוג אוויר. המחקר הנערך על ידי הצוות במכוני לחקר המדבר משתלב בתוכנית מקיפה המיועדת להביא ליצירת ערים רגישות מים בישראל אשר ייטיבו לנצל את המשאב הזה.

התרומה של צמחייה לנוחות התרמית של הולכי רגל בעיר ולהפחתת צריכת האנרגיה בבניינים תלויה במיני הצמחים, במיקום שלהם במרקם העירוני ובאופן שבו הם משולבים בשאר מרכיבי הרחוב. את הצמחייה אפשר לשלב במספר אופנים: בגינות ציבוריות או פארקים שכונתיים; ברחובות; בגינות הבניינים; או על גבי הבניינים עצמם, בעיקר בגגות. התכנון חייב להביא בחשבון הן את מאפייני הסביבה הבנויה והן את מאפייני האקלים, ובפרט את תפוסת המשקעים: מספר ימי הגשם מועט, העוצמות לעיתים גבוהות מאוד, ובעיקר – ישנה תקופת יובש ארוכה וקשה מאוד הנמשכת מספר חודשים בשנה. האקלים בארץ שונה מאוד מהאקלים השורר באחדות מהערים החלוצות בתחום, כגון מלבורן שבאוסטרליה ופורטלנד בארה"ב. לכן אפשר שהכלים המשמשים את המתכננים שם לא יתאימו לצרכים בישראל.

מטרות הפרויקט שעליו אחראית הקבוצה שלנו הן אפוא: (א) לבחון, בהקשר הישראלי, כיצד ניתן למפות מערכת משולבת ומקיפה של נתיבי מים, אזורי איגום ומתקני אגירה וטיפול לנגר עילי במרקם עירוני קיים; (ב) לפתח ולהדגים מתודולוגיה ליישום אמצעים לשימור נגר עילי במרחב העירוני במגמה להביא לניצול מיטבי של המים לשיפור הנוחות התרמית של הולכי רגל ברחוב ולהפחתת בצריכת האנרגיה של בניינים לאקלום.



2. שיטות

המתודולוגיה של הפרויקט נשענת על הדמיות מחשב, וכוללת שני מאמצי מחקר הבאים לענות על מטרות הפרויקט, בהתאמה:

א. מיפוי אלמנטים של עיר רגישה למים. התהליך כולל את השלבים הבאים:

1. רכישה של בסיס נתונים בעל רזולוציה גבוהה, ממופה בממ"ג (GIS).
2. מיפוי נתיבי זרימת נגר עילי, באמצעות תוכנת SUSTAIN (המבוססת על מנוע החישוב SWMM).
3. הגדרת יעדים כמותיים למהלך ההתערבות במרקם העירוני.
4. ניתוח משולב של הזרימות ושל התשתית במטרה לזהות אתרים אפשריים ליישום אמצעי בקרת נגר, לפי הסיווג הבא: סוג האמצעי; צורת הפרישה שלו; מיקום האמצעי; סוגי הצמחייה.
5. הדגמת המתודולוגיה בשתי ערים בארץ.

ב. בחינת השפעתם של אמצעים לבקרת הנגר על אקלים העיר, בשלבים הבאים:

1. מודל של השפעות האמצעים לבקרת הנגר על מיקרו-אקלים העיר, ובפרט: טמפרטורת קרקע בעיר לאחר הגשם, עם או בלי צמחייה; ומודל מחשב של טמפרטורת האוויר באזור עירוני.
2. שילוב ההדמיות של השפעת הצמחייה במודל CAT, ואימות המודל המשולב על בסיס נתוני מדידות קיימים מהערים אדלייד, גוטבורג ומלבורן.
3. שילוב (חד-כיווני) של מודל CAT בבסיס נתונים קיים ב-GIS.
4. ניתוח ההשפעה של הצמחייה באמצעי בקרת הנגר על נוחות תרמית של הולכי רגל באמצעות מדד ITS.
5. ניתוח ההשפעה של הצמחייה באמצעי בקרת הנגר על צריכת אנרגיה לאקלום באמצעות תוכנת Energy+ המוזנת בנתוני אקלים אשר הותאמו לתנאי העיר באמצעות מודל CAT המשופר.

3. תוצאות, דיון ומסקנות

במהלך השנה השנייה של הפרויקט הושגה התקדמות במספר נושאים, אשר יתוארו כאן בקצרה.

3.1 ניתוח הידרולוגי של סביבות עירוניות

מידול הידרולוגי של סביבות עירוניות היינו נושא מורכב בשל ההטרוגניות של המערכת הכוללת בנוסף לתנאים הסביבתיים כגון סוג קרקע, תכנית, שיפועים, משקעים והתאדות (הנדרשים במידול הידרולוגי בשטחים פתוחים), גם מאפיינים הייחודיים



לשטחים עירוניים כגון רשת ניקוז תת-קרקעית, שטחים בנויים אטומים למים ותכסית מגוונת. בנוסף, קנה המידה של אגני ניקוז עירוניים שונה לחלוטין מאילו של שטחים פתוחים ויכול להגיע לסדר גודל של מטרים ספורים. אירועי הצפה בשנים האחרונות בשטחים עירוניים בארץ ובעולם מדגישים את ההכרח במציאת פתרונות כוללים לטיפול בנגר העילי כך שיהפוך ממטרד למשאב. על מנת למצוא מודל שיתאים לתנאים הספציפיים של ערים במדינת ישראל נעשתה סקירה מקיפה של מודלים לניתוח ההידרולוגיה העירונית (Salvadore et al., 2015). הסקירה כללה בחינה של היתרונות והחסרונות של מרבית המודלים הקיימים בעולם. מודלים אלו מאפשרים להריך סימולציות הידרולוגיות אשר לוקחות בחשבון משתנים שונים של נגר עילי, כולל משתנים הייחודיים לסביבות עירוניות (כגון גגות ירוקים וריצוף חדיר למים). כמו כן ניתן לשלב בסימולציות אמצעים שונים לניהול נגר עילי כגון פתרונות מגישת LID (Low Impact Development – פיתוח בעצימות נמוכה) הכוללים תיעול מי הנגר להשהיה ולהחדרת המים תוך שימוש בטכנולוגיות מקומיות.

אחד המודלים החשובים למיפוי ההידרולוגיה העירונית הוא מודל SWMM (Storm Water Management Model). זהו מודל דינמי הידרולוגי-הידראולי שפותח בתחילת שנות ה-70 של המאה ה-20 על ידי המשרד להגנת הסביבה האמריקאי (EPA). המודל נמצא בשימוש נרחב, מעודכן באופן קבוע ובעל קוד פתוח המאפשר התאמה ופיתוח של פתרונות לבעיות ספציפיות. המודל מיועד למיפוי מקיף של מערכת נתיבי המים העירוניים העל והתת-קרקעיים ומידול של זרימת המים ופוטנציאל מי הנגר. המודל מאפשר סימולציות על בסיס אירועי גשם (היסטוריים וחזויים), מיפוי של אזורי איגום ומתקני אגירה, מיפוי של שימושי קרקע ותכסית קרקע (דרגת חדירות המשטח) ואינו מוגבל מבחינת קנה המידה וגודל האגן. המודל מאפשר הגדרה של פרמטרים רבים וניתן באמצעותו לאפיין מיקרו-אגנים ברזולוציות של מטרים בודדים, ולהתבסס גם על טופוגרפיה ונקודות גובה ברזולוציות גבוהות על מנת לכלול פרטים האופייניים לאזורים עירוניים (כגון מדרכות, קירות, סוללות וכדומה). כמו כן, ניתן למפות פיתוח בעצימות נמוכה (LID) על מנת להעריך את ההשפעות של תכנון עירוני על פוטנציאל מי הנגר כגון: שינויים בתכסית הצומח, ניתוב המים ואיגומם, שימוש בריצוף חדיר ואף גגות ירוקים. החיסרון הבולט של המודל נעוץ במורכבות שלו. על מנת להשיג תוצאות מהימנות יש להגדיר מגוון רחב של פרמטרים שלא תמיד נמצאים בהישג יד, וכן, נדרשים חישובים נרחבים. המודל נבדק על ידי הטכניון שמצא שחסרון זה משפיע על הדיוק בתוצאות (משהב"ש 2007).

קיימים מודלים רבים אחרים למידול של הידרולוגיה עירונית ברמות שונות של מורכבות ושל רזולוציה מרחבית ועתית. כמו כן, פותחו גם תכנות מסחריות כגון: MUSIC ו-PCSWMM.

במחקר הנוכחי הוחלט להתמקד במודל ה-SUSTAIN (Shoemaker, 2009; 2011; 2013) מפני שהמודל הינו מודל נגיש, חינוכי ובעל קוד פתוח המשלב מידול של נגר עילי עם מידול של המערכת התת-קרקעית (ספיקה ומזהמים), ואשר כולל גם רכיב לתכנון והערכה של פתרונות בעצימות נמוכה (LID) ורכיב לאופטימיזציה על בסיס של שיקולי עלות-תועלת (כגון עלות הקמה מול דרישות ספיקה).

מודל ה-SUSTAIN מאפשר מידול ברזולוציה מרחבית גבוהה המתאימה לאגנים קטנים מאוד המאפיינים סביבות עירוניות. כמו כן, המודל משתלב במערכת ArcGIS קיימת, ולכן מפשט ומייעל את השימוש בנתונים מרחביים קיימים. המודל גם נבדק באזורים אקלימיים צחיחים וצחיחים-למחצה דומים לאלו של מרבית הערים בארץ (Sun et al., 2016) בדיקת המודל והתאמתו לתנאים הסביבתיים והעירוניים של ערים בארץ נעשו על בסיס אחד מתתי-האגנים בתחום העיר כפר סבא. בתת-אגן זה נאספים בשנים האחרונות נתונים רציפים של אירועי גשם ע"י קבוצת המחקר בראשותו של פרופ' רוני וולך (איור 19).



איור 19: תת-האגן הנבדק בתחום העיר כפר סבא על רקע DEM (Digital Elevation Model) שהופק מנתוני הטופוגרפיה הקיימים של העיר.
רקע: ESRI World Map Background

עיריית כפר-סבא סיפקה את הנתונים שכללו טופוגרפיה, שימושי קרקע, רשת הכבישים ומפת המבנים. נתונים נוספים התקבלו ממאגרי מידע פתוחים, למשל נתוני קרקע הורדו מאתר משרד החקלאות ונתוני מפלס מי התהום הורדו מאתר רשות המים. הנתונים עברו עיבוד ראשוני כך שיותאמו לדרישות המודל, למשל את סוגי הקרקעות צריך היה לסווג בהתאם לסיווג הידרולוגי המשקף את פוטנציאל הנגר שלהם ואת שימושי הקרקע צריך היה לסווג בהתאם לקוד שימושי הקרקע האמריקאי. כמו כן, צריך היה לסווג את סוגי התכסית על פי מידת האטימות של המשטח למים, למשל משטחי אספלט יקבלו ערך של 100%, כלומר משטחים אטימים לחלוטין.

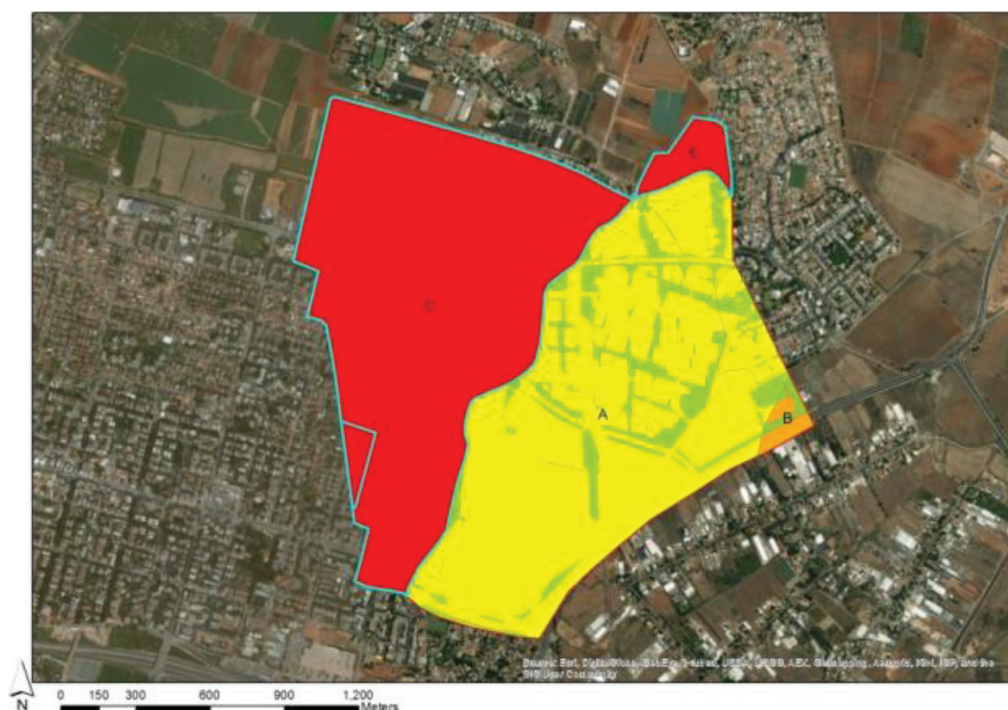
לאחר התאמת הנתונים לדרישות המודל נבדק רכיב ה-BMP (Best Management Practice). רכיב זה מאפשר לזהות את המיקום האידיאלי של פתרונות שונים. המודל מאפשר גם להגדיר פתרונות מותאמים ספציפית כגון: ביו-פילטרים, תעלות החדרה, פסי צמחייה, גגות ירוקים ועוד. המשתמש מגדיר את תנאי הסף על פי התנאים הספציפיים הנדרשים, למשל, שיפוע מינימאלי, סוג קרקע נדרש, גודל אגן היקוות ומרחק מכבישים קיימים, ובאמצעות ניתוח רב-שכבתי ו-suitability analysis המודל ממפה את האזורים המתאימים ביותר למיקום מרחבי של הפתרונות הנבדקים (איור 20).

יש לזכור שלהגדרת תנאי הסף חשיבות מכרעת בתוצרי הניתוח המתקבלים (איור 21). אפשרות נוספת היא למקם פתרונות בשטח ולאחר מכן להעריך את היעילות של כל פתרון בהתאם לניתוח מרחבי של הנגר. ניתן לשלב אופטימיזציה של תהליך הניתוח כך שהמערכת מנתחת באופן איטרטיבי חלופות ותרשימים שונים בהתאם לשיקולי עלות-תועלת, למשל אופטימיזציה של שטח גג ירוק נדרש או של ריצוף חדיר. ניתן אף להעריך פיתוח עתידי באמצעות השוואה של התערבות בפתרונות בעצימות נמוכה למצב קיים או אף הערכה של כמויות הנגר ללא פיתוח עירוני כלל. המערכת כוללת בסיס נתונים של מחירי חומרי בנייה שונים אשר ניתן להתאים למחירים המקובלים בארץ או להגדיר עלות עבור יחידה כוללת, למשל, עלות הקמה של ביו-פילטר.





איור 20: זיהוי של אזורים המתאימים למיקום של כסי ושטחי צמחייה לאיסוף מי נגר על פי תנאי סף ספציפיים כגון טופוגרפיה קיימת, מידת חדירות המשטח ומרחק מכבישים קיימים
 רקע: ESRI World Map Background



איור 21: השפעת סוג הקרקע על זיהויים של אזורים המתאימים למיקום של כסי צמחייה לאיסוף מי נגר. ניתן לראות שבסוג קרקע C (קרקע בעלת רמת חדירות נמוכה) לא מתקבלים כסי צמחייה
 רקע: ESRI World Map Background

אחד החסרונות העיקריים במודל ה-SUSTAIN הוא העובדה שהוא מתבסס על מערכת ה-ArcGIS כלומר נדרש פיתוח מתמיד של המודל על מנת לשדרג אותו ולהתאימו לגרסאות החדשות של תוכנת ה-GIS.

הערה: לאחרונה החליט ה-EPA להפסיק את המשך השדרוג של המודל ולכן תיבדקנה חלופות נוספות שתאפשרנה לספק ניתוח כולל כדוגמת ה-SUSTAIN.

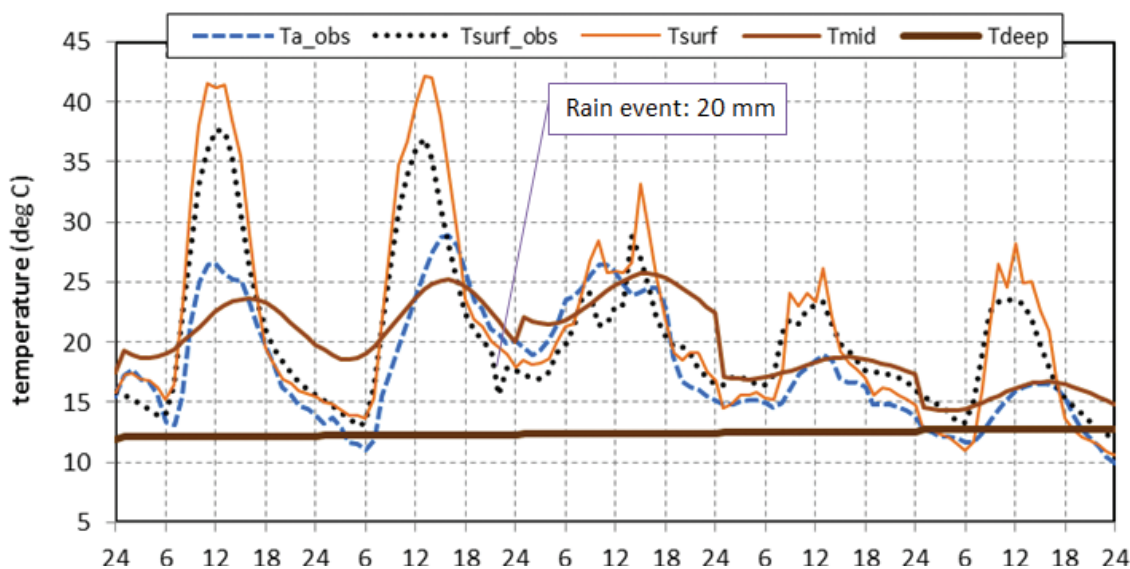
3.2. ניתוח תרמי של סביבות עירוניות

פיתוח הכלים לניתוח תרמי של סביבות עירוניות נעשה במספר שלבים:

3.2.1. בניית מודל לטמפרטורת פני קרקע

אחד הגורמים בעלי ההשפעה הרבה ביותר על מיקרו-אקלים בעיר הוא טמפרטורת פני הקרקע: היא משפיעה הן על טמפרטורת האוויר בקרבתה והן על מאזן הקרינה עם עצמים ובני אדם ברחוב. לנוכחות מים בשכבות העליונות של הקרקע (בעקבות אירועי גשם) ישנה השפעה על הטמפרטורה, אשר אותה יש צורך לאמוד באמצעות מספר נתונים קטן ככל האפשר אשר יהיה נגיש לכל מתכנן, ונתונים מטאורולוגיים סטנדרטיים בלבד. מודל כזה נבנה בפורמט המשלב אלמנטים ממספר מודלים קיימים, בהתאם לנתונים אשר צפוי כי יהיו זמינים לכל יעד בעיר. הוא נבחן בעזרת נתונים מטאורולוגיים ומדידות של פני השטח בשדה בוקר, ונמצא כי הוא נותן רמות דיוק טובות.

איור 22 מדגים את טמפרטורות פני הקרקע בשדה בוקר לאורך תקופה של כשבועיים, אשר במהלכה נרשם אירוע גשם משמעותי. בעקבות הגשם, השתנו תכולת הרטיבות של הקרקע והתכונות התרמיות שלה, ואל מאזן האנרגיה בפני השטח נוסף רכיב משמעותי של קירור באידוי.



איור 22: מהלך הטמפרטורה של פני הקרקע בשדה בוקר לפי המודל ולפי מדידות בשטח

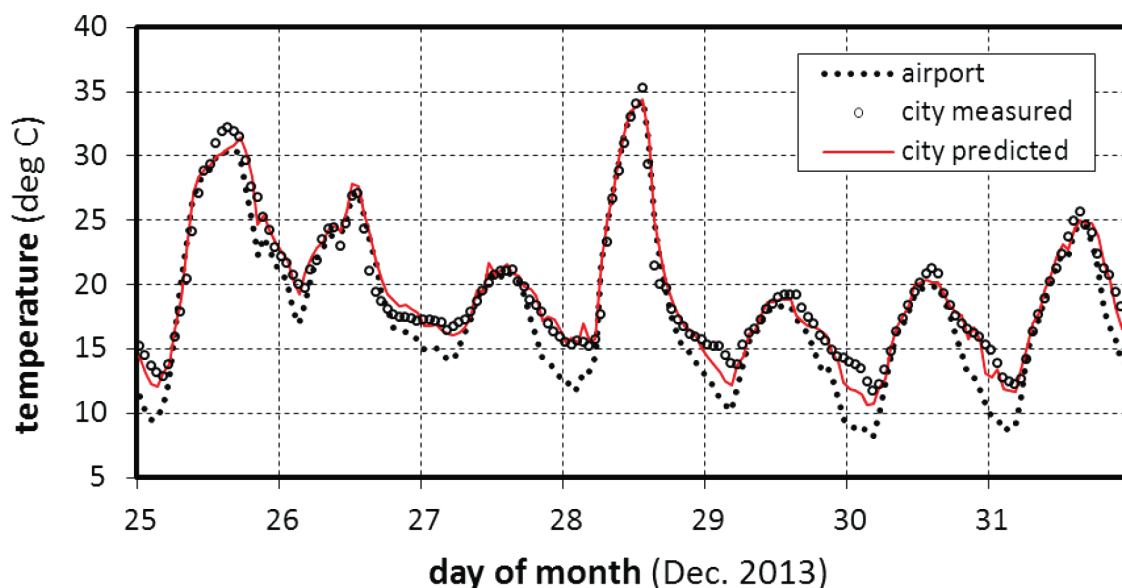
המודל תורגם לשפת מחשב FORTRAN ושולב בתוכנת CAT.

3.2.2 שכלול היכולת של מודל CAT לתאר את ההשפעות של קרקע לחה וכיסוי צמחייה על טמפרטורות האוויר בעיר

מודל CAT במתכונת הקודמת מבטא את השפעת הצמחייה באמצעות מקדם אמפירי המהווה חלק מהנוסחה לחישוב שטף החום המוחש. ערכו של המקדם הזה משתנה בהתאם למידת החשיפה של האוויר במעלה הרוח למשטחים תורמי לחות כגון גופי מים או צמחייה. יחד עם זאת, במודל אין ביטוי ישיר להשפעה אפשרית של הלחות בקרקע או של צמחייה בקניון העירוני. אחד היעדים המרכזיים בפרויקט הנוכחי היה אם כן שכלול מודל CAT באופן שיאפשר לבטא את ההשפעה של צמחייה ברחוב העירוני. לשם כך פותח מודל המאפשר לחשב את טמפרטורת פני הקרקע או צמחיית כיסוי הצמודה לקרקע (כגון דשא) בהתחשב בשינויי לחות הנובעים ממשקעים או השקיה. המודל אומת בעזרת נתונים שעתיים אשר התקבלו מהתחנה המטאורולוגית בקמפוס שדה בוקר ואשר מייצגים שנה שלמה (Leaf and Erell, 2017).

3.2.3 אימות מודל CAT המשופר בעזרת נתונים אמפיריים

מודל CAT בגרסה המשופרת, הכוללת חיזוי של טמפרטורות הקרקע בתנאי רטיבות משתנים ובכיסוי צמחייה נבחן בעזרת נתונים אשר התקבלו ממחקר אשר מתקיים באוניברסיטת מונש במלבורן¹. במסגרת מחקר זה, נמדדו לאורך תקופה ארוכה נתונים מטאורולוגיים במספר נקודות בכיכר עירונית במרכז העיר וברחובות הסמוכים לה. איור 23 מציג את הטמפרטורות החזויות לפי מודל CAT בהשוואה לטמפרטורות אשר נמדדו בפועל באחת מתחנות המחקר. כקלט למודל שימשו הנתונים המטאורולוגיים בשדה התעופה של העיר, המרוחק כ-20 ק"מ ממקום ביצוע המחקר.



איור 23: מהלך טמפרטורת האוויר ברחוב במלבורן לפי מודל CAT המשופר ולפי מדידות בשטח

העיבוד של הנתונים שהתקבלו מצוות המחקר במלבורן עדיין לא הסתיים, ואפשר שבמודל CAT יוכנסו שיפורים נוספים אשר יאפשרו לבחון את השפעתה של השקית הצמחייה בעיר ביתר פירוט. העבודה על החלק הזה במודל צפויה להסתיים בחודשים הקרובים.

3.2.4. בניית ממשק לקישור בין תוכנת לבין מ"ג , ופיתוח גרסה מרחבית של

תוכנת CAT במתכונת הקיימת מבצעת הדמיה של טמפרטורת האוויר ופרמטרים מטאורולוגיים אחרים ברחוב עירוני על בסיס נתונים מדודים מתחנה מטאורולוגית תקנית מחוץ לעיר. לביצוע ההדמיה, נדרש תיאור של הגאומטריה והתכסית בתחנת הייחוס וברחוב. השילוב עם GIS יאפשר לבצע את הסימולציה באופן אוטומטי עבור מספר רב של נקודות בעיר במקביל, ולכן בניית ממשק לקישור בין תוכנת CAT לתוכנת GIS היא שלב חיוני בפרויקט.

עבור תיאור הגאומטריה של רחוב פותחה שיטה לחישוב גובה הבניינים הממוצע והרוחב הממוצע של כל רחוב בעזרת GIS. עבור תיאור התכסית נבנה ממשק אשר קורא את המידע על התכסית של פני השטח באופן מובנה מבסיס נתונים ב-GIS. מיפוי מדויק של כמות הצמחייה והמים באזורים עירוניים דורש נתונים ברזולוציה גבוהה וכיסוי מרחבי של כל אזור המחקר. תהליך המיפוי משלב נתוני חישה מרחוק ונתונים וקטוריים, ונעשה במספר שלבים: בשלב הראשון לצורך מיפוי התכסית השתמשנו בהדמיות Google-Earth. תהליך המיפוי עצמו בוצע ע"י יישום אלגוריתם maximum likelihood בתוכנת ArcGIS. אלגוריתם זה מחלק את הפיקסלים למספר קבוצות הנקבע ע"י המשתמש בהתאם למאפיינים הספקטראליים שלהם. בשלב השני, שילבנו את בסיס הנתונים הוקטוריים (שכבות הבניינים והכבישים) תוך צמצום מספר הקבוצות ל-6 סוגי תכסית: (1) בניינים, (2) קרקע חשופה, (3) משטחים בלתי חדירים (כבישים, מגרשי חנייה וכד'), (4) צמחייה, (5) מים ו- (6) צל. כדי לזהות במדויק יותר צמחייה, נרכשו הדמאות לוויין (WorldView-2 (WV2) ברזולוציה של 2 מ' הכוללות אורכי גל בתחום הנראה והאינפרא אדום, אשר מאפשרים חישוב של אינדקס הצמחייה Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). הסיווג הסופי בוצע ע"י ניתוח רב שכבתי (overlay) בין ששת סוגי התכסית הנ"ל ובין פיקסלים שזוהו כצמחייה בהדמאת ה-NDVI. השלב האחרון כלל חישוב אחוז הכיסוי של צמחייה ומים עבור כל פוליגון רדיאלי.

ניתוח מרחבי-עיתי מתבסס במקרים רבים על ניתוח של ערכי ישויות ביחס לסביבה מוגדרת (neighborhood) או חיץ (buffer). במחקר זה נדרשת הגדרה של חיץ רדיאלי עבור מודל CAT, על מנת להתייחס לתכסית התורמת למאזן האנרגיה ולאדי המים באוויר בכל נקודה בהתאם לכיוון הרוח הרגעי וליציבות האטמוספירית. לשם כך פותח כלי ב-ArcGIS שמייצר באופן אוטומטי פוליגונים רדיאליים בהתאם למרחק ולזווית נתונים. המודל שפותח עבר מספר עדכונים על מנת לפשט ולייעל את המודל ולאפשר אוטומציה ופרמטריזציה מלאים של תהליך בניית המעגלים. המודל תורגם לכלי geoprocessing אינטגרלי (בשפת Python) ומקבל כקלט שכבת נקודות שלגביה מתבצע החיזוי בתוכנת CAT, בכל מיקום גיאוגרפי נדרש. הפלט המתקבל כולל פוליגונים רדיאליים סביב כל נקודת חיזוי בהתאם לאוריינטציה שהוגדרה.

המודל הודגם בהצלחה עבור מטריצה של 7x7 תאים באזור העירוני של בת-ים בשטח הכולל גם את מתקן הביו-פילטר. על מנת לבחור אזור מייצג נעשה ניתוח hot-spot analysis של יחסי הגובה/רוחב של הבניינים על שטח העיר בת ים (כ-8.28 קמ"ר). ניתוח זה מאפשר לזהות אזורים בעלי התקבצות של ערכים גבוהים (המובילים לאי חום גבוה יותר) ואזורים בעלי התקבצות של ערכים נמוכים. בנוסף, הניתוח מתבסס על מבחנים סטטיסטיים המאפשרים להעריך אם הדפוסים שזוהו הם אמנם בעלי מובהקות סטטיסטית.

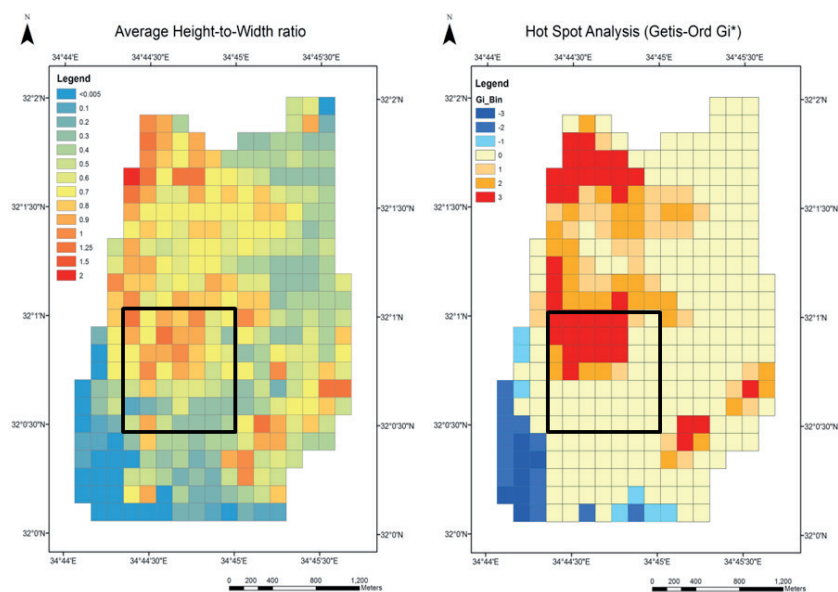
הניתוח הראה (איור 25) שיחסי הגובה/רוחב נעים בין 0 ל-1.96 (ממוצע - 0.5), כאשר הערכים הגבוהים מרוכזים בשני מקבצים עיקריים. ניתוח הדמאות Google Earth הראה שאזורים אלו מאופיינים בבנייני מגורים של 3-6 קומות בעלי צפיפות גבוהה, המסווגים כבעלי מורפולוגיה עירונית 'compact mid-rise' על פי מודל הסיווג לאזורי אקלים מקומיים (של Stewart and Oke 2012).



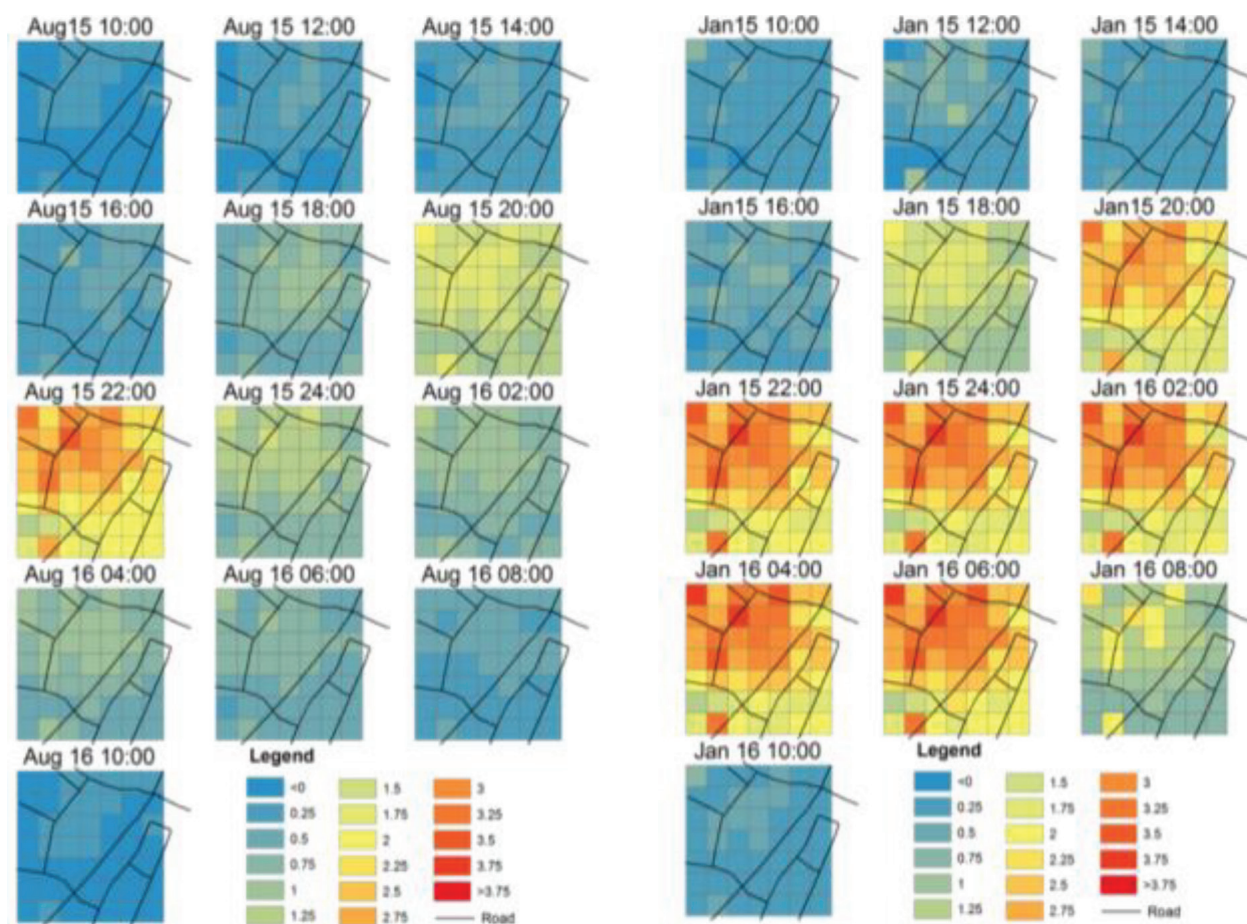


איור 24: נקודות המדגם המייצגות מטריצה של 7x7 תאים, כולל דוגמה (בתא הצפון-מזרחי ביותר) לאחד מתוך 49 המעגלים שהמודל מייצר סביב כל נקודת חיזוי

לצורך הצגת ההתפתחות המרחבית והעתית של אי החום העירוני נבחרו יום חורף ויום קיץ אופייני. כצפוי, הדפוס המרחבי של אי החום תואם את דפוס יחס הגובה/רוחב (איור 26). אי החום הממוצע הינו 2.5-2.25 עבור שני הימים שנבחרו. בחורף אי החום נמשך במהלך רוב שעות הלילה לעומת הקיץ בו אי החום מגיע לשיאו בשעה 22:00 ומתפוגג מיד לאחר מכן. הסיבה להבדל נעוצה במשטר הרוחות: בחורף מהירות הרוח היא "0" בשעות הלילה. נתון זה בשילוב הקרינה הנמוכה במהלך היום והעדר עננות מוביל לטמפרטורות נמוכות בתחנה המטאורולוגית. בקיץ, מהירות הרוח יורדת במהלך הערב אך מתגברת סביבות השעה 23:00 (בריזת לילה) וגורמת לערבול האוויר והסעת החום מהעיר (Kaplan et al., 2016).



איור 25: הדפוס המרחבי של יחס גובה/רוחב עבור בת-ים (שמאל) וניתוח hot-spot (ימין)



איור 26: ההתפתחות המרחבית והעיתית של אי החום העירוני עבור יום חורף (ימין) ויום קיץ (שמאל)

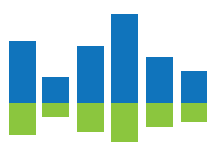
3.2.5 הדמיית טמפרטורת אוויר בעיר בשיטות שונות

את ההשפעה של אמצעים שונים (כגון צמחייה) על טמפרטורת האוויר בעיר אפשר להעריך בצורות שונות. ביקשנו אפוא לערוך השוואה בין הנתונים המתקבלים מהדמאת לוויין, מהדמיות מחשב באמצעות CAT ומדידות נקודתיות בשטח. לכל אחת מהשיטות יתרונות וחסרונות, אותם ניתן לסכם בטבלה 5.

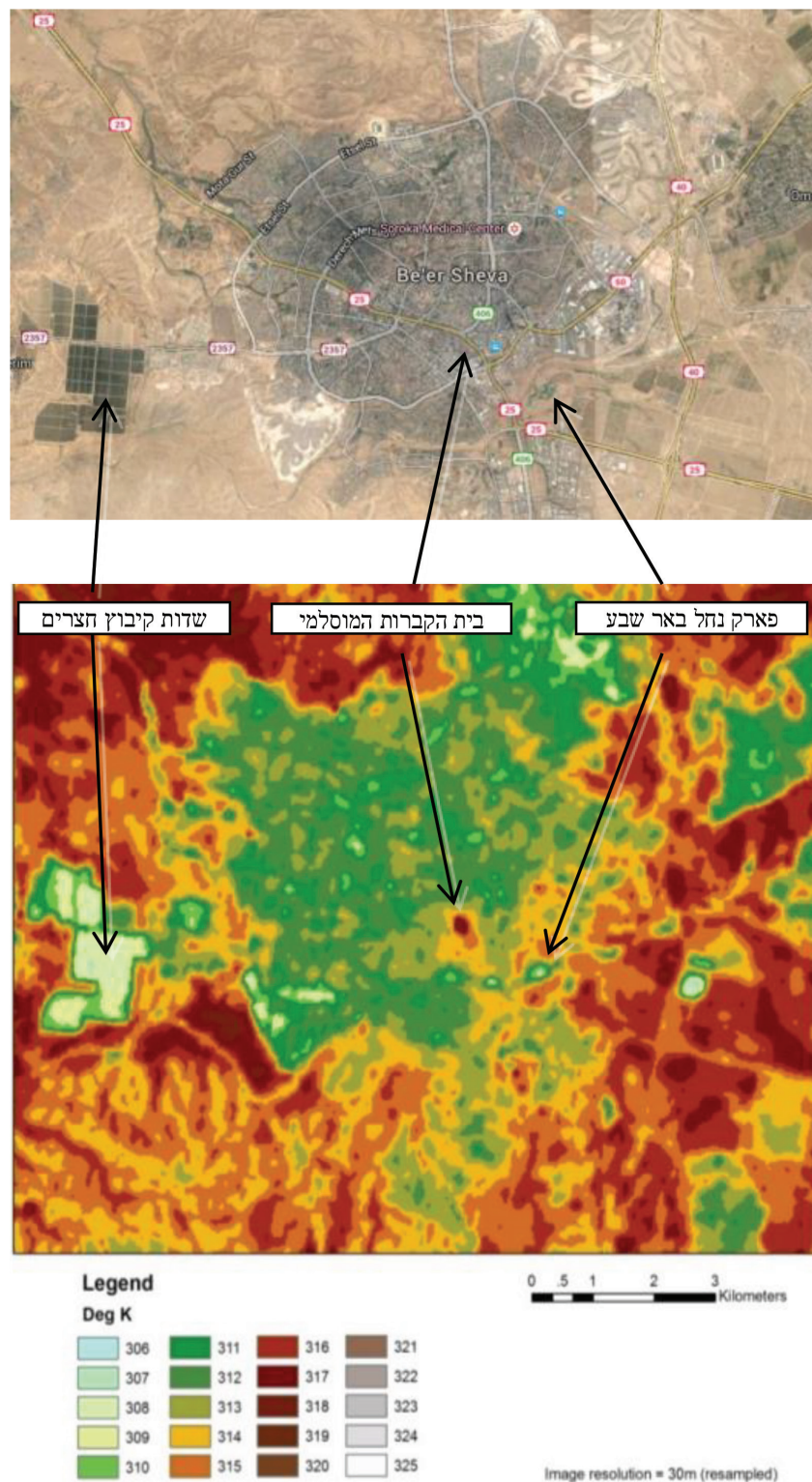
טבלה 5: השוואת שיטות שונות לאמידת הטמפרטורה בעיר

מדידות		לוויין	הדמיה CAT
שטח כיסוי	נקודות בודדות	העיר ושטח פתוח סביבה	העיר
רזולוציה מרחבית	נקודתית	90 מ' (לפי הלוויין)	נקודות המייצגות תאים של 150X150 מ'
רזולוציה עיתית	ערך אחד לכל נקודה במסלול המדידה	שעה קבועה, פעם בשבועיים	שעתי לכל השנה
מזג אוויר	אין הגבלה	שמיים בהירים בלבד	כל מזג אוויר
תכסית	נגישה לחוקרים (ברכב או אופניים)	משטחים החשופים לשמיים בלבד	רחובות עירוניים וגולריים

הערה: הלוויין מתאר טמפרטורה של פני השטח. ההמרה לטמפרטורת אוויר מורכבת מאוד, דורשת כיוול על סמך מדידות קיימות רבות, ואינה אפשרית בקנה מרחבי קטן. ראו למשל: Rosenfeld et al, 2017.



איור 27 מראה צילום תרמי של העיר באר שבע אשר נעשה בשעה 10:15 בבוקר ביום קיץ בהיר (יולי 2015).

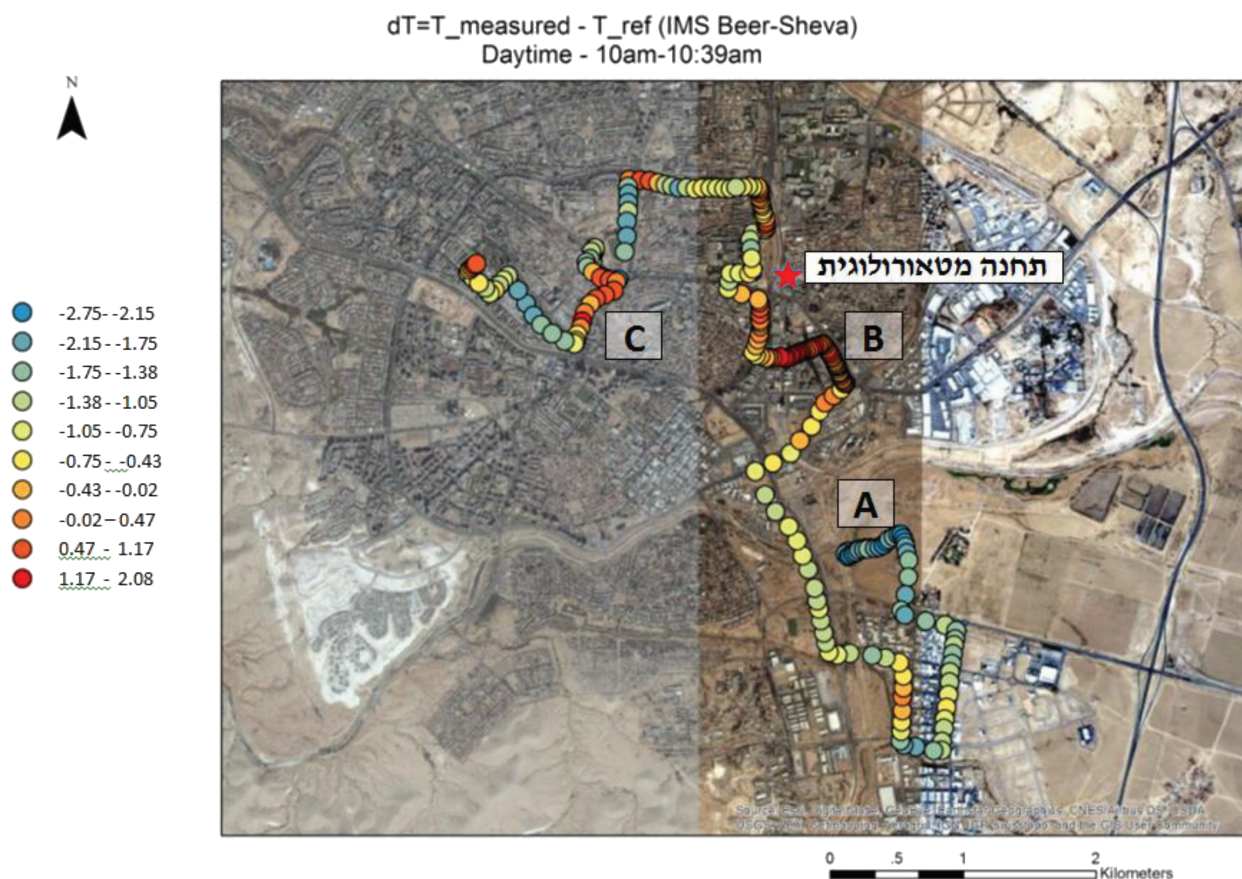


איור 27: למטה: צילום תרמי של העיר באר שבע בשעה 10:15 בבוקר. טמפרטורת פני השטח מתוארת במעלות קלווין. למעלה: צילום אופטי של אותו אזור (Google Maps).



התמונה התרמית ממחישה את הקושי בקבלת טמפרטורת אוויר במרחב העירוני על בסיס נתוני הלוויין. שטחים מושקים, כגון פארק ואדי באר שבע או שדות קיבוץ חצרים, אמנם נראים בבירור ככתמים בגוון ירוק בהיר (קרים), שהטמפרטורה שלהם היא כ-307-308 קלווין (בערך 34-35 מעלות צלזיוס). אולם הקרקע החשופה מחוץ לעיר חמה במידה ניכרת מהשטחים האלה, והעיר כולה נראית קרירה יותר מאשר המרחב סביבה. לא ניתן כמעט להבחין בהשפעתן של גינות מקומיות בעיר משום שהרזולוציה של הלוויין גסה מדי, ושטח הגינות קטן משטח הפיקסלים הבודדים בתמונה. הכתם החם במרכז העיר, שהטמפרטורה שלו היא כ-315-316 קלווין (כ-42-43 מעלות צלזיוס) הוא בית הקברות המוסלמי – שטח פתוח וחשוף, נטול צמחייה.

מידות טמפרטורה נמדדות נעשו בזמן מעבר הלוויין באמצעות מערך מדידה אשר נישא על גבי מכונית. הפרש הטמפרטורה בין הנתונים אשר נרשמו ברכב לבין טמפרטורה אשר נמדדה בו-זמנית בתחנה קבועה של השירות המטאורולוגי הישראלי מתואר באיור 28. לאורך רוב המסלול חושב הפרש הטמפרטורה שלילי, כלומר הטמפרטורה ברחבי העיר הייתה מעט נמוכה מהטמפרטורה בתחנה המטאורולוגית. תופעה זו בולטת יותר בשולי העיר, בשטח פארק נחל באר שבע (נקודה A). הפרש טמפרטורה חיובי של 1-2 מעלות צלזיוס נרשם רק במרכז העסקים של העיר (B) וברחוב הראשי של שכונת מגורים ובה בניינים בגובה בינוני או גבוה (C).



איור 28: הפרשי טמפרטורה (מעלות צלזיוס) אשר נמדדו באמצעות רכב אשר חצה את העיר באר שבע בין השעות 10:00-10:30 ביום קיץ בהיר (12 יולי 2016). מיקום התחנה המטאורולוגית אשר שימשה כתחנת ייחוס מסומן בכוכב אדום

4. הנחיות והמלצות מעשיות לביצוע

מדי חורף, אנו חווים הצפות בישובים עירוניים שונים בכל רחבי הארץ. חלקם של האירועים מתרחשים במקומות מועדים, שנה אחר שנה, אבל חלק ממקרי ההצפה מתרחשים באזורים אשר אינם מוכרים כבעייתיים. זיהוי שיטתי של כל האזורים הנמצאים בסכנת הצפה עשוי לסייע בהפיכת הנגר העילי העירוני מנטל לנכס. את מי הנגר אפשר יהיה לנצל להחדרה למי התהום או להשקיה של צמחייה אשר תסייע בהפגת אי החום העירוני. לשם כך יש צורך לא רק לזהות את הנקודות שבהן ניתן לקצור את מי הנגר אלא גם את האזורים שבהם תוספת צמחייה תביא לתרומה הרבה ביותר לנוחות תרמית של הולכי רגל או לחיסכון באנרגיה בבניינים.

חשוב להדגיש כי עצמתו של אי החום העירוני קטנה בדרך כלל בשעות היום, כפי שהראו הדמיות המחשב והמידות בבאר שבע. הפרש הטמפרטורות בין העיר לסביבתה מורגש בעיקר בלילה. יחד עם זאת, הצמחייה עשויה לשפר את הנוחות התרמית של הולכי רגל בקרבתה בשעות החמות. לשם כך, יש צורך בכלים אשר יסייעו למתכננים למקם צמחייה מתאימה ולהעריך את תרומתה.

עם השלמת המחקר, יהיו בידי המתכננים כלים תומכי החלטה אשר יסייעו לתכנון מושכל של תכנון עירוני רגיש למים על ביסוס ניתוח מלא של מאזני המים והאנרגיה ברחובות, בגינות ובשטחים הפתוחים בסביבה הבנויה. הכלים האלה אמנם יידרשו מומחיות רבה – בהכנת הנתונים להדמיות, בהרצת תוכנות המחשב ובניתוח התוצאות – אולם הם יהיו קפיצת מדרגה בהשוואה לאמצעים העומדים בידי המתכננים כיום. אנו צופים שני תהליכים עיקריים:

א. ניתוח הידרולוגי בשכונות עירוניות קיימות בתרחישים שונים המבטאים כמויות משקעים ועוצמות גשם שונות, על מנת לזהות מוקדים המועדים להצפה. בהתאם לתחזיות ניתן יהיה לבחון את השפעתן של חלופות תכנון שונות אשר מטרתן למזער את הנזקים ולאפשר ניצול מיטבי של מי הנגר. בעוד שכיום נמצאים בידי המתכננים אוגדנים גנריים, הניתוח הממוחשב יאפשר למפות אמצעים מתאימים הבאים לתת מענה לבעיות ממוקדות ולהעריך שיקולי עלות-תועלת על מנת להגיע לפתרון האופטימאלי.

ב. מיפוי של הטמפרטורות במרחב העירוני וזיהוי מוקדים של טמפרטורה גבוהה אשר עלולים להיות בעייתיים במיוחד בזמן גלי חום, עקב ההשפעה המשולבת של התנאים הסינופטיים והשפעת אי החום העירוני.

הכלים אשר מפותחים במסגרת המחקר הזה נבחנים בהקשר הישראלי, בתיאום עם קבוצות המחקר האחרות. תפוצת המסקנות בארץ וסוג התכנית מביאים לכך שריכוז המוצקים המרחפים במי הנגר בישראל הינו פי 4-6 בהשוואה, למשל, לאוסטרליה, למשל, לכן יש חשיבות במתן פיתרונות אשר יהיו ימנעו פגיעה בתכונות הקרקע ובצמחייה הקולטת את הנגר.

השימוש המשולב בכלים הממוחשבים יאפשר לנצל את האמצעים לטיפול במי הנגר, המשלבים צמחייה, לשיפור התנאים הסביבתיים ובפרט להקלת עומס החום. ההחלטות בדבר היישום של אמצעים שונים כגון אלמנטים נקודתיים, קווים או מרחביים ייעשה אפוא על מנת לתת מענה מיטבי לשתי הסוגיות.



משרד הבינוי והשיכון – משהב"ש (2007), המלצות לתכנון ניקוז עירוני (עורך אינ' ירון שלומי, חברת הידרומודול – פולק שמואל בע"מ).

Erell E. and Williamson T. (2006). Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *International Journal of Climatology*, 26: 1671-1694.

Kaplan S., Peeters A. and Erell E. (2016). Predicting air temperature simultaneously for multiple locations in an urban environment: a bottom up approach. *Applied Geography*, 76:62-74.

Leaf S. and Erell E. (2017). "A model of the ground surface temperature for micrometeorological analysis". *Theoretical and Applied Climatology*, in press. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2207-5>

Salvadore E., Bronders J., & Batelaan O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions, *Journal of Hydrology* 529: 62-81.

Shoemaker, L. (2009). SUSTAIN — A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban Watersheds to Protect Water Quality. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/095.

Shoemaker L., Riverson Jr J., Khalid A., Zhen J. X. and Murphy R. (2011). Report on enhanced framework (SUSTAIN) and field applications for placement of BMPs in urban watersheds, Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-11/144.

Shoemaker L., Riverson Jr J., Khalid A., Zhen J. X., Murphy R. and Wood B. (2013), Stormwater Management for TMDLs in an Arid Climate: A Case Study Application of SUSTAIN in Albuquerque, New Mexico, Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-13/004.

Stewart I. and Oke T. (2012). Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12): 1879—1900.

Sun, Y., Tong, S., Yang, Y. J. (2016). Modeling the cost-effectiveness of stormwater best management practices in an urban watershed in Las Vegas Valley, *Applied Geography* 76, 49-61.