

ד"ר אור אלכסנדרוביץ', אדר' נוף שחר צור
אדר' יונתן לבנדיגר, ד"ר יואב לרמן

מפות צל והשימוש בהן לטובת שימור ועיבוי צל בתל אביב־יפו

דו"ח מסכם

מוגש למחלקת השימור, עיריית תל אביב־יפו
ניהול המחקר במחלקת השימור: אדר' רינת מילוא

יולי 2019

תקציר

ישראל היא מדינה חמה, עם רמות גבוהות של חשיפה לקרינת שמש ישירה במשך חודשים ארוכים. ברוב חלקיה של הארץ, חשיפה לקרינה זו, מלבד הנזקים הבריאותיים הידועים שלה, אחראית גם יותר מכל גורם אקלימי אחר (טמפרטורת האוויר, הלחות היחסית ומהירות הרוח) לפגיעה משמעותית בנוחות התרמית של המשתמשים ברחובות ובחלליה הפתוחים של הסביבה העירונית. מאותה סיבה בדיוק הליכה או שהייה בסביבה מוצלת, אפילו בשיא העונה החמה, יכולה לשנות מקצה לקצה את תחושת הנוחות האישית גם ללא שינוי משמעותי בטמפרטורת האוויר או בעוצמת הבריזה.

לא פעם נדמה כי עובדות פשוטות אלה לא הצליחו לחלחל לפרקטיקות התכנון העירוני בישראל: מרחבים עירוניים רבים תוכננו בעבר ומתוכננים גם היום תוך התחשבות מועטה מאוד בתנאים האקלימיים שיוצר התכנון, ובראשם החשיפה לקרינת השמש. התוצאה היא מרחבים עירוניים פגומים מבחינה אקלימית שהשימוש בהם מוגבל מאוד ואפילו בלתי נסבל. עם זאת, ולמרות המודעות להיקפה העצום של הבעיה, חסרים עדיין גופי התכנון שיטות מבוססות נתונים שיאפשרו לבצע הערכה כמותית לאיכות האקלימית של הסביבות העירוניות ולתעדף פעולה עירונית לשיפור התנאים האקלימיים במרחבים קיימים.

מיפוי

מטרת הפרויקט המחקרי שערכנו בתל אביב-יפו היתה לענות על מחסור זה ולספק לתכנון העירוני כלים לגישור על הפער הקיים בין ידע אקלימי תיאורטי לפרקטיקות מקובלות של תכנון עירוני. בבסיס הפרויקט עמדה ההבנה, שמקור הפער הוא בראש ובראשונה בקושי המובנה בתרגום נתונים אקלימיים כמותיים לשפה המדוברת של המתכננים העירוניים. הפתרון שמצאנו לבעיה זו היתה בהנגשת המידע דרך האמצעי הגרפי של המפה. מאחר שהאתגר האקלימי העיקרי ברחובות הערים בישראל הוא המחסור בצל בשעות היום, בחרנו להציג את גווני השונים של האקלים העירוני באמצעות "מפות צל". מפות הצל מציגות את טווח רמות ההצללה ברחובות ובאזורים שונים של העיר ומנכיחות כך באופן חזותי את ההיררכיה המרחבית של הצל בכל

רחבי העיר.

הפקת מפות הצל נעשתה בכלים חדשים המוטמעים במערכות מידע גיאוגרפיות (GIS) ממוחשבות. כלים אלה מאפשרים לחשב את עוצמת הקרינה בכל נקודה במרחב לפי כיוון הפגיעה ועוצמתה של קרינת השמש ותכונותיו התלת־ממדיות של המרחב העירוני (גובה פני הקרקע, גובה ותכסית המבנים וגובה צמרות העצים). כדי לחשב את רמות ההצללה בכל נקודה ביום טיפוסי בקיץ, יש לבצע פעולה פשוטה של חישוב היחס בין עוצמת הקרינה המצטברת על משטח אופקי שאינו מוצל לעוצמת הקרינה המצטברת בשטח המוצל. אותם כלים מאפשרים, על בסיס המיפוי התלת־ממדי של צמרות העצים, גם לחשב את מדד כיסוי הצמרות העירוני ברחובות ובעיר כולה, מדד המשמש לכימות נוכחותם של עצים נותני צל ברחבי העיר.

כשעורכים מפות צל לעיר כמו תל אביב־יפו, עיר שהמרחב העירוני שלה נבנה בשלבים על פי תפיסות תכנוניות שונות, עם הבדלים ניכרים בצפיפות הבינוי ובשימוש בעצים במרחב הציבורי בין אזורים שונים של העיר, ניתן לא רק לאתר בעיות של מחסור בהצללה, אלא גם רחובות או חלקי עיר שבהם תנאי ההצללה מוצלחים מאוד. מכאן גם אפשר להציע שני סוגים של התערבות עירונית במרחב: "עיבוי צל" עבור אזורים שרמות ההצללה שבהם נמוכות, ו"שימור צל" עבור אזורים שבהם רמות יוצאות דופן לטובה של הצללה. בנוסף, מיפוי כיסוי הצמרות העירוני מאפשר לכמת גם את תרומתם היחסית של העצים לרמות ההצללה באזורים שונים של העיר.

ממצאים

מיפוי רמות ההצללה בתל אביב־יפו נעשה בשתי רמות: מיפוי רמות הצללה ממוצעות בכל מקטעי הרחובות בעיר, ומיפוי רמות ההצללה ממוצעות בחלקיה השונים של העיר. מפות הצל הבליטו את יתרונותיהם האקלימיים של רחובות הפרוסים מצפון לדרום (בעיקר בשל הצללת בניינים על שטח הרחוב) ושל בנייה צפופה יחסית. הדבר ניכר במיוחד באזור תוכנית גרס (מרכז תל אביב שממערב לרחוב אבן גבירול) ובשכונת פלורנטיין. בעוד שבתוכנית גרס יש לעצים תרומה חשובה להצללה, בפלורנטיין, שבה אין כמעט עצים, מושגות רמות הצללה גבוהות בעיקר בזכות חתך הרחוב הצר (בניינים גבוהים יחסית ברחובות צרים). עוד התברר כי בתל אביב־יפו מתקיימת בין חלקיה השונים שונות מרחבית גבוהה ברמות ההצללה: בשעה שרמות

ההצללה ברוב שכונות עבר הירקון ובתוכנית ג'דס גבוהות יחסית, ברוב שכונותיה הדרומיות של העיר רמות ההצללה נמוכות.

מפות הצל מראות עוד כי תרומתם של העצים להצללה עולה בחשיבותה בעיקר ברחובות שבהם מושגת הצללה מועטה מהבניינים עצמם. הדבר ניכר במיוחד ברחובות ראשיים הפרוסים ממערב למזרח: בהיעדר כמות מספקת של עצים (כמו לדוגמה ברחובות פנקס, ז'בוטינסקי בחלקו המזרחי, ארלוזורוב בחלקו המזרחי, שאול המלך, קפלן, סלמה, קיבוץ גלויות ודרך בן צבי), רחובות אלה חשופים לקרינת שמש ישירה ברוב שעות היום, מתקשים לספק הצללה ותנאי האקלים שבהם קשים. באופן לא מפתיע, שדרות העיר, ללא קשר לכיוון הגיאוגרפי של הרחובות, מספקות ברובן המכריע (מלבד חלקיהן המזרחיים של שדרות בן גוריון וחלקיהן המערביים של שדרות נורדאו) תנאי הצללה מעולים.

השוואה בין שטח כיסוי הצמרות בשכונות שונות לרמות ההצללה הממוצעות בהן מעלה עוד כי בשכונות עבר הירקון רמות ההצללה הגבוהות תלויות במידה רבה בכמות ניכרת של עצים נותני צל ששתולים בהן. אילו היו בהן כמויות נמוכות יותר של עצים (תופעה שמאפיינת רבות משכונות דרום העיר) היו רמות ההצללה שבהן נמוכות באופן משמעותי. הסיבה העיקרית לכך היא הבנייה המפוזרת והדלילה יחסית ברוב השטחים שמעבר לירקון. בשטח תוכנית ג'דס, לעומת זאת, ניכר שילוב יעיל בין בנייה צפופה לשימוש בעצים נותני צל, ושילוב ייחודי זה הוא שאחראי לרמות ההצללה הגבוהות בחלק זה של העיר.

תיעדוף התערבות

כשלעצמן, מפות הצל חושפות באופן בהיר וקריא את ההבדלים האקלימיים בין רחובות ושכונות בעיר. עם זאת, כדי לסייע לעירייה לגבש תוכנית פעולה לעיבוי צל ולשימור צל ברחבי העיר, לא היה די במיפוי זה. כמות מקטעי הרחובות שבהם חשף המיפוי רמות נמוכות מאוד או גבוהות מאוד של הצללה, שהם המקטעים שבהם נחוצה התערבות דחופה יותר, היתה רבה מאוד. הבנו שכדי לתעדף פעולה עירונית ולמקד אותה ברחובות החשובים באמת יש להוסיף מרכיב נוסף לניתוח, הנוגע לפוטנציאל השימוש ברחוב. הרעיון פשוט: ככל שפוטנציאל השימוש ברחוב גבוה יותר, כך יש חשיבות גבוהה יותר להתערבות העירונית בתוכו.

את פוטנציאל השימוש בכל אחד מהרחובות בעיר חישבנו באמצעות שיטה מתמטית לניתוח מרחבי שנקראת "תחביר המרחב" (Space Syntax). בשיטה זו כל אחד מרחובות העיר מקבל ציון מספרי המשקף את כמות התנועה הרגלית שהוא צפוי למשוך, על בסיס מיקומו ברשת הרחובות העירונית. את הציון הזה שקללנו עם מפות הצל של רחובות העיר. השקלול הביא להבלטת מספר מצומצם של רחובות שמצד אחד חשיבותם המרחבית גדולה ופוטנציאל השימוש בהם גבוה, ומן הצד האחר תנאי ההצללה שבהם גרועים מאוד (לדוגמה: ציר שלבים, רחוב קפלן, דרך קיבוץ גלויות) או יוצאי דופן באיכותם הטובה (לדוגמה, שדרות ירושלים, שדרות רוטשילד, רחוב שלמה המלך, רחוב דיזנגוף, המקטע המערבי של רחוב ארלוזורוב). אלה הרחובות שאנו ממליצים למקד את הטיפול בהם בטווח הזמן המיידי.

תוכן עניינים

7	הקדמה
7	צל, אקלים והעיר הלבנה
8	רקע מדעי
11	מתודולוגיה
11	חישוב ערכים גולמיים באמצעות כלים ממוחשבים קיימים
14	חישוב ערכים ממוצעים ופיתוח מדדים נוספים
16	תיעדוף פעולה עירונית על בסיס מדד ההצללה
20	תוצאות
20	שלב א': כימות נוחות תרמית והצללה במרכז תל אביב
27	שלב ב': כימות הצללה בתל אביב-יפו
39	דיון ומסקנות
48	סיכום
49	ביבליוגרפיה

הקדמה

צל, אקלים והעיר הלבנה

בינואר 1965, במהלך דיון על חשיבותו של מחקר אקלימי לעבודת משרד השיכון, טען אלכסנדר פיקרצ'יק, אחד האדריכלים הבכירים במשרד באותם ימים, כי העלייה ברמת החיים מחייבת בחינה מחודשת של ההנחיות האקלימיות, משום ש"לא רחוק היום שאפשר יהיה להתקין קרור ואורור ברחובות, כפי שמקובל עכשיו בבתים" (Aleksandrowicz, 2015). יותר מחצי מאה לאחר מכן ניתן לקבוע שנבואתו העתידנית של פיקרצ'יק עוד רחוקה מלהתגשם וכי הסביבה הבנויה בישראל ממשיכה להציב בפנינו אתגרים הדורשים תשומת לב מיוחדת להשלכות האקלימיות של תכנון המרחב העירוני הבנוי.

תל אביב-יפו מתאפיינת באקלים חם ולח, בשעות אור רבות (3300 שעות בשנה) וברמות גבוהות של שטף סולארי (5 kWh/m^2 ביום בממוצע). באקלים כזה הופכת החשיפה לקרינת שמש ישירה במרבית שעות היום בקיץ ואף בחלק מעונות המעבר לגורם המשפיע באופן שלילי על הנוחות תרמית של המשתמשים ברחובות ובמרחבים הציבוריים בעיר. כתוצאה מכך מצטמצם השימוש במרחבים אלה ומוגבלת מאוד היכולת לנצל את המרחב הבנוי למגוון רחב של פעילויות כגון שהייה, הליכה, בילוי, פעילות ספורטיבית ונסיעה באופניים. על רקע זה בולט היעדרה של שיטה ברורה להערכה מבוססת נתונים של האיכות האקלימית של רחובות ושטחים פתוחים בעיר, ולהשפעה שיש לתכנון על התפקוד האקלימי של המרחב הציבורי. מחקר זה מבקש לענות על פער ידע זה באמצעות פיתוח שיטה לכימות ברזולוציה גבוהה של חשיפת המרחבים הציבוריים (רחובות, כיכרות, גינות וכו') לקרינת השמש ולתיעדוף פעולות עירוניות לשיפור האיכות האקלימית של מרחבים אלה. הוא עושה זאת על ידי חישוב רמות ההצללה של מרחבים אלה בקיץ ופוטנציאל התנועה הרגלית באותם מרחבים.

ראשיתו של מחקר זה בבקשה שהציגה מחלקת השימור של העירייה לבחון עד כמה הסביבה האקלימית ב"עיר הלבנה" של תל אביב (אזור ההכרזה של אונסק"ו משנת 2003) או בכל שטחה של "תוכנית גדס" יוצאת דופן וייחודית ביחס לחלקים אחרים של העיר. חשבנו, כי כדי לענות על שאלה זו לא ניתן להסתפק בפנייה

למקורות היסטוריוגרפיים "קונוונציונליים" (טקסטים, מפות, תצלומים), וכי יש לנסות לבחון את השאלה באמצעות מדדים פיזיקליים כמותיים. מטעמים מעשיים, לא ניתן היה לבצע במסגרתו המצומצמת של מחקר זה מערך אינטנסיבי של מדידות ברחובות העיר, ומשום כך החלטנו לפנות לכלי ניתוח חישוביים שבהם ההערכה האקלימית מבוססת על המיפוי העכשווי והמדויק ביותר של בניינים, עצים ופני השטח בעיר. כמו כן היה ברור לנו כי כדי להעריך נכונה את ייחודיותה של הסביבה האקלימית ב"עיר הלבנה" יש לערוך את הניתוח על כלל השטח העירוני בתל אביב-יפו ולא להסתפק רק ב"עיר הלבנה" עצמה. ניתוח כלל-עירוני מאפשר להעריך בצורה השוואתית יתרונות או חסרונות שיש לאזורים מסוימים על פני אזורים אחרים. המעבר לניתוח כלל-עירוני היה, אמנם, רחב בהרבה מהכוונות הראשוניות של מחלקת השימור, אבל מעבר לתרומה שהיתה לו להערכת "העיר הלבנה" עצמה, הוא סייע גם בגיבושה של שיטת ניתוח והערכה לנוחות אקלימית במרחב העירוני התל אביבי בכללותו.

רקע מדעי

המרחב העירוני הוא מרחב שבו מתקיים מיקרו-אקלים ייחודי הנוטה להיות חם יותר מהשטחים הפתוחים שמקיפים אותו. תופעה זו, הידועה בשם "אי החום העירוני", נובעת מהתצורה הפיזית של העיר, מחומרי הבנייה שמהם נבנים בנייני העיר, מהחומרים ומהחדירות למים של המדרכות והכבישים, מדפוסי זרימת האוויר דרך רחובות העיר ומפעילות אנושית כגון תחבורה ותעשייה (Taha, 1997; Akbari et al., 2001; Unger, 2004; Grimmond, 2007); כל אלה גורמים לטמפרטורת האוויר בתוך העיר לעלות באופן משמעותי על הטמפרטורה הנמדדת בשוליה, תופעה שתועדה במחקרים לא מעטים גם בתל אביב (Saaroni et al., 2000; Sofer & Potchter, 2005; Rotem-Mindali et al., 2015). ל"אי החום העירוני" מיוחסות מספר רב של תופעות שליליות, בין השאר החרפת התעוקה התרמית של המשתמשים במרחב הציבורי (בשעות היום והלילה כאחד), עלייה בשיעורי תמותה בשל חשיפה לחום והחרפת זיהום האוויר (Oke, 1981; Nikolopoulou et al., 2001; Arnfield, 2003; Johansson, 2006; & Emmanuel, 2006).

למרות חשיבותה של תופעת "אי החום העירוני", התחממות יתר של האוויר במרחב העירוני אינה הסיבה היחידה, ולעתים גם לא העיקרית, לתחושת התעוקה התרמית של המשתמשים במרחב. בעונה החמה השפעת פגיעתה של קרינת השמש הישירה במשתמשים במרחב ובמשטחים השונים של הסביבה העירונית (כבישים, מדרכות, קירות מבנים) היא לרוב הגורם המרכזי המחולל תעוקה תרמית במהלך מרבית שעות היום. בניגוד ליכולתנו המוגבלת לווסת את טמפרטורת האוויר במרחב העירוני, ויסות החשיפה לקרינת שמש ישירה הוא פעולה קלה יחסית שדורשת בעיקרה תכנון נכון של הצללות במרחב (Erell et al., 2011, pp. 148-150). בארץ חמה כמו ישראל, תכנון מודע צל יכול להביא להפחתה משמעותית בתחושת התעוקה התרמית של המשתמשים (Shashua-Bar et al., 2009; Shashua-Bar et al., 2011; Hiemstra et al., 2017) ובכך לעודד את השימוש במרחב הציבורי בעיר בעונה החמה, וכן לסייע בהקטנת הנזקים הבריאותיים הנובעים מחשיפה ממושכת לקרינת שמש ישירה. בנוסף, חשיפה מופחתת של מפלס הרחוב לקרינת שמש ישירה מצמצמת את אגירת החום במשטחים השונים ברחוב (מדרכה, כביש, קירות בניינים) ובכך מסייעת להפחית את טמפרטורת האוויר ביום ובעיקר בלילה ולהקטין את העומסים התרמיים על בניינים בעונה החמה (Erell et al., 2011, pp. 48-54).

למרות חשיבותה של ההצללה ברחובות, עד לאחרונה כמעט שלא נעשו ניסיונות משמעותיים לניתוח כמותי של רמות החשיפה לקרינת השמש בקנה מידה עירוני. הדבר נובע מהיקפי הפעולות החישוביות הדרושות לצורת כימות הצללה ברזולוציה גבוהה, אבל לא פחות מכך מקשיים בהשגת מיפוי גיאוגרפי תלת־ממדי אמין ואיכותי של אזורים עירוניים. אחת הדוגמאות המוקדמות לפוטנציאל השימוש במיפוי תלת־ממדי לצורך חישוב הצללה עירונית נמצאת בעבודתם של Yu et al. (2009). בהתבסס על מיפוי לידאר (LIDAR) ותצלומי אינפרא־אדום מהאוויר של מרכז העיר יוסטון ועל שיפור מנגנון חישובי שפותח בידי חוקרים אחרים (SHORTWAVE, Kumar et al., 1997) הצליחו החוקרים להפיק מפות ברזולוציה של 1 מטר לפיקסל של דפוסי ההצללה בעיר עבור ערכים מצטברים של חשיפה לקרינה בכל אחד מחודשי השנה ובכל אחת מעונות השנה. ניתוח זה שימש אותם להערכת השפעת המורפולוגיה העירונית על דפוסי החשיפה לקרינת שמש, וכן לבחינת פוטנציאל החשיפה לשמש של צמחייה בעיר.

אלגוריתמים לחישוב חשיפה של פני הקרקע לקרינת שמש על בסיס מיפוי תלת־ממדי פותחו גם בידי Lindberg and Grimmond (2011) כחלק ממנוע החישוב SOLWEIG ובידי Hammerberg (2014), אם כי אף אחד מחוקרים אלה לא יישם את שיטת החישוב על פני עיר שלמה. משום כך, ניתן לטעון כי מעבר להוכחת היכולת התיאורטית להשתמש במיפוי תלת־ממדי לצורך חישובי הצללה נרחבים, לא נעשו עד היום שימושים משמעותיים בכלים אלה לצורך מיפוי מקיף של שיעורי הצללה בערים, לא כל שכן לצורך פיתוח מדדים כמותיים של הצללה עירונית שיוכלו לשמש כנקודות ייחוס לצורכי תכנון. המחקרים המועטים שניסו לכמת את השפעת ההצללה על המיקרו־אקלים העירוני מתמקדות בחלקי עיר מוגבלים בהיקפם, ואינם חורגים בדרך כלל מעבר להפקת מפות המציגות ערכי קרינה או טמפרטורת קרינתית ממוצעת בכל נקודה משטח הניתוח (Chen et al., 2016; Aminipouri et al., 2019).

מתודולוגיה

חישוב ערכים גולמיים באמצעות כלים ממוחשבים קיימים

מטרתו המרכזית של המחקר היתה לפתח מדדים יעילים לכימות נוחות תרמית בעונה החמה במרחב העירוני ברזולוציה גבוהה (עד רמת מקטעי רחובות בודדים) וליישום המדדים על ניתוח כלל עירוני. מדדים אלה פותחו על בסיס מיפוי תלת-ממדי של בניינים ועצים בעיר ותוך ניצול כלי חישוב המוטמעים במערכות מידע גיאוגרפיות (GIS) נפוצות. בין השאר שימשו כלים אלה גם כדי לבחון את האם קיים קשר סטטיסטי מובהק בין חשיפה לקרינת שמש לנוחות תרמית בעונה החמה בתל אביב.

כאמור, שימוש בנתונים גיאוגרפיים לצורך חישוב שיעורי החשיפה של מפלס הרחוב לקרינת השמש נעשה עד היום במספר מצומצם של מחקרים. רובם המכריע התמקד בחישוב אוטומטי של מקדם החשיפה לשמיים (Sky View Factor, SVF) שמתאר בערכים מ-0 ל-1 את החלק היחסי של כיפת השמיים החשוף לעין בנקודה מסוימת במרחב. אלגוריתמים לחישוב SVF מתוך מודל גבהים דיגיטלי (Digital Elevation Models, DEMs) פותחו ויושמו בסביבה עירונית בידי Ratti and Richens (2004), Lindberg (2007), Lindberg and Grimmond (2011), Chen et al (2012) ו-Hammerberg (2014). מספר קטן יותר של מחקרים הציגו חישוב SVF הלוקח בחשבון את ההפרעה לחשיפה לשמיים שיוצרת חופות העלווה של עצים עירוניים (Lindberg & Grimmond, 2011; Hammerberg, 2014).

על אף ש-SVF מאפשר לכמת בקלות יחסית את מידת החשיפה התיאורטית של מפלס הרחוב לחופת השמים, נתון זה אינו לוקח בחשבון את הדינמיקה של תנועת השמש היומית והשנתית ואת השפעתה המשתנה על המשתמשים במרחב העירוני. מיפוי מדויק של עוצמת פגיעת הקרינה הסולארית במפלס הרחוב (בערכים של וואט שעה למ"ר) מאפשר להתגבר על מגבלה זו, משום שהוא לוקח בחשבון את כיוון הפגיעה של קרינת השמש בקרקע ומשקף גם את השינויים היומיים והעונתיים בעוצמת קרינת השמש הפוגעת בפני הקרקע (ללא התחשבות בתנאי עננות). מיפוי נוסף, סבך יותר מבחינה חישובית אך מדויק יותר מבחינת כימות הנוחות התרמית של המשתמשים במרחב העירוני, אפשרי באמצעות חישוב מדדים של נוחות תרמית על סמך משתנים סביבתיים אובייקטיביים.

בקרב הקהילה המדעית מקובל היום להשתמש בשני מדדי נוחות תרמית למרחב הפתוח (בניגוד לנוחות תרמית בתוך מבנים): מדד Physiologically Equivalent Temperature (PET) ומדד Universal Thermal Climate Index (UTCI) שפותח כמה שנים אחריו (Matzarakis et al., 1999; Bröde et al., 2013; Matzarakis et al., 2015). באופן כללי, שני המדדים דומים במהותם, ומבוססים על נוסחה הלוקחת בחשבון משתנים אקלימיים שונים כדי לחשב באמצעותם "טמפרטורה שוות ערך". בכל אחד מהמדדים טווחים של טמפרטורות שוות ערך אמורים להעיד על רמות משתנות של נוחות או תעוקה תרמית. מדד UTCI דומה למדד PET בכך שהוא משקלל ערכים של טמפרטורת אוויר, מהירות רוח, לחות יחסית וטמפרטורה קרינתית ממוצעת (Mean Radiant Temperature, MRT), אולם הוא קל יותר לחישוב משום שבניגוד למדד PET אינו מצריך הערכה של החום שמפיק גוף האדם ושל רמות הלבוש שלו אלא משתמש בערכים קבועים עבור משתנים אלה.

הרכיב המורכב ביותר לחישוב או להערכה בחישוב שני מדדי הנוחות התרמית (PET ו-UTCI) הוא הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת (MRT). קיימים היום כמה כלים חישוביים המאפשרים חישוב ערכי MRT; המתאים ביותר לניתוח עירוני רחב היקף הוא התוסף UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) (Lindberg et al., 2018) לתוכנת ה-GIS בקוד פתוח (QGIS Development Team, 2018), וזהו הכלי שבו בחרנו להשתמש לחישוב הנתונים בשלב א' של המחקר. כלי זה מחשב ערכי MRT בהתבסס על הנתונים הבאים: נתוני מזג אוויר שמזין המשתמש לרגע נתון (טמפרטורה, לחות יחסית, מהירות רוח); מודל גבהים ראסטרי של פני השטח ללא עצים (DSM); מודל גבהים ראסטרי של פני הקרקע (DTM); ומודל גבהים ראסטרי של צמרות עצים. ערכי ה-MRT מחושבים עבור כל פיקסל במודל הגבהים הראסטרי המוזן לכלי. ככל שהרזולוציה של מודל זה גבוהה יותר, כך יהיה החישוב של ערכי ה-MRT מדויק יותר.

התוסף UMEP אינו מאפשר בשלב זה חישוב ערכי UTCI אלא רק MRT לכל פיקסל. כדי לחשב ערכי UTCI, יצרנו קוד חישוב של ערכים אלה על בסיס רכיבים המוטמעים בתוסף Ladybug (Sadeghipour Roudsari & Pak, 2013) לסביבת Grasshopper בתוכנת Rhino (Robert McNeel & Associates, 2018). הקוד מחשב ערכי UTCI על בסיס ערכי MRT, טמפרטורת אוויר, לחות יחסית ומהירות רוח

המוזנים לתוכו. ערכי ה-MRT חושבו, כאמור, בכלי UMEP, ואילו שאר הערכים נלקחו מתוך קובץ מזג האוויר הסטנדרטי של התחנה המטאורולוגית של בית דגן (במתכונת epw) ששימש גם לחישוב ערכי ה-MRT ב-UMEP. פעולת חישוב ה-MRT ב-UMEP מבוססת גם על הפקת ערכי SVF עבור כל פיקסל הכלול בחישוב, וכן על חישוב עוצמת פגיעת קרינת השמש באותה נקודה.

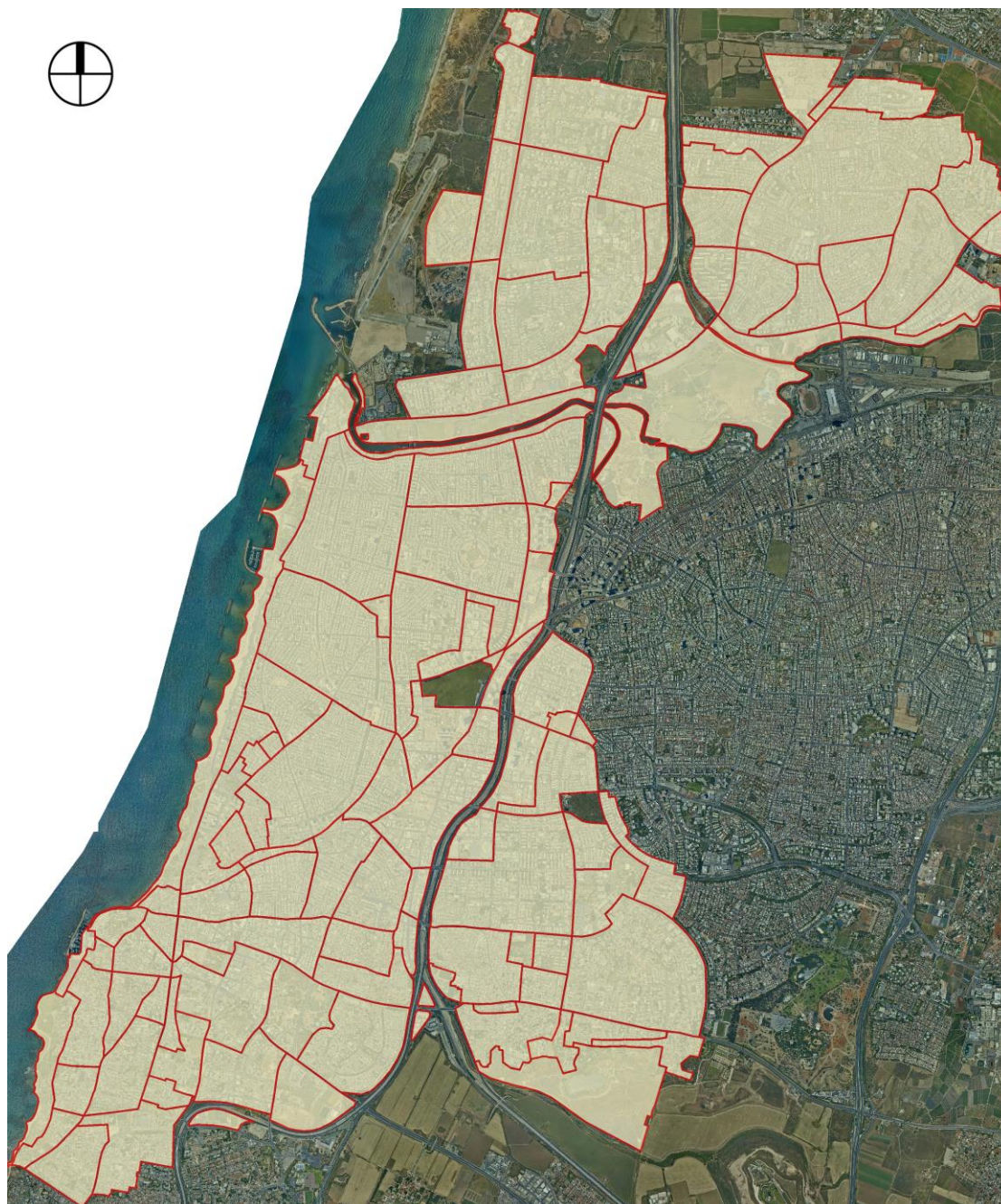
המחקר שערכנו בתל אביב-יפו התקיים בשני שלבים: בשלב הראשון, נערך מיפוי מקומי למקטע בשטח 4 קמ"ר במרכז תל אביב. במקטע זה חושבו ערכי UTCI, SVF ועוצמת חשיפת משטחים אופקיים לקרינת שמש. בשלב השני בוצע חישוב נרחב בהרבה של עוצמת החשיפה לקרינת שמש בכל שטח העיר (51 קמ"ר). חישוב זה נעשה באמצעות הפונקציה Area Solar Radiation בתוכנת ה-ArcMap GIS (ESRI, 2017). שלא כמו החישובים ב-UMEP, המבוססים על קובץ נתוני מזג אוויר סטנדרטיים, חישוב עוצמת החשיפה לשמש בתוכנת ArcMap נעשה על בסיס חישוב תיאורטי (Rich et al., 1994; Fu & Rich, 2002) של רמות הקרינה הסולארית המגיעות לכדור הארץ, תוך חישוב ההנחתה בעוצמות הקרינה בשל זווית הפגיעה של השמש. כמו כן, הפונקציה Area Solar Radiation אינה יודעת לחשב את חדירת קרני השמש החלקית מתחת לחופת צמרות העצים (אזור הגזע), ומשום כך הנחנו שבאזורי ההיטל האופקי של הצמרות לא פוגעת קרינת שמש, הגם שהנחה זו אינה מבטאת את המתרחש במציאות ומניבה ערכי חשיפה נמוכים במידה מסוימת יחסית לערכים שהיו מתקבלים בחישוב שהיה לוקח בחשבון את מעבר האור דרך אזורי הגזע של העצים. הבחירה שלא לחשב ערכי SVF ו-UTCI לכל שטח העיר נבעה מאיכות המיפוי שנמסר לנו (על כך ראו להלן, פרק התוצאות). אך גם בשל זמן החישוב הגדול פי כמה שאינו מאפשר בשלב זה לבצע חישובים מורכבים של ערכי UTCI בקנה מידה כלל עירוני בזמן מחשב סביר. עם זאת, כפי שנראה בהמשך, בהקשר התל אביבי קיימת התאמה חזקה בין עוצמת החשיפה של משטחים אופקיים לקרינת שמש בעונה החמה לתעוקה תרמית הנובעת מחום על פי מדד UTCI. משום כך, ניתן להסתפק, בהקשר התל אביבי, בחישוב עוצמת פגיעת קרינת שמש בפני הקרקע כדי להגיע למסקנות בעלות תוקף הנוגעות גם לנוחות התרמית במרחב, ובכך לחסוך חישוב מורכב וארוך בהרבה של ערכי UTCI.

חישוב ערכים ממוצעים ופיתוח מדדים נוספים

על בסיס התוצאות הגולמיות שהפיקו שני הכלים החישוביים שבהם השתמשנו, חישבנו ערכים ממוצעים עבור מקטעי רחובות (מקטע רחוב הוא אותו חלק מהרחוב המהבר בין שני צמתים והתחום בין הבניינים הפרושים לאורכו) ומרחבים פתוחים כגון כיכרות וגינות (בשלב א') ועבור מקטעי רחובות ושכונות (בשלב ב'). גבולות השכונות (125 במספר) ששימשו לחישובים בשלב ב' התבססו על הערכה סובייקטיבית של דמיון מורפולוגי בתוך יחידת שטח נתונה, וגם על הגדרות השכונות מבחינה מוניציפלית ומידע על שלבי התפתחות היסטוריים של חלקים שונים בעיר (איור 1). חשוב עם זאת לציין כי גבולות השכונות אינם חופפים במלואם את גבולות הרובעים ותתי-הרובעים של העיר, וכן לא את האזורים הסטטיסטיים העירוניים לפי הגדרת הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. הסיבה לכך היא שחישוב ממוצעים מרחביים על בסיס הגבולות הסטטוטוריים, שאינם לוקחים בחשבון הבדלים מורפולוגיים ניכרים ובייחוד שטחים פתוחים רחבים שאינם מובלעים ברקמה הבנויה (לדוגמה, הכללת רצועת החוף הריקה מבנייה בחישוב ערכים שכונתיים של שכונות הגובלות בחוף הים), היתה מטה את התוצאות ומייצרת רושם מוטעה באשר לתנאים המיקרו-אקלימיים באזור המבונה של השכונה. שטחן של כיכרות וגינות עירוניות השלובות במארג המבנים העירוני לא הוגדר במנותק מהשכונות שבתוכן הן נמצאות אלא כחלק אינטגרלי מהן.

הממוצעים המרחביים שחושבו כללו גם חישוב של שלושה מדדים נוספים, המבוססים בחלקם על התוצאות הגולמיות שהפיקו הכלים החישוביים ובחלקם על המיפוי הפיזי שעליו הם התבססו. הממד הראשון הוא מדד הצללה (Shade Index, SI), המתאר בטווח שבין 0 ל-1 את מידת ההצללה של יחידת שטח בזמן נתון (במקרה שלנו, לאורך יממה אחת), כאשר ערך הצללה גבוה יותר מעיד על שיעור הצללה גבוה יותר. ערך ההצללה מתאר את היחס שבין עוצמת הקרינה הממוצעת למ"ר שנבלמת ואינה מגיעה לקרקע בשטח נתון (מקטע רחוב או שכונה ללא חישוב שטח תכסית המבנים) לבין עוצמת פגיעת הקרינה המקסימלית למ"ר באותה יחידת שטח. את עוצמת הקרינה הנבלמת ניתן לחשב בקלות על ידי החסרת עוצמת הקרינה הפוגעת בקרקע (אותה חישבנו באמצעות האלגוריתמים שהוזכרו לעיל) מעוצמת פגיעת הקרינה המקסימלית. מדד ההצללה תלוי במועד שעבורו נעשה החישוב. בשל

ההבדל בזוויות הפגיעה של קרינת השמש ובמשך הפגיעה, מועדי חישוב אחרים עשויים היו להניב תוצאות שונות.



איור 1: חלוקת העיר תל אביב-יפו לשכונות וליחידות שטח בעלי דמיון מורפולוגי

מדד נוסף שחושב הוא מדד כיסוי צמרות (TCC, Tree Canopy Cover) ביחידת שטח נתונה. מדד זה מחושב כיחס שבין שטח ההיטל האופקי של צמרות עצים ביחידת שטח נתונה לבין השטח הכולל של אותה יחידה (גם הוא מתבטא בטווח ערכים שבין 0 ל-1, כאשר ערך גבוה יותר מעיד על כיסוי צמרות גבוה יותר). חשיבות השימוש במדד זה טמונה בשונות שהוא חושף בין רחובות ובין שכונות בעיר בכל הנוגע לדמותו של

היער העירוני בהן, שונות שאינה יכולה לבוא לידי ביטוי בחישוב ערך בודד של כיסוי צמרות כלל עירוני, כפי שנהוג היום בערים רבות בעולם. על סמך מדד ההצללה ומדד כיסוי הצמרות חישבנו מדד נוסף, מדד יעילות הצללה מעצים, על ידי העלאה בחזקה של מדד ההצללה במדד כיסוי הצמרות (SI^{TCC}). כמו שני המדדים האחרים, גם טווח הערכים של מדד זה נע בין 0 ל-1. ערך גבוה יותר מעיד על יעילות רבה יותר בשימוש בעצים להצללה, כלומר על תלות נמוכה יותר בהצללה מעצים ותלות גבוהה יותר בהצללה ממבנים לצורך הגעה לערכים גבוהים של הצללה.

תיעדוף פעולה עירונית על בסיס מדד ההצללה

חישוב מדד ההצללה מעלה שאלה הנוגעת לאופן שבו יש לפרש את תוצאות החישוב. משום שמדובר במדד שפותח לטובת מחקר זה, קשה לקבוע כי ערכים מסוימים של מדד ההצללה מבטיחים נוחות תרמית או, להבדיל, מעידים על רמות גבוהות של תעוקה תרמית. כמו כן, בהיעדר בסיס להשוואה לאזורים עירוניים אחרים בארץ, קשה גם להעריך עד כמה ערכי מדד ההצללה בתל אביב־יפו חריגים לטובה או לרעה. משום כך, הפרשנות הנכונה שיש לתת בשלב זה למדד ההצללה היא פרשנות יחסית: בהשוואה בין ערכי ההצללה של רחובות שונים או של אזורים עירוניים שונים, ניתן להבין מה הוא טווח הערכים בכל העיר, ואיזה רחובות או שכונות מתאפיינים בשיעורי הצללה גבוהים או נמוכים במיוחד יחסית להתפלגות הכללית של ערכי ההצללה בכל העיר.

על אף שמחקר זה אינו מספק כדי לתת פרשנות מיקרו־אקלימית חד־ערכית לרמה כזו או אחרת של מדד הצללה, החשיבות שבהבנת טווח ערכי ההצללה במקטעי רחובות או בשכונות בעיר טמונה ביכולתה של העירייה לתעדף פעולות עירוניות בנושאי הצל על בסיס השוואתי בין מקטעי הרחובות או בין השכונות בעיר. כך, לדוגמה, יכולה העירייה לסמן רחובות שבהם רמות ההצללה נמוכות מסף מסוים כרחובות המיועדים ל"עיבוי צל" (Shade Intensification), ואילו רחובות שבהם רמות ההצללה גבוהות מסף מסוים כרחובות המיועדים ל"שימור צל" (Shade Conservation), בעיקר באמצעות תחזוקה מקיימת של העצים ברחובות אלה). כך לדוגמה, במחקר זה, על סמך התפלגות ערכי ההצללה בכל הרחובות בעיר, קבענו כי

רחובות שבהם שיעור ההצללה נמוך מ־0.2 הם רחובות המתאימים לעיבוי צל, ורחובות שבהם שיעור ההצללה גבוה מ־0.6 הם רחובות המתאימים לשימור צל (קבענו את ערכי הסף האלה משום שהם מייצגים את 10% העליונים ואת 20% התחתונים של שיעורי ההצללה בכל מקטעי הרחובות בתל אביב-יפו; ראו להלן בפרק התוצאות).

קביעת ספים מספריים לעיבוי צל ולשימור צל עלולה שלא להספיק לצורך תיעדוף הפעולה העירונית, משום שהם עשויים לכלול כמות רבה מדי של מקטעי רחובות להתערבות (כפי שאכן התגלה בתל אביב-יפו; ראו להלן). ניתן לפתור בעיה זו על ידי שינוי שרירותי של הספים, כך שקבוצת מקטעי הרחובות החורגים מהם תהיה קטנה במיוחד, אולם במצב כזה עלולה החלוקה להתגלות כשרירותית ומקרית מדי, משום שהבדלים קלים בלבד בערכים, היכולים לנבוע בין השאר גם מרזולוציית הדגימה של התוצאות הגולמיות, הם בעלי השפעה גדולה בהרבה על האופן שבו מקטע רחוב מסוים יזכה להתייחסות "מעבה" או "משמרת". משום כך, הגענו למסקנה כי כדי להקטין באופן משמעותי את מספר הרחובות שיוגדרו להתערבות יש להצליב את ערכי ההצללה עם ערכים אחרים, הנוגעים באופן ישיר לשימוש הולכי רגל במרחב. לצורך זה פיתחנו מדד פוטנציאל הליכתיות שחושב עבור כל אחד ממקטעי הרחובות בעיר על בסיס חישוב ערכי מרכזיות (Centrality) בהתאם למתודולוגיית תחביר המרחב (Space Syntax).

מדדים מתמטיים מסוימים שחושבו בשיטת תחביר המרחב הוכחו באינספור מחקרים כבעלי התאמה גבוהה לתנועת הולכי רגל ולחיוניות של מרכזים עירוניים (Hillier, 1996; Karimi, 2012; Lerman et al., 2014). אחד המדדים המרכזיים של תיאוריית תחביר המרחב הוא מדד האינטגרציה (Integration), המתאר את המרכזיות של מקטע רחוב מסוים יחסית לרשת הרחובות העירונית שהוא חלק ממנה. ערך האינטגרציה יכול להימדד ביחס לכל הרשת או ביחס לחלקים מסוימים ממנה (המוגדרים באמצעות רדיוס מטרי של הבדיקה), באופן שמבטא הבדלים בין אינטגרציה אזורית למקומית.

מחקרים על דפוסי הליכה מצאו התאמה גבוהה יחסית בין מדידות תנועה בפועל לבין מדד האינטגרציה ברדיוסים שנעים בין 1,000 ל-2,000 מטר בערים ישראליות (Lerman et al., 2014; Lerman & Lebendiger, 2017). מחקרים אחרים

מצאו שמדד אינטגרציה ברדיוס אזורי של 7,500 מטר יכול לספק אינדיקציה נכונה באשר למרכזים מטרופוליניים ולהיווצרות מרכזי עסקים אזוריים (Serra & Pinho, 2013). במחקר זה הניתוח המרחבי שבוצע בא לחשב מרכזיות (באמצעות מדד האינטגרציה) בקני מידה מקומיים ואזוריים כדי להעריך את ההסתברות שתנועת הולכי רגל תעבור דרך מקטע רחוב מסוים וכדי לאתר מרכזי עסקים שבהם קיימת סבירות גבוהה לקיומה של תנועת הליכה משמעותית של עובדי משרדים במהלך שעות היום. פוטנציאל ההליכה המקומית הוערך על בסיס מדדי אינטגרציה בשמונה רדיוסים שונים: 250, 500, 750, 1,000, 1,250, 1,500, 1,750 ו-2,000 מטר. פוטנציאל המשיכה האזורי הוערך על בסיס מדדי אינטגרציה בשישה רדיוסים שונים: 2,500, 3,000, 4,000, 5,000, 6,000 ו-7,500 מטר. חישובי מדדי האינטגרציה נערכו באמצעות התוכנה depthmapX (Varoudis, 2014).

חישוב מדדי האינטגרציה ברדיוסים השונים היה הבסיס לחישוב "ציון חשיבות" (Prominence Score) של כל אחד ממקטעי הרחובות. ערך זה, שחושב בנפרד עבור הניתוח המקומי והאזורי, שיקף את המרכזיות היחסית של כל מקטע בתוך כל רשת הרחובות העירונית. מקטע שערך האינטגרציה שלו ברדיוס מסוים נמצא בחמישון (Quintile) העליון של ערכי האינטגרציה של כלל המקטעים, מקבל נקודת "חשיבות" אחת לכל רדיוס. עבור תנועה מקומית, "ציון החשיבות" המקסימלי היה משום כך 8 (המשקף את ערכי האינטגרציה ב־8 רדיוסים מקומיים), ועבור תנועה אזורית, 6 (המשקף את ערכי האינטגרציה ב־6 רדיוסים אזוריים). ככל ש"ציון החשיבות" גבוה יותר, כך גם גבוהה יותר מרכזיותו של המקטע ברמה המקומית והאזורית. על בסיס שיטת חישוב זו, ניתן היה להפיק שתי מפות של תנועת הולכי רגל פוטנציאלית (מפה מקומית ומפה אזורית), שבהן הופיעו רק מקטעי הרחובות שציון החשיבות שלהם היה 3 ומעלה.

בעת, על מנת לתעדף עיבוי צל או שימור צל עבור העירייה, הצלבנו את שתי מפות הניתוח המרחבי עם מפת הניתוח האקלימי שהכילה מקטעי רחובות שמדד ההצללה שלהם נמוך מ־0.2 (רחובות שבהם נדרש עיבוי צל) ומקטעי רחובות שמדד ההצללה שלהם גבוה מ־0.6 (רחובות שבהם נדרש שימור צל). המפה המוצלבת הציגה רק מקטעי רחובות שהופיעו בכל שלוש המפות. באופן זה נופו מהמפה האקלימית מקטעי רחובות שאינם מרכזיים לתנועת הולכי רגל, באופן המפחית

משמעותית את מקטעי הרחובות שסומנו לטיפול ובאותה מידה גם מסייע לעירייה לכוון את מאמציה לאותם רחובות שבהם ישפיעו הפעולות על המספר הגדול ביותר של משתמשים במרחב שהחשיפה לשמש משמעותית לתחושת הנוחות התרמית שלהם (כלומר, הולכי רגל).

תוצאות

שלב א': כימות נוחות תרמית והצללה במרכז תל אביב

השלב הראשון של המחקר התמקד באזור במרכז תל אביב ששטחו 4 קמ"ר (איור 2) הכולל, בין השאר, חלקים מכיכר המדינה, כיכר התרבות (הבימה), כיכר דיזנגוף (לפני הנמכתה), גן מאיר וכיכר גבעון, וכן חלקים משמעותיים מהרחובות ארלוזורוב, פרישמן, דיזנגוף, אבן גבירול והמלך ג'ורג', וכן מקטעים משדרות רוטשילד, ח"ן, שאול המלך וכן ציון. אזור זה נבחר משום שהוא מכיל בשטח קטן יחסית מורפולוגיות עירוניות מגוונות ומרחבים עירוניים מסוגים שונים (רחובות מגורים, רחובות מסחריים, שדרות, כיכרות, עורקי תחבורה ראשיים), כמו גם חלקים משמעותיים מ"העיר הלבנה".



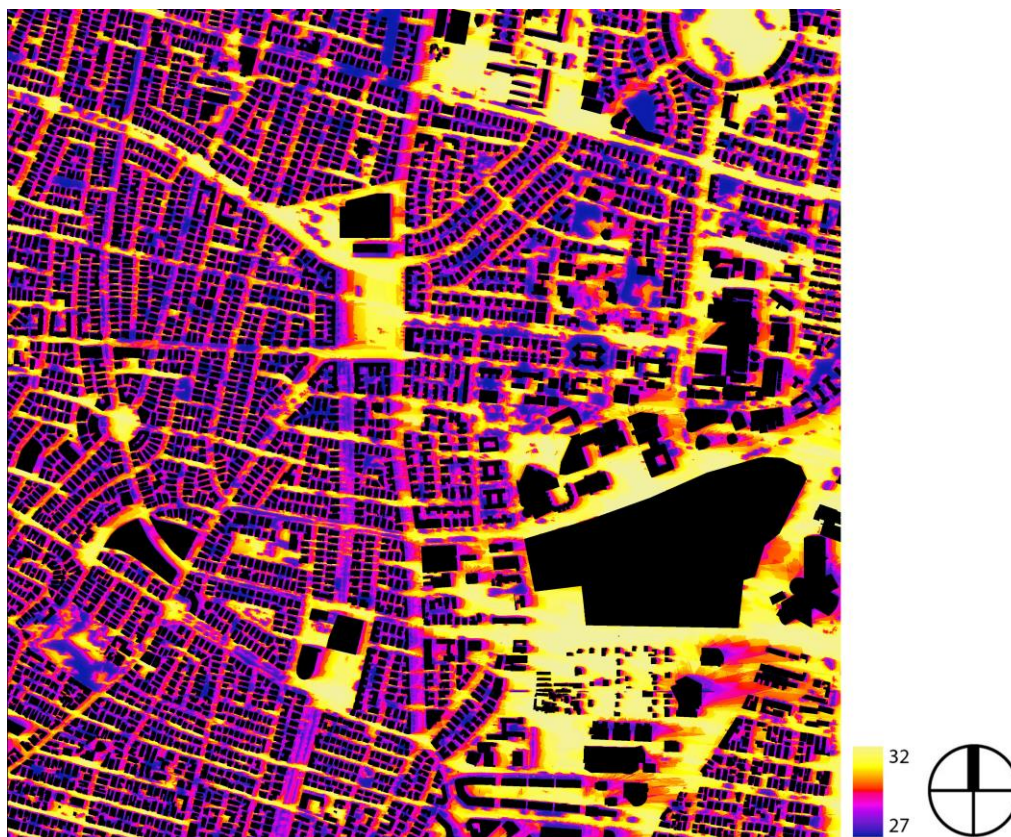
איור 2: סימון השטח שנבחר לניתוח בשלב א' על גבי אורתופוטו של תל אביב מיוני 2017

עבור אזור זה, קיבלנו מעיריית תל אביב-יפו את נתוני המיפוי הבאים:

1. מודל גבהים ראסטרי של פני השטח (DSM) מיוני 2018 ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל.
 2. מודל גבהים ראסטרי של פני הקרקע (DTM) ברזולוציה של 10 מטר לפיקסל.
 3. קובץ shapefile ובו פוליגונים של צמרות העצים המבוסס על מיפוי צמרות ידני על סמך תצלומי אורתופוטו.
 4. תצלום אורתופוטו שלושה ערוצים (RGB) של תל אביב-יפו מיוני 2017 ברזולוציה של 0.25 מטר לפיקסל.
- נתונים אלה שימשו אותנו בחישוב מדדי SVF, UTCI ועוצמת פגיעת הקרינה בפני הקרקע עבור יום מייצג בשיא הקיץ (6 באוגוסט). חישוב עוצמת פגיעת קרינת השמש וחישוב ערכי ה-MRT (ועל בסיס זה, גם ערכי ה-UTCI) נעשו במרווחים של שעה על פני היממה שנבחרה (6 באוגוסט). שיטת חישוב זו הניבה את המפות הבאות:
1. מפת נוחות תרמית ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל עבור אזור הניתוח. המפה מציגה ערכי UTCI עבור כל שעה בתאריך הנבחר.
 2. מפת נוחות תרמית ממוצעת עבור שעות היום באותה רזולוציה ולאזור אזור. המפה מציגה ערכי UTCI ממוצעים בין השעות 09:00 ל-17:00 (איור 3).
 3. מפת עוצמת פגיעת קרינת שמש יומית מצטברת ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל לאזור אזור (איור 4).
 4. מפת SVF לאזור אזור (איור 5).
- על בסיס מפות אלה, הפקנו מפות של ממוצעים מרחביים עבור כל מקטעי הרחובות באזור הניתוח, הן עבור ערכי UTCI (איור 6) והן עבור ערכי החשיפה לקרינת שמש (איור 7). פירושו של דבר הוא שעבור כל מקטע רחוב סיכמנו את ערכי כל הפיקסלים הכלולים בתוכו, וחילקנו במספר הפיקסלים. חישוב ממוצע מרחבי ברזולוציה של מקטעי רחובות מאפשר מצד אחד לפשט את קריאת התוצאות, ומן הצד האחר מספק עדיין תמונה שלמה ומייצגת של הבדלים מיקרו-אקלימיים עדינים בין רחובות וחלקי רחובות. כדי לבדוק את מידת ההתאמה בין ערכי ה-UTCI לערכי החשיפה לקרינת שמש הפקנו תרשים פיזור (Scatter Diagram) שלתוכו הוזנו הערכים הממוצעים עבור מקטעי הרחובות. תרשים זה גילה התאמה גבוהה בין ערכי UTCI ממוצעים במקטעי רחובות לעוצמת החשיפה הממוצעת במקטעי רחובות עבור ה-6 באוגוסט

($R^2=0.9232$, איור 8). באופן דומה הפקנו תרשים פיזור שמשווה ערכי UTCI לערכי SVF. על אף שהתוצאה הראתה על מידה מסוימת של התאמה, היא היתה פחותה באופן משמעותי מההתאמה שהתקבלה בין ערכי ה-UTCI לערכי החשיפה לקרינת שמש ($R^2=0.7538$, איור 9).

כאמור, המיפוי שקיבלנו מהעירייה כלל מודל גבהים ראסטרי של פני השטח ופוליגונים של צמרות העצים. הצלבה בין נתונים אלה איפשרה לחלץ מתוך מודל הגבהים את הנתונים הנוגעים רק לצמרות העצים, ובאופן זה גם לחשב את שטח ההיטל האופקי של צמרות אלה. כך יכולנו להפיק מפה נוספת, המציגה את מדד כיסוי הצמרות בכל מקטע רחוב, המבטא את היחס שבין שטח ההיטל האופקי של צמרות העצים במקטע הרחוב לשטחו הכולל של אותו מקטע (בין קווי החזית של הבניינים, איור 10). כפי שניתן לראות בהשוואה בין מפה זו למפת ערכי ההצללה הממוצעים במקטעי הרחובות (בחלוקה גרפית דומה לחמש דרגות, בקפיצות של 20%, איור 11), מדד כיסוי הצמרות, הגם שהוא מאפשר להציג שונות בין מקטעי רחובות שונים, אינו מצליח להביא לידי ביטוי את מלוא טווח ההבדלים בין שיעורי ההצללה ברחובות, ומבחינה זו מוצלח פחות כמדד אינדיקטיבי ומדויק לנוחות תרמית בעונה החמה.



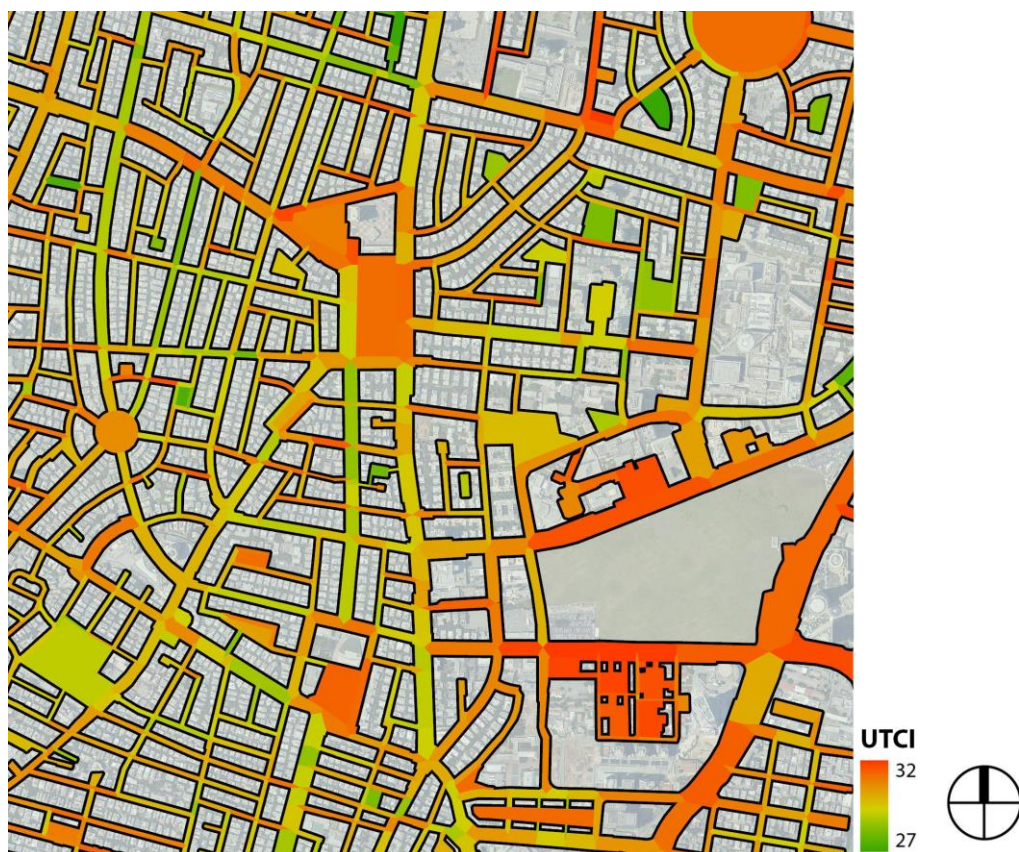
איור 3: ערכי UTCI ממוצעים, 6 באוגוסט, שעות 09:00–17:00



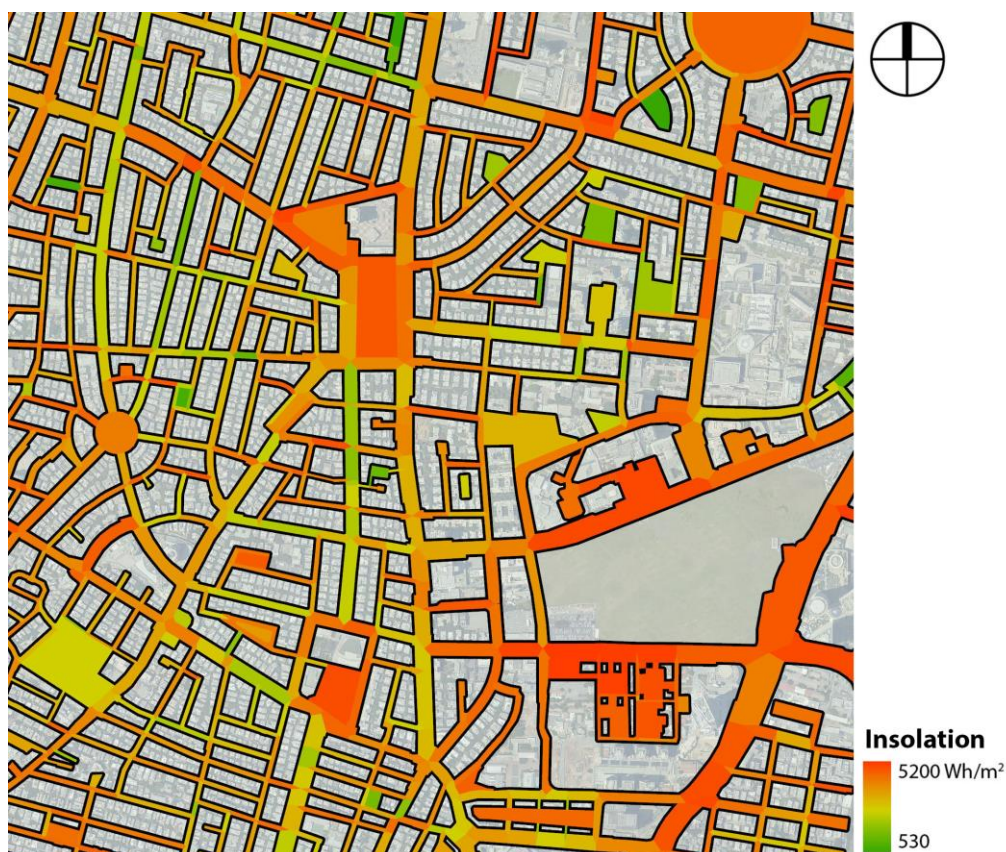
איור 4: חשיפה יומית לקרינת שמש, 6 באוגוסט



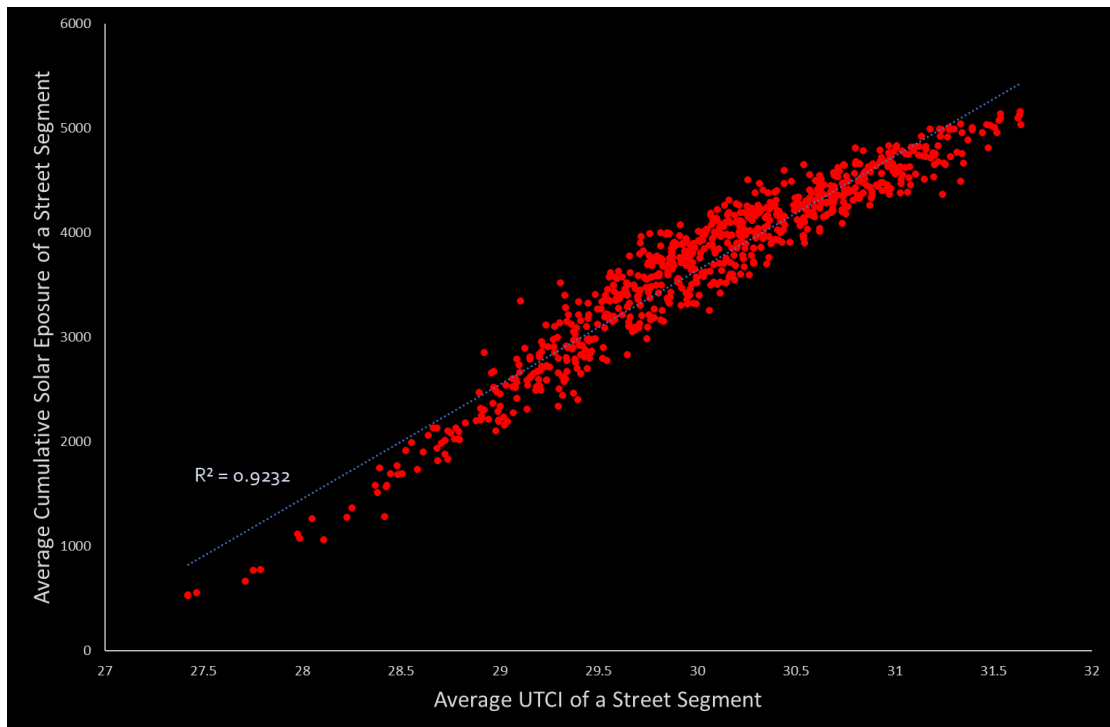
איור 5: ערכי SVF



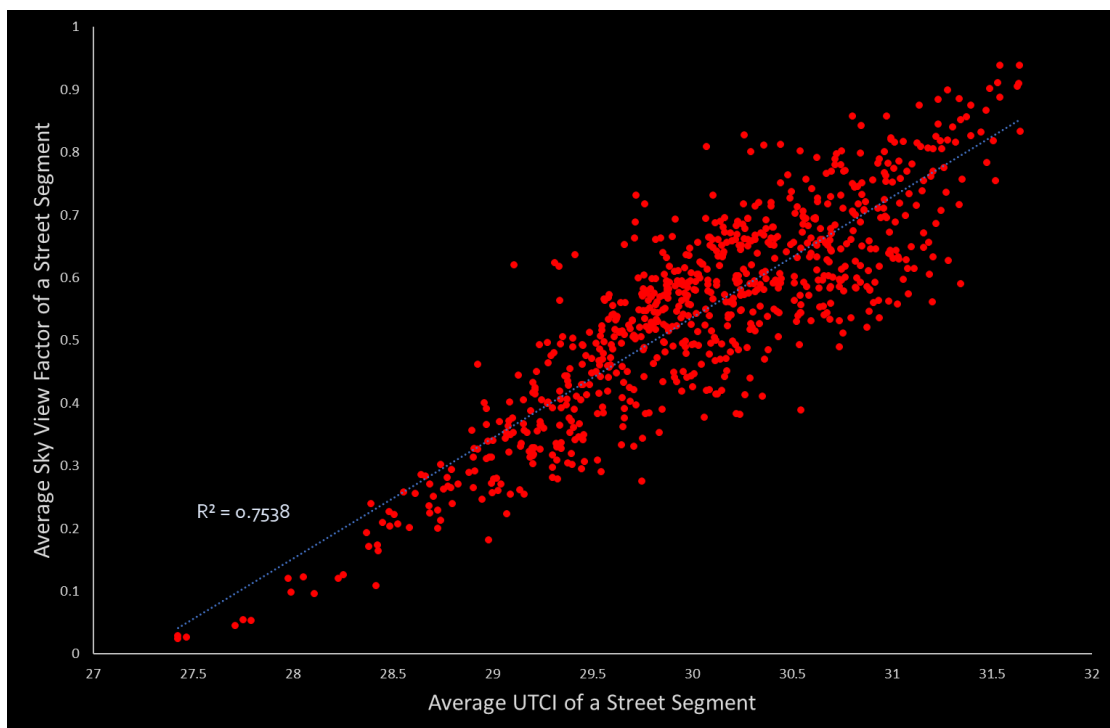
איור 6: ערכי UTCI ממוצעים למקטעי רחובות, 6 באוגוסט, שעות 09:00–17:00



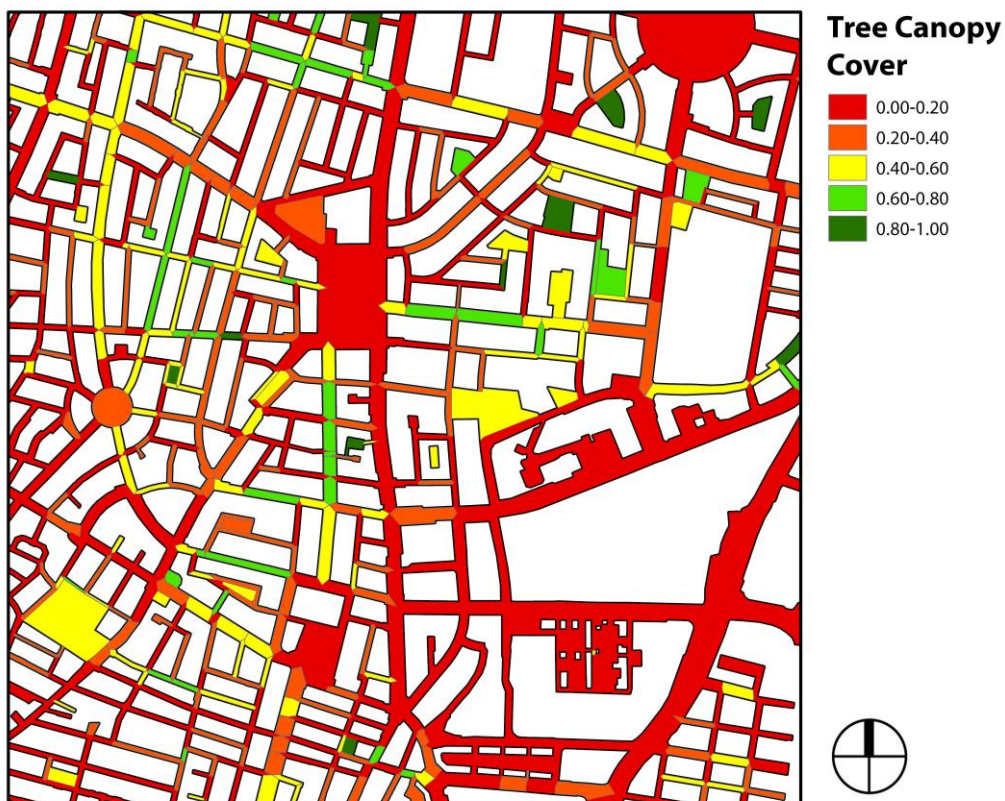
איור 7: ערכים ממוצעים של חשיפה יומית לשמש במקטעי רחובות, 6 באוגוסט



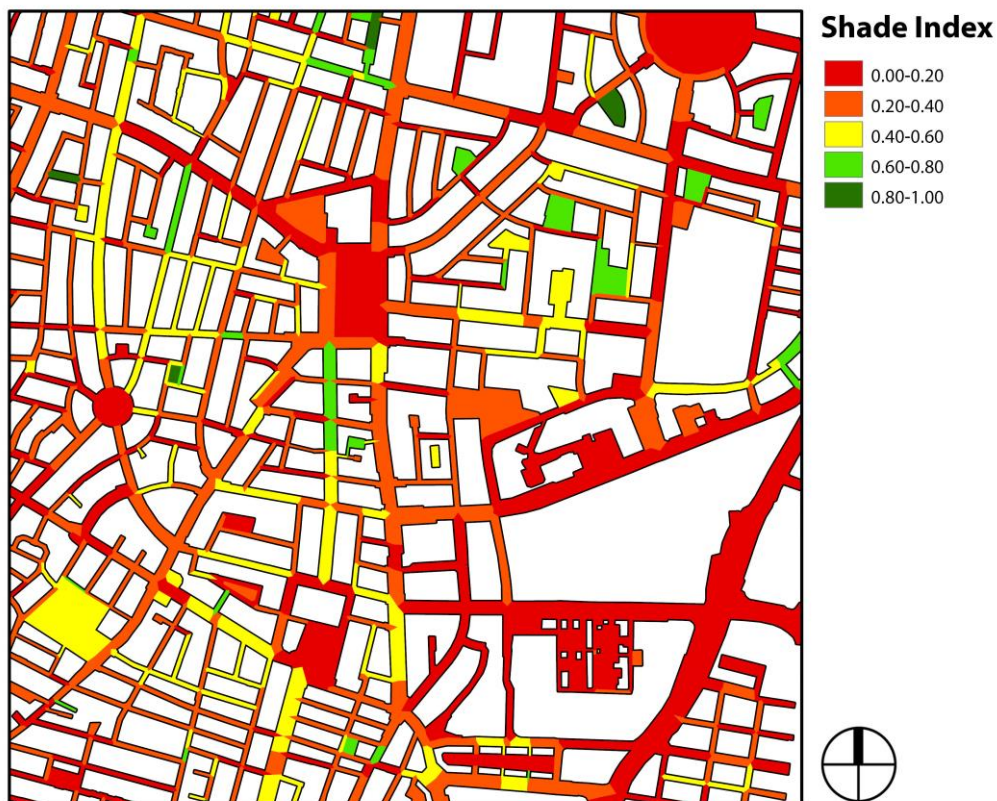
איור 8: תרשים פיזור המציג את מידת ההתאמה בין ערכי החשיפה לקרינת שמש לערכי ה-UTCI הממוצעים במקטעי הרחובות באזור הממופה



איור 9: תרשים פיזור המציג את מידת ההתאמה בין ערכי ה-SVF לערכי ה-UTCI הממוצעים במקטעי הרחובות באזור הממופה



איור 10: ערכי כיסוי צמרות ממוצעים במקטעי רחובות; חלוקה גרפית לחמש דרגות שונות



איור 11: ערכים ממוצעים של חשיפה יומית לשמש במקטעי רחובות, 6 באוגוסט; חלוקה גרפית לחמש דרגות שונות

שלב ב': כימות הצללה בתל אביב-יפו

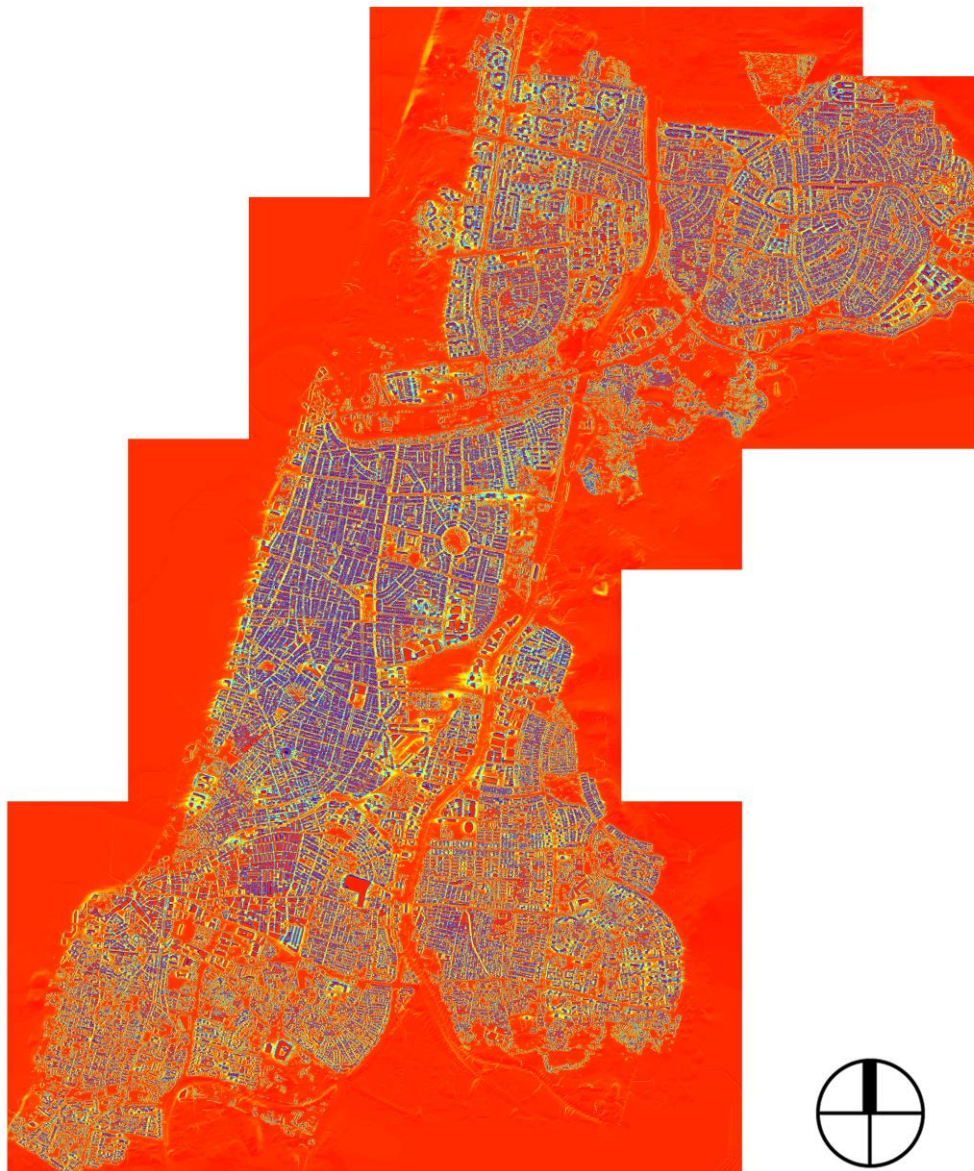
השלב השני של המחקר נגע כבר לעיר תל אביב-יפו במלואה, והוא נועד לבחון בין השאר גם את הערכים המיקרו-אקלימיים היחסיים של אזור "העיר הלבנה" בהשוואה לשאר חלקי העיר. נתוני המיפוי שקיבלנו מעיריית תל אביב-יפו היו דלים יותר ביחס לנתונים ששימשו אותנו בשלב א', בהיעדר מיפוי תלת-ממדי של כל העיר. החישובים בשלב זה נערכו על פי הנתונים הבאים:

1. קובץ shapefile ובו פוליגונים של ההיטל האופקי של כל המבנים בעיר, כולל נתוני גובה גגות המבנים ביחס לפני הקרקע. נתונים אלה, שהתקבלו מהמרכז למיפוי ישראל, היו עדכניים לשנת 2009 בלבד.
2. מודל גבהים ראסטרי של פני הקרקע (DTM) ברזולוציה של 10 מטר לפיקסל.
3. תצלום אורתופוטו שלושה ערוצים (RGB) של תל אביב-יפו מיוני 2017 ברזולוציה של 0.25 מטר לפיקסל.

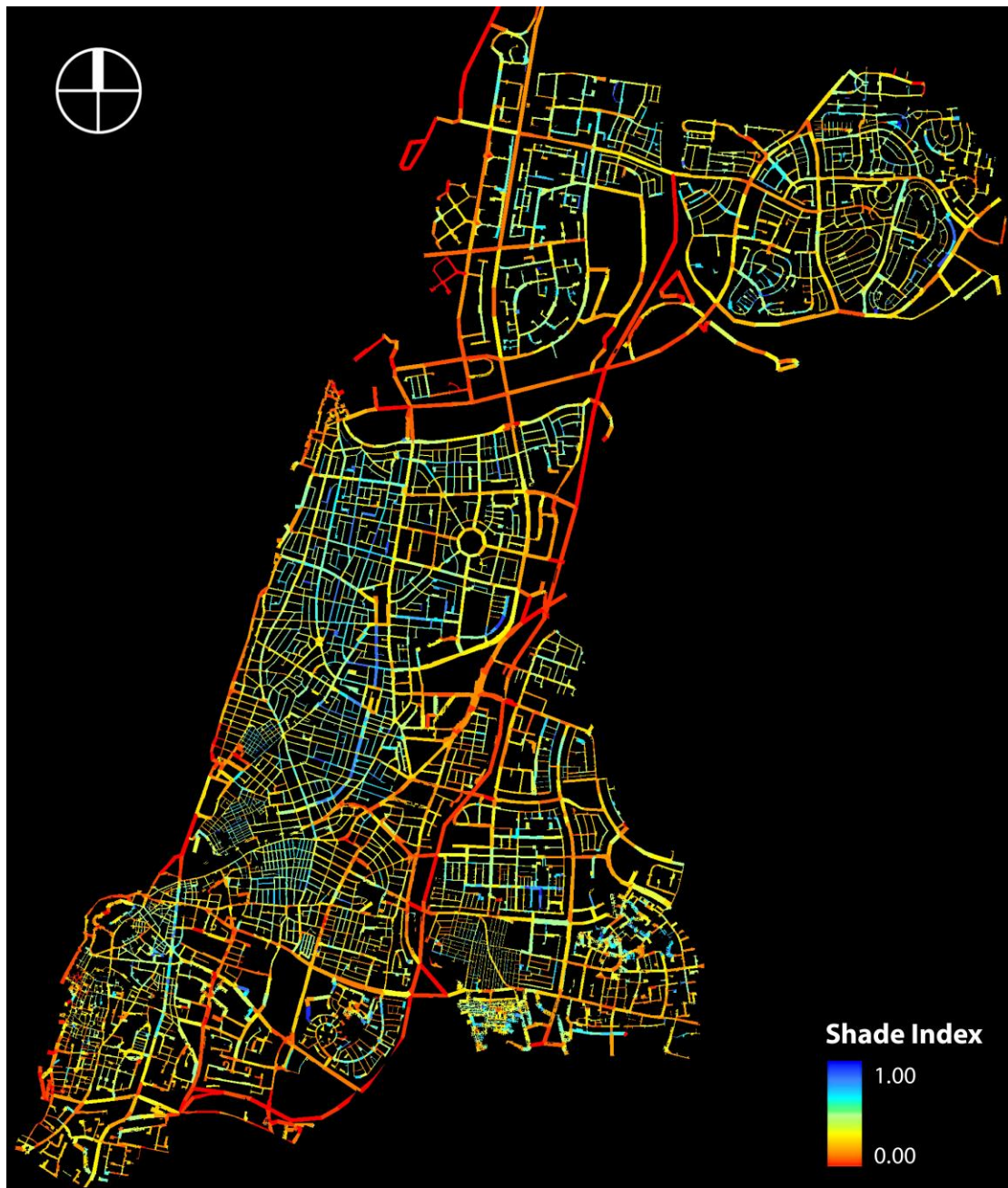
מאחר שהמיפוי שנמסר לנו לא כלל את צמרות העצים, ערכנו מיפוי עצמאי של הצמרות בכל העיר על בסיס האורתופוטו שקיבלנו. מיפוי זה כלל את ההיטל האופקי של הצמרות, שלו נוסף ערך גובה שרירותי של 6 מטרים מעל פני הקרקע, באופן שמשקף את שיטת הגיזום הנפוצה בעיר. נתונים אלה שימשו אותנו לצורך חישוב מפת עוצמת פגיעת קרינת שמש יומית מצטברת ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל ל-6 באוגוסט (איור 12). כאמור, אלגוריתם החישוב שבו נעשה שימוש בשלב ב' היה שונה מזה ששימש בשלב א', והוא אינו מאפשר לחשב את פגיעת קרינת השמש באזורי הגזע של העצים. משום כך חושבו המשטחים האופקיים שמתחת להיטל האופקי של צמרות העצים כאילו לא הגיעה אליהם קרינת שמש. חישוב נוסף שערכנו ושימש אותנו לניתוח ברמה השכונתית היה של עוצמת פגיעת הקרינה בפני הקרקע ב-6 באוגוסט בניכוי השפעת ההצללה מעצים.

על בסיס מפת החשיפה לקרינת שמש, ובדומה לתהליך העבודה בשלב א', הפקנו מפה המציגה את הערכים הממוצעים של מדד ההצללה בכל מקטעי הרחובות בעיר (איור 13). מפה נוספת (איור 14), שהופקה על בסיס מפה זו, מבליטה את מקטעי הרחובות שמדד ההצללה שבהם נמוך מ-0.2 (רחובות המתאימים לעיבוי צל) או גבוה מ-0.6 (רחובות המתאימים לשימור צל). ספים אלה נקבעו לאחר חישוב ערכי ההצללה בכל 7622 מקטעי הרחובות שמופו בעיר. התברר, ש-20 אחוזים משטח

הרחובות בעיר נמצאים ברמות הצללה הנמוכות מ-0.2 לערך (הנתון המדויק הוא 0.21) ואילו 10 אחוזים משטח הרחובות בעיר נמצאים ברמות הצללה העולות על 0.6 לערך (הנתון המדויק הוא 0.61). סברנו שחלוקה כזו נכונה לצורכי תיעדוף, משום שהיא מכוינה את הפעולה העירונית במידה רבה יותר לעיבוי צל ומייחדת את נושא שימור הצל לשכבה צרה יותר של רחובות שבהם שוררים תנאי הצללה ייחודיים במובהק. חשוב להדגיש כי ספים אלה מייצגים ערכים יחסיים הנוגעים להרכב המיוחד של רחובות העיר תל אביב-יפו וייתכן מאוד שחשובים דומים בערים אחרות היו מניבים ספי תיעדוף שונים.



איור 12: מפת עוצמת פגיעת שמש משטחים אופקיים בכל תל אביב-יפו, 6 באוגוסט



איור 13: מפת מדרד ההצללה בכל מקטעי הרחובות בעיר, 6 באוגוסט



איור 14: מפת מדד ההצללה בכל מקטעי הרחובות בעיר, 6 באוגוסט, המציגה רק את הערכים הגבוהים מ-0.6 והנמוכים מ-0.2

כאמור לעיל, התברר כי קביעת ספים מספריים לעיבוי צל ולשימור צל אינה מספיקה לצורך תיעדוף הפעולה העירונית בגלל כמות מקטעי הרחובות שנמצאים מעל או מתחת לספים אלה. במקרה של הניתוח שערכנו בתל אביב-יפו, התברר כי ב-1469 מקטעים (מתוך 7622) שיעור ההצללה נמוך מ-0.2, וב-919 מקטעים שיעור ההצללה גבוה מ-0.6. לצורך זה הפקנו שתי מפות לחישוב הפוטנציאל המרחבי למשיכת הולכי רגל בקנה מידה מקומי (איור 15) ואזורי (איור 16). הצלבת מפות אלה עם מפת מקטעי

הרחובות שערכי ההצללה שלהם גבוהים מ־0.6 ונמוכים מ־0.2 הניבה מפה חדשה, מפת תיעדוף הפעולה העירונית, שמציגה מספר מצומצם בהרבה של רחובות (איור 17).



איור 15: מפת מקטעי הרחובות בעלי מדד אינטגרציה גבוה בחישוב מקומי



איור 16: מפת מקטעי הרחובות בעלי מדר אינטגרציה גבוה בחישוב אזורי



איור 17: מפת תיעדוף פעולה עירונית לעיבוי צל ולשימור צל

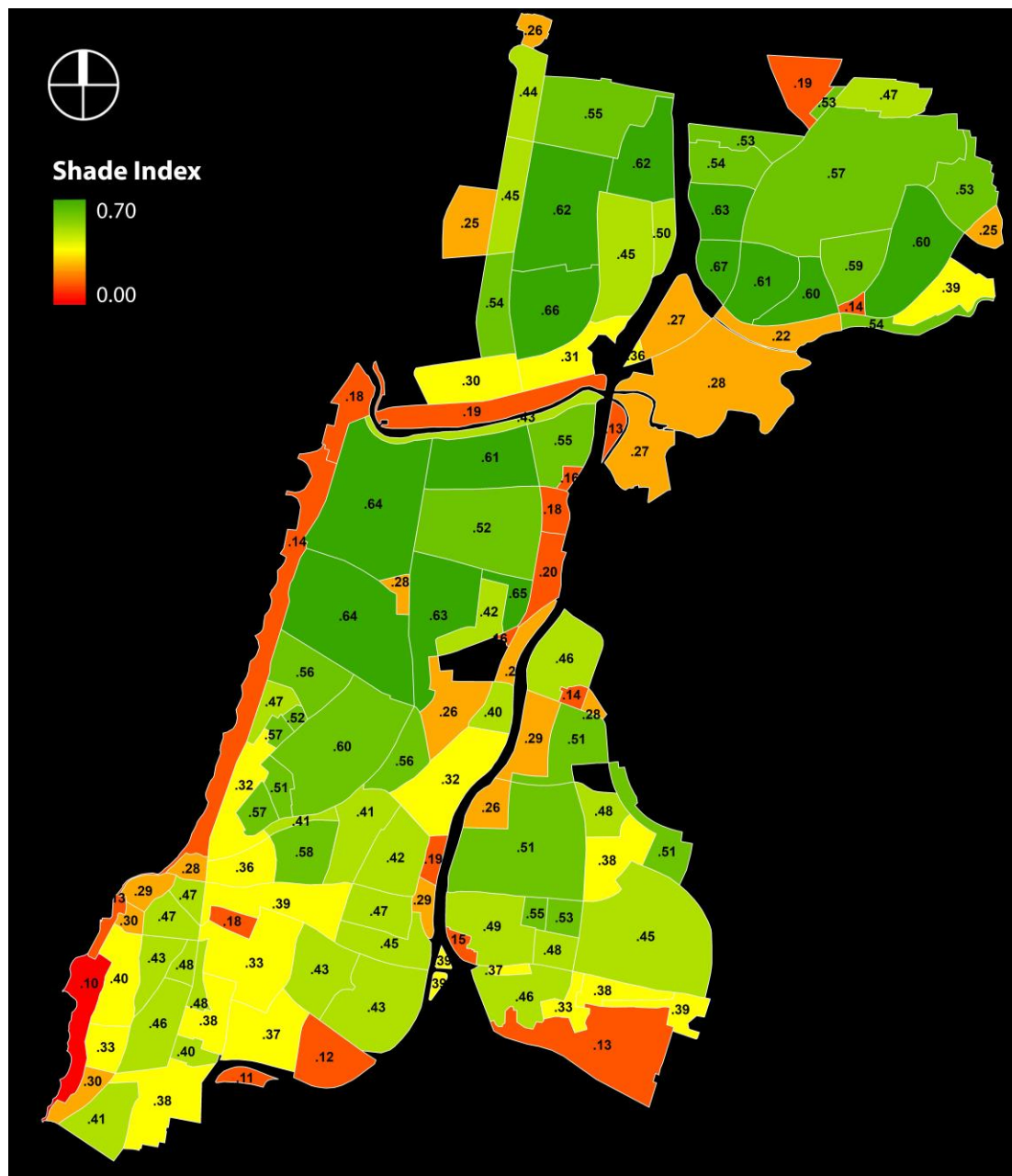
בדומה לחישובים שערכנו בשלב א', גם בשלב זה יכולנו לחשב כיסוי צמרות במקטעי רחובות (על בסיס מיפוי הצמרות שערכנו), הפעם עבור כל רחובות העיר (איור 18). מפה זו הראתה כי בכ־75 אחוז משטח הרחובות בעיר מדד כיסוי הצמרות נמוך מ־0.2, ובכ־20 אחוז נוספים הוא נמוך מ־0.4.



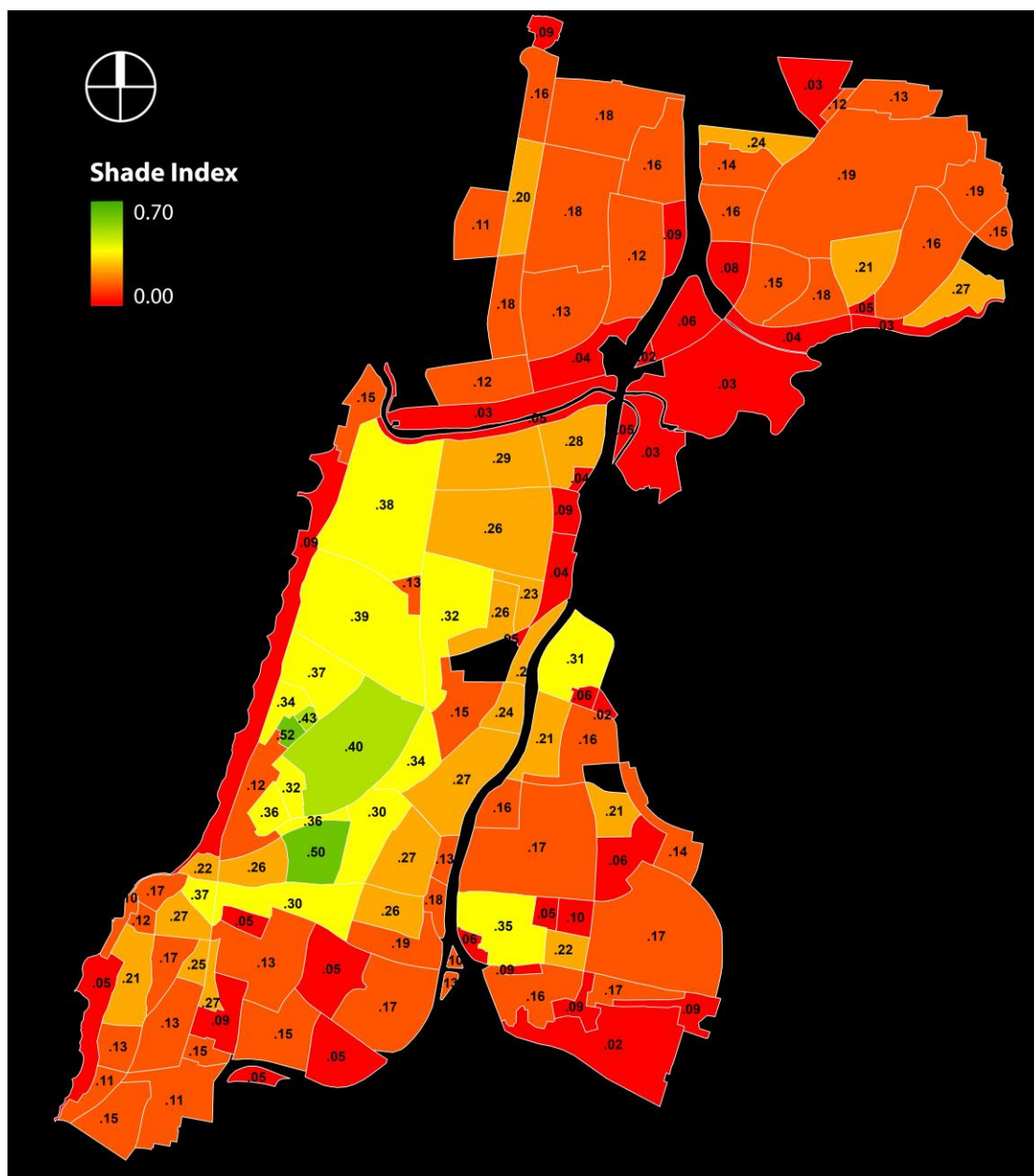
איור 18: מפת ערכי כיסוי צמרות ממוצעים במקטעי רחובות

נוסף על הפקת מפות ערכי הצללה ברחובות, שימשו אותנו חישובי ההצללה להפקת מפות נוספות, המנתחות את שיעורי ההצללה בחדר שכונתי, על בסיס הגדרת 125 אזורי ניתוח בעלי מובהקות מורפולוגית (ראו לעיל, פרק המתודולוגיה). מפת שיעורי ההצללה השכונתיים (איור 19) מגלה הבדלים ניכרים ברמות ההצללה בין שכונות שונות בעיר, הבדלים שנעים בין שיעורי הצללה הגבוהים מ-0.6 ברבות משכונות עבר הירקון ומרכז תל אביב ועד שיעורי הצללה היורדים מ-0.4 בעיקר בשכונות דרום תל אביב ויפו. כדי לבחון את הקשר שבין שיעורי ההצללה להצללה שמקורה בעצים (ולא

במבנים) הפקנו מפת שיעורי הצללה שכונתיים שבה לא נלקחה בחשבון השפעת ההצללה מעצים (איור 20). מפה זו גילתה היררכיה מרחבית שונה לחלוטין, שבה מתקיים דמיון בשיעורי ההצללה ללא עצים בין שכונות הדרום ויפו לשכונות עבר הירקון, בעוד ששיעורי הצללה גבוהים יחסית היו ממשיכים להתקיים במרכז תל אביב גם ללא עצים.

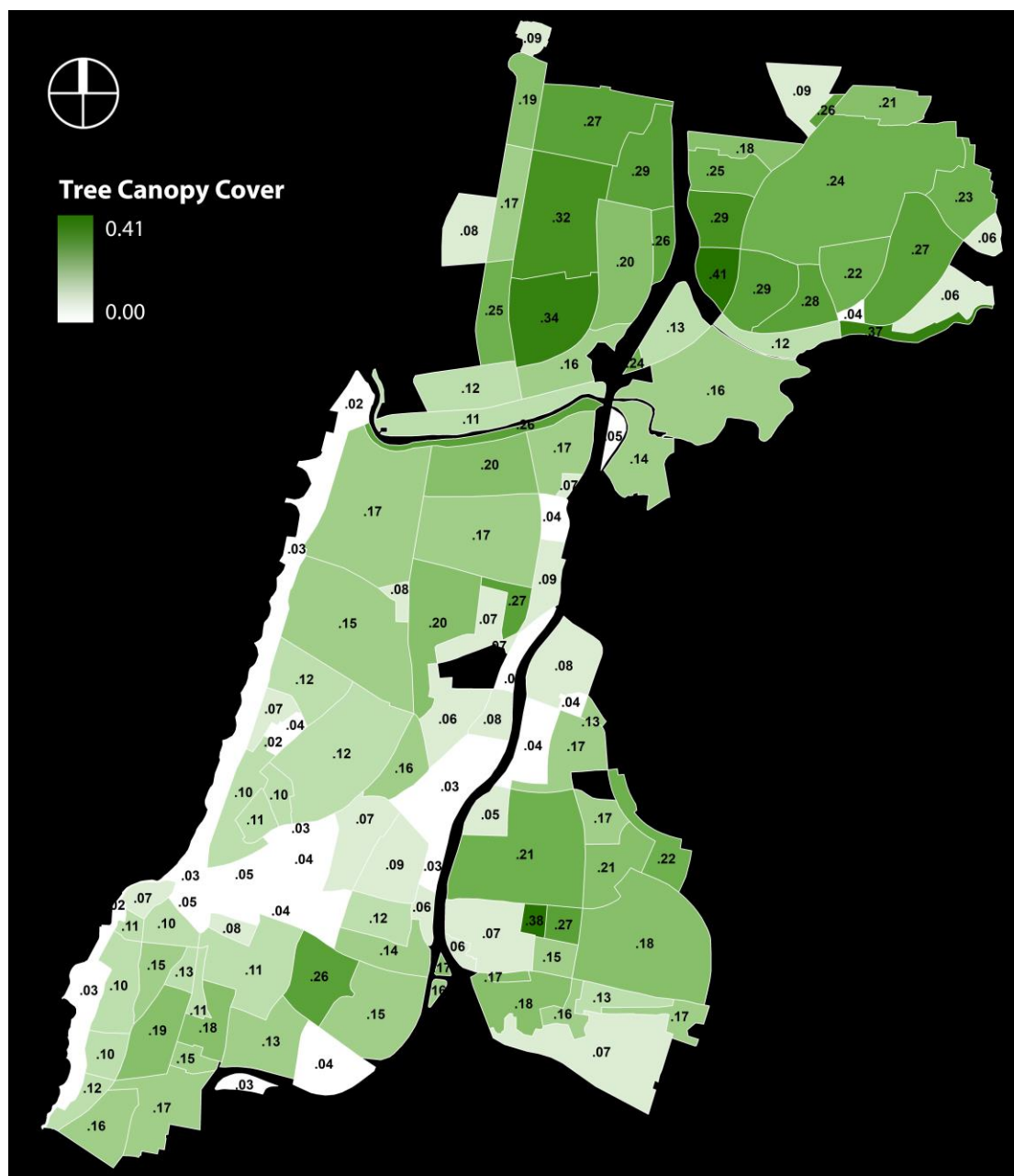


איור 19: מפת שיעורי הצללה שכונתיים, 6 באוגוסט



איור 20: מפת שיעורי הצללה שכונתיים, 6 באוגוסט, בניכוי השפעת ההצללה מעצים

כדי להבין לעומק את השפעת השימוש בעצים על ההצללה ברמת השכונתית, הפקנו גם מפת כיסוי צמרות שכונתית (איור 21). מפה זו גילתה הבדלים ניכרים בין השכונות בעיר, בטווחים שנעים בין כיסוי צמרות של 41 אחוז ועד שכונות שבהן כיסוי הצמרות נמוך מ-5 אחוזים. בנוסף, חישבנו גם את שיעור כיסוי הצמרות בכל העיר, והוא עומד על פי מיפוי הצמרות שערכנו על 16 אחוז. על בסיס נתוני ההצללה וכיסוי הצמרות הפקנו גם מפה המתארת את יעילות ההצללה מעצים בכל אחת מהשכונות (איור 22). המפה מציגה יעילות גבוהה במיוחד במרכז תל אביב.



איור 21: מפת שיעורי כיסוי צמרות בחלק שכונתי

דיון ומסקנות

תוצאות החישובים והניתוח בשלב א' ובשלב ב' מצביעות על הבדלים עמוקים ברמות ההצללה, ומשום כך גם באיכות המיקרו־אקלימית בעונה החמה, בין רחובות שונים ושכונות שונות בעיר. באופן כללי ניתן לקבוע כי "העיר הלבנה" של תל אביב מתאפיינת ברמות הצללה גבוהות יחסית לשאר חלקי העיר, וייחודה הוא ביעילות השימוש בעצים לצורכי הצללה משום שהעצים הנטועים בה משלימים בהצלחה תכנון עירוני צפוף שמספק רמות גבוהות יחסית של הצללה ממבנים. הניתוח מעלה כי קיים קשר חזק בין סביבה עירונית צפופה (ככל שהצפיפות באה לידי ביטוי בחתכי הרחוב האופייניים לאזור "העיר הלבנה" ובשכונות הגובלות בה, באזורים שתוכננו ברובם עוד לפני קום המדינה) לרמות הצללה גבוהות בעונה החמה. עם זאת, מעלה הניתוח כי למעט מקרים יוצאי דופן (לדוגמה, שכונת פלורנטין), שיעורי ההצללה הגבוהים גם בחלקיה הצפופים של העיר תלויים במידה משמעותית ביער העירוני.

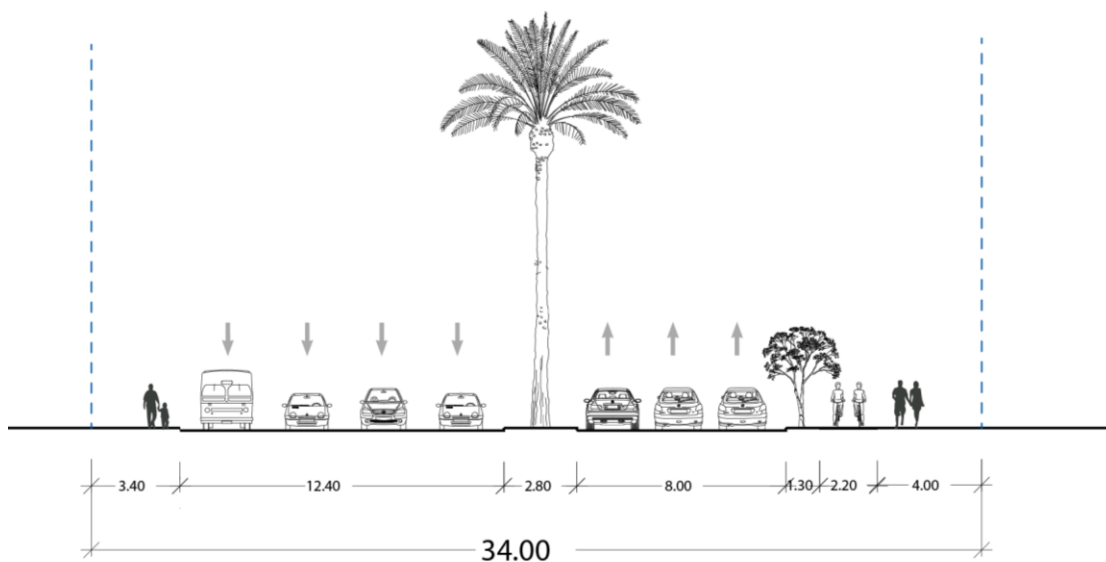
מיפוי רמות ההצללה ברחובות הבליט את יתרונותיהם האקלימיים של רחובות הנפרשים מצפון לדרום (בעיקר בשל הצללת בניינים על שטח הרחוב) על פני רחובות הנפרשים ממזרח למערב. ברחובות אלה, קשה להשיג רמות הצללה מתקבלות על הדעת ללא שכבה משמעותית ורציפה של עצים נותני צל. הדבר ניכר במיוחד ברחובות ראשיים הנפרשים ממערב למזרח: בהיעדר כמות מספקת של עצים (כמו לדוגמה ברחובות פנקס, ז'בוטינסקי בחלקו המזרחי, ארלוזורוב בחלקו המזרחי, שאול המלך, קפלן, סלמה, קיבוץ גלויות ודרך בן צבי), רחובות אלה חשופים לקרינת שמש ישירה ברוב שעות היום, מתקשים לספק הצללה ותנאי האקלים שבהם קשים. באופן לא מפתיע, שדרות העיר, ללא קשר לכיוון פרישתן הגיאוגרפית, מספקות ברובן המכריע (מלבד חלקיהן המזרחיים של שדרות בן גוריון וחלקיהן המערביים של שדרות נורדאו) תנאי הצללה מעולים, וזאת לא מעט בזכות חופת הצמרות הרחבה והרציפה המתקיימת ברוב שטחן.

כדי לבחון את הסיבות האפשריות להבדלים המשמעותיים ברמות ההצללה בין רחובות שונים ערכנו השוואה בין כמה מקטעי רחובות ראשיים שהניתוח העלה כי שוררים בהם תנאים הצללה טובים או גרועים במיוחד. אחד הרחובות הגרועים ביותר בתל אביב מבחינת שיעורי ההצללה השוררים בו הוא רחוב קפלן. ניתן לקבוע

כי שיעורי ההצללה הנמוכים מאוד במרבית מקטעיו (נעים בין 0.03 ל-0.14) נובעים מצירוף בין כיווניותו של הרחוב (מזרח-מערב), רוחבו הניכר (כ־34 מטר) והיעדר כמעט מוחלט של צמחייה נותנת צל, בין אם במדרכות ובין אם ברצועת הירק שבמרכז המיסעה. היעדר כמעט מוחלט של דפנות בנויות מחמיר עוד יותר את מצב ההצללה, אולם ספק אם תוספת בינוי משמעותית היתה משנה באופן מהותי את המצב, בשל כיווניותו של הרחוב. על אף שרחוב זה עבר שיפוץ ותכנון מחודש לפני שנים ספורות בלבד, ניתן לקבוע כי תכנון זה, שכלל שתילת עצי מייש בונגה בצדדיו הדרומי והצפוני ודקלים ברצועת הירק שבמרכזו, לא הצליח לייצר הצללה משמעותית והמשכית, ולו לאורך מדרכה אחת.



איור 23: אורתופוטו עדכני של רחוב קפלן

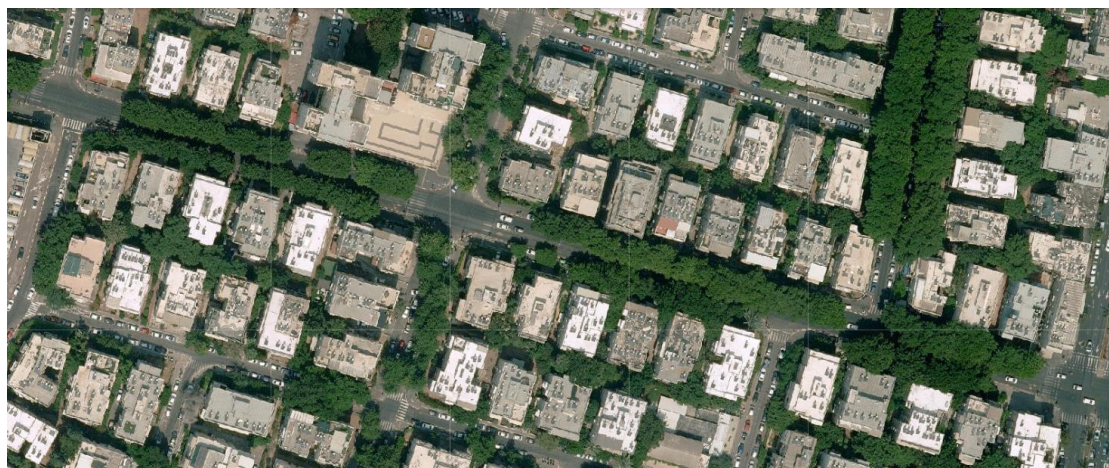


איור 24: חתך עירוני ברחוב קפלן

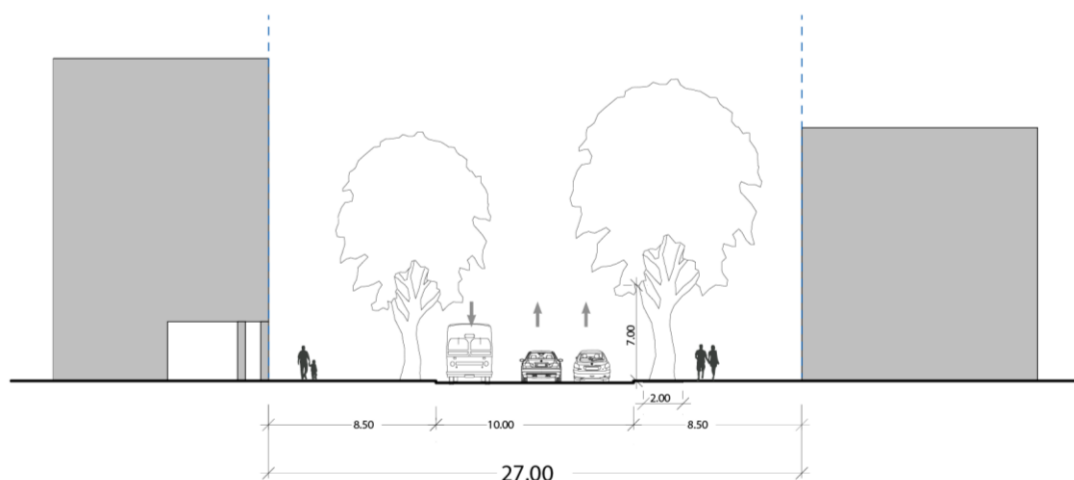


איור 25: רחוב קפלן, מבט ממערב למזרח

בניגוד לרחוב קפלן, רחוב ארלוזורוב, שגם הוא נפרש ממזרח למערב, הוא רחוב שערכי ההצללה שלו גבוהים (בין 0.67 ל-0.72) בקטע שבין הרחובות אבן גבירול ואד"ם הכהן. הסיבה לערכים אלה אינה חתך הרחוב, שהוא כמעט חסר השפעה על ההצללה בשל כיוונו של הרחוב, אלא מערך צפוף של עצי פיקוס השדרות, נטועים במרווחים של 10 מטרים, שמספקים חופת צמרות המשכית כמעט לחלוטין משני צדדיו (מלבד בצמתים).



איור 26: אורתופוטו עדכני של רחוב ארלוזורוב במקטע שבין הרחובות אבן גבירול ואד"ם הכהן



איור 27: חתך עירוני ברחוב ארלוזורוב (אבן גבירול-אד"ם הכהן)



איור 28: רחוב ארלוזורוב, מבט מערבה סמוך להצטלבות עם רחוב שלמה המלך

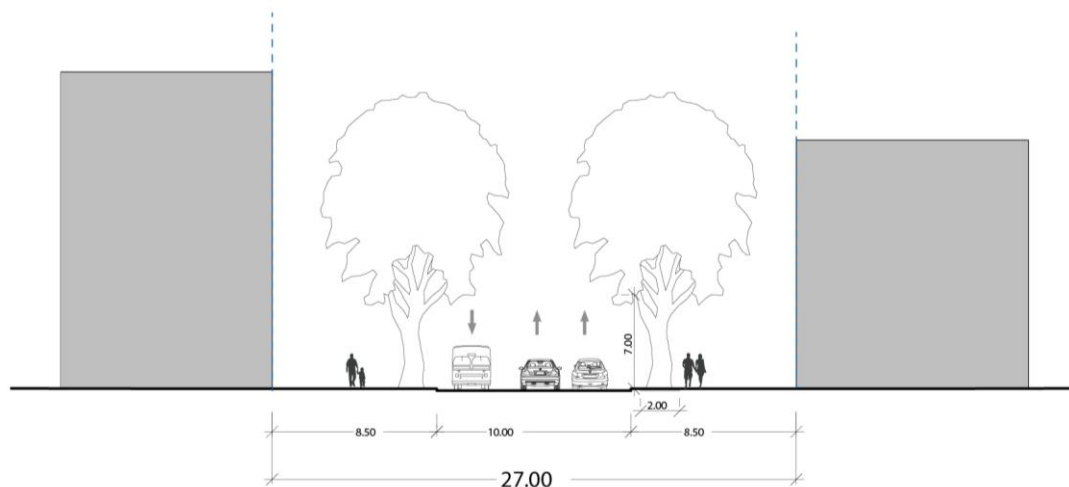
מעניין להשוות את המצב ברחוב ארלוזורוב לזה שברחוב דיזנגוף, בקטע שבין שדרות בן גוריון לרחוב פרישמן. כמו רחוב ארלוזורוב במקטע שבין אבן גבירול ואד"ם כהן, גם רחובו של רחוב דיזנגוף הוא כ־27 מטר, וגם בו שתולים בשתי המדרכות עצי פיקוס השדרות במרווחים של 10 מטרים. ההבדל העיקרי בין שני הרחובות הוא כיוונם: רחוב דיזנגוף במקטע זה מוביל מצפון לדרום. למרות זאת, שיעור ההצללה במקטע זה הוא בין 0.54 ל־0.7, בדומה לערכים שחושבו ברחוב ארלוזורוב. הסיבה העיקרית לכך היא

שבשל חופות העצים הרחבות והרציפות בשני הרחובות, כמעט ואין משמעות להצללה המתקבלת מהמבנים הסמוכים.

הדגמה נוספת לחשיבותו של כיסוי צמרות רחב ורציף אפשר למצוא בערכי ההצללה לאורכו של רחוב פרישמן. למרות כיווניותו (מזרח-מערב), ערכי ההצללה בחלקים ממקטעו המזרחי של הרחוב (בין הרחובות גזר לשפינוזה) גבוהים מאוד ונעים בין 0.7 ל-0.77. לעומתם, ערכי ההצללה במקטע שבין הרחובות דיזנגוף ובן יהודה נמוכים (0.2–0.33). הסיבה העיקרית לכך היא דווקא הצרתו של הרחוב במקטע זה בכ-4 מטרים. הצרה זו מנעה שתילת עצים בתחומי המדרכה בקטע זה של הרחוב, ובהיעדר צמחייה משמעותית ורציפה בחצרות המבנים נותר הרחוב חשוף הרבה יותר לקרינת השמש.



איור 29: אורתופוטו עדכני של רחוב דיזנגוף במקטע שבין שדרות בן גוריון ורחוב פרישמן (משמאל)



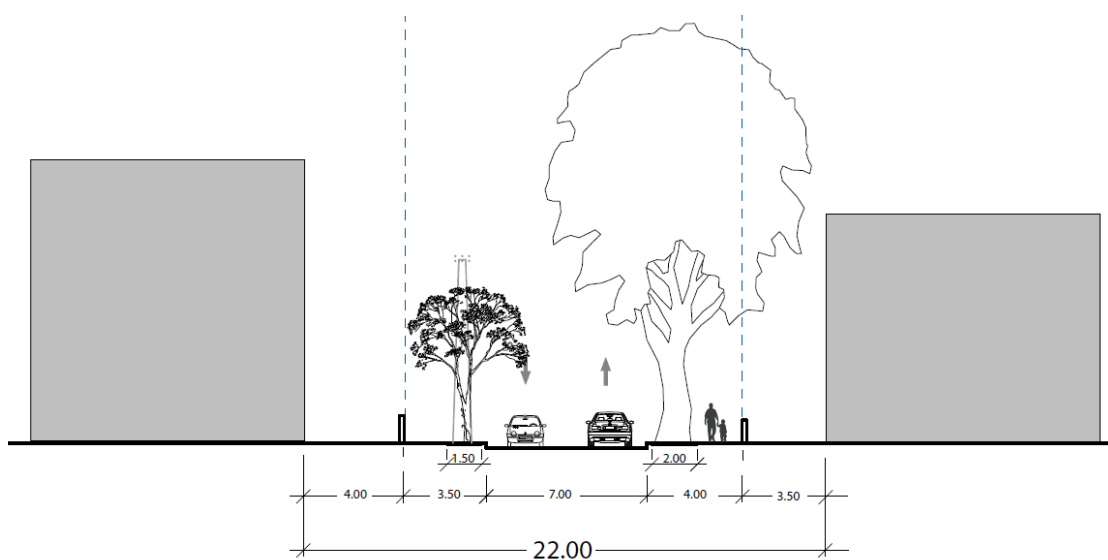
איור 30: חתך עירוני ברחוב דיזנגוף (בן גוריון-פרישמן)



איור 31: רחוב דיזנגוף, מבט צפונה סמוך להצטלבות עם רחוב פרישמן



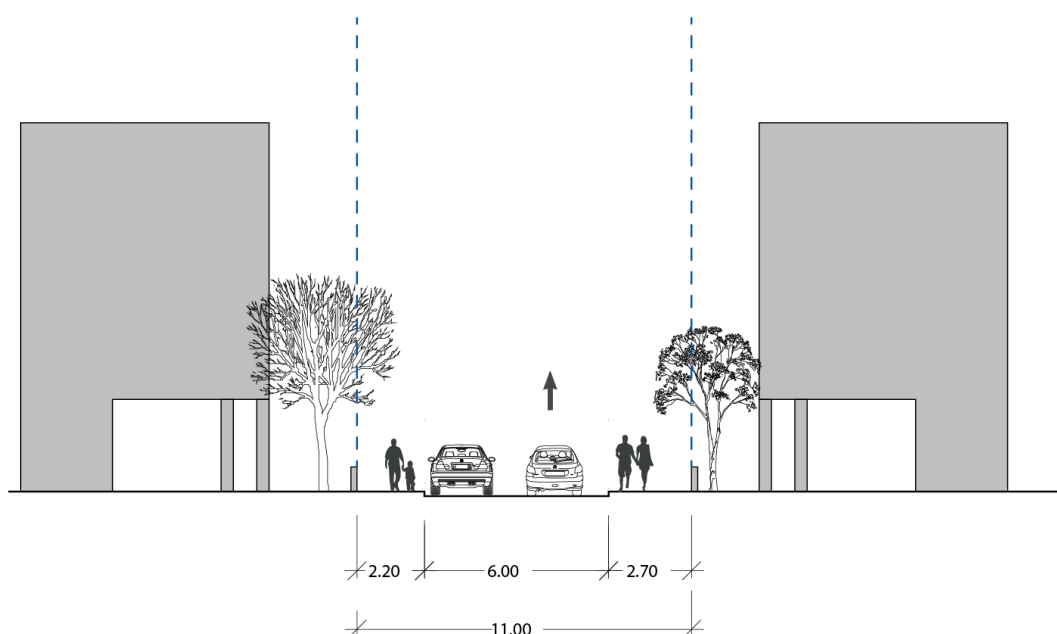
איור 32: אורתופוטו עדכני של רחוב פרישמן במקטע שבין רחוב גזר (מימין) ורחוב בן יהודה



איור 33: חתך עקרוני בחלקו המזרחי של רחוב פרישמן (גזר-שפינוזה)



איור 34: רחוב פרישמון, מבט מערבה סמוך להצטלבות עם רחוב גזר



איור 35: חתך עקרוני בחלקו המערבי של רחוב פרישמון (דיונגוף-בן יהודה)



איור 36: רחוב פרישמן, מבט מערבה סמוך להצטלבות עם רחוב פרוג

לאור ניתוח זה, ברור כי האסטרטגיה העיקרית שעל העירייה לאמץ בכל הנוגע להגדלת שיעורי ההצללה ברחובות קשורה קשר הדוק לטיפוחו ולתחזוקתו של היער העירוני. הדברים נוגעים גם לאותם רחובות שהגדרנו בניתוח שלנו כרחובות המיועדים לעיבוי צל או לשימור צל בעדיפות גבוהה. מהצלבת הניתוח המיקרו-אקלימי והניתוח המרחבי עולה כי מאמצי עיבוי הצל צריכים להתרכז ברחובות הבאים: רחוב שלבים, רחוב קפלן, דרך קיבוץ גלויות, חלקה המזרחי של דרך בן צבי, רחוב פנחס לבון, רחוב קויפמן, שדרות הר ציון, רחוב יצחק שדה, רחוב הרכבת, דרך מנחם בגין, רחוב המסגר ורחוב סלמה; שימור הצל צריך להתמקד ברחובות הבאים: שדרות ירושלים, שדרות רוטשילד, שדרות ח'ן, שדרות בן ציון, שדרות החי"ל, רחוב שלמה המלך, רחוב מלצ'ט, רחוב דיזנגוף, רחוב ריינס, רחוב הנביאים, המקטע המזרחי של רחוב פרישמן והמקטע המערבי של רחוב ארלוזורוב.

מפת ערכי ההצללה ברחובות מלמדת כי בשטחה של "העיר הלבנה" (ולמעשה, בשטחה של תוכנית גדס ואף בחלקים נרחבים של רובע 4 שתוכנן ברוחה) קיים ריכוז גבוה ורציף של רחובות שבהם מתקיימים תנאי הצללה טובים ואפילו טובים מאוד. ריכוז גבוה של רחובות מוצלים נמצא גם בשכונות פלורנטיין, כרם התימנים

והתקווה, בעיקר בשל חתכי הרחובות הגבוהים והצרים של רחובותיהן. עם זאת, רחובות רבים ביפו, כמו גם במזרח העיר ובשכונות עבר הירקון (מלבד רמת אביב ונווה אביבים), מתאפיינים בשיעור הצללה נמוכים יחסית, גם כאשר מדובר ברחובות שאינם ראשיים. מבחינה זו ערכה המיקרו-אקלימי של תוכנית גדס עולה בבירור מהניתוח שערכנו.

ברמה השכונתית, עולה כי בקווים כלליים מתקיימת בתל אביב־יפו שונות מרחבית גבוהה ברמות ההצללה: בשעה שרמות ההצללה ברוב שכונות עבר הירקון ובתוכנית גדס גבוהות יחסית, ברוב שכונותיה הדרומיות של העיר רמות ההצללה נמוכות. בגרעין ההיסטורי של העיר חושבו ערכי הצללה ממוצעים של 0.52–0.64, כשהגבוהים שבהם חושבו בשטח תוכנית גדס. ערכי הצללה נמוכים בהרבה (0.3–0.48) חושבו בשכונות רבות בחלקיה הדרומיים של העיר. בשכונות עבר הירקון המצב שונה במובהק, וטווח ערכי ההצללה שבהן נע ברובן הגדול בטווח שבין 0.53–0.67. בשכונות מזרח העיר הטווח (0.46–0.55) נמוך מעט יותר מזה של מרכז העיר וצפונה, אך גבוה מזה שבדרומה. ערכי הצללה נמוכים במיוחד חושבו בפארקים השונים בעיר, באופן המשקף את תכנונם כשטחים פתוחים עתירי מדשאות אך דלים בעצים.

השוואת ערכי ההצללה הממוצעים עם וללא עצים מעלה כי ההבדלים הניכרים בין צפון העיר לדרומה נובעים בראש ובראשונה מההבדל העמוק בהיקפו של היער העירוני בכל אחד מחלקי עיר אלה. שכונות צפון העיר הן השכונות שבהן שיעורי כיסוי הצמרות בעיר הם הגבוהים ביותר, בפער ניכר משכונות הדרום. אזורי רבים בדרומה של העיר מתאפיינים ברמות נמוכות מאוד של כיסוי צמרות, והשילוב בין דלילות היער העירוני לדלילות הבנייה בהן מניב תנאי הצללה גרועים במובהק מאשר בחלקים אחרים של העיר. באזור תוכנית גדס מתקיים שילוב יעיל ויוצא דופן ברמה הכלל עירונית בין בינוי אינטנסיבי וצפוף יחסית לבין רמות סבירות של כיסוי צמרות, והשילוב בין שני מאפיינים אלה מניב תנאי הצללה טובים במיוחד ויעילים במיוחד מבחינת התבססותם על עצים. שכונות הצפון, מבחינה זו, מאופיינות בשימוש בזבזני בעצים לצורכי הצללה: ללא עצים אלה, היו שוררים בהם תנאי הצללה גרועים בשל הבנייה הדלילה בהן.

סיכום

מחקר זה בא להציע מתודולוגיה חדשה להערכה כמותית של התנאים המיקרו־אקלימיים בתל אביב־יפו, תוך התמקדות בנושא ההצללה. המחקר מבוסס על כלים חישוביים ועל מיפוי ברזולוציה גבוהה של מבנים ועצים בעיר. המתודולוגיה המוצגת בו מאפשרת להבין את ההיררכיה היחסית של ההצללה במקטעי רחובות ובשכונות בעיר, ובאופן זה גם להקל על העירייה בגיבוש צעדים מעשיים לעיבוי צל ולשימור צל. יש לצפות לכך שבשנים הקרובות יהפוך המיפוי התלת־ממדי המפורט של הסביבה העירונית למוצר המופק עבור העירייה באופן שגרתי ובמרווחי זמן קבועים, באופן שיהפוך את סוג הניתוח המוצע במחקר זה לחלק אינטגרלי של תהליכי התכנון העירוניים ויאפשר גם לעקוב אחרי שינויים והתפתחויות הנוגעות להצללה בעיר ולכמת אותם.

כפי שהתברר במחקר, מתקיימים הבדלים ניכרים בשיעורי ההצללה בין רחובות ובין שכונות בכל רחבי העיר. הבדלים אלה נובעים מהמורפולוגיה העירונית (חתכי הרחוב האופייניים, צפיפות הבנייה) ומתכונותיו של היער העירוני (מספר העצים ברחובות, שטח הצמרות שלהם, רציפות כיסוי צמרות). בכוחם של גופי התכנון והניהול העירוניים לשנות את שדורש שינוי ולשמר את שדורש שימור, ובלבד שיגבשו מדיניות תכנונית שנושא ההצללה הוא מרכיב מהותי בה.

יישום כולל של מדיניות הצללה עירונית תלוי בראש ובראשונה בפעולתן של רשויות התכנון העירוניות ובגיבוש אסטרטגיה שתביא להגדלת רמות ההצללה ברחובות ובמרחבים הציבוריים במגוון אמצעים: טיפוח היער העירוני, שימוש בחתך רחוב צר וגבוה להצללה עצמית של הרחוב באמצעות הבנייה בו, התקנת סככות וקירויי חוץ והטמעת אלמנטים מצלים בבנייה. למרות הצורך החיוני במדיניות הצללה עירונית מקיפה חסרות עדיין כל רשויות התכנון בישראל תוכנית אסטרטגיות להצללה שיהיו מבוססות בראש ובראשונה על מיפוי כמותי של המצב הקיים. תקוותנו היא שמחקר זה יהיה צעד ראשון בכיוון זה, בתל אביב־יפו או בישראל כולה.

- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310.
- Aleksandrowicz, O. (2015). *Architecture's unwanted child: Building climatology in Israel, 1940-1977*. (PhD), TU Wien, Vienna.
- Aminipouri, M., Knudby, A. J., Krayenhoff, E. S., Zickfeld, K., & Middel, A. (2019). Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 39, 9-17.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.
- Bröde, P., Błazejczyk, K., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kuklane, K., & Kampmann, B. (2013). The Universal Thermal Climate Index UTCI Compared to Ergonomics Standards for Assessing the Thermal Environment. *Industrial Health*, 51, 16-24.
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121-136.
- Chen, L., Yu, B., Yang, F., & Mayer, H. (2016). Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach. *Energy and Buildings*, 130, 829-842.
- Erell, E., Pearlmuter, D., & Williamson, T. J. (2011). *Urban microclimate: Designing the spaces between buildings* (1 ed.). London and Washington, DC: Earthscan.
- ESRI. (2017). ArcMap v. 10.5.1: ESRI. Retrieved from www.esri.com
- Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 25-35.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83-88.
- Hammerberg, K. (2014). *Accounting for the Role of Trees in Urban Energy Balance Modeling Using GIS Techniques*. (MSc), TU Wien, Vienna.
- Hiemstra, J. A., Saaroni, H., & Amorim, J. H. (2017). The Urban Heat Island: Thermal Comfort and the Role of Urban Greening. In D. Pearlmuter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. K. Ostoić, G. Sanesi, & R. o. A. d. del Amo (Eds.), *The Urban Forest: Cultivating Green Infrastructure for People and the Environment* (pp. 7-19). Cham, Switzerland: Springer.
- Hillier, B. (1996). *Space is the machine*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Johansson, E., & Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 119-133.
- Karimi, K. (2012). A configurational approach to analytical urban design: 'Space syntax' methodology. *URBAN DESIGN International*, 17(4), 297-318.

- Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 475-497.
- Lerman, Y., & Lebendiger, Y. (2017). *Visualizing Space Syntax Analyses for Decision Making: Lessons from Israel*. Paper presented at the 11 International Space Syntax Symposium, Lisbon.
- Lerman, Y., Rofè, Y., & Omer, I. (2014). Using Space Syntax to Model Pedestrian Movement in Urban Transportation Planning. *Geographical Analysis*, 46(4), 392-410.
- Lindberg, F. (2007). Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorological Applications*, 14(3), 263-273.
- Lindberg, F., & Grimmond, C. S. B. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3-4), 311-323.
- Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C. W., Sun, T., Theeuwes, N. E., Järvi, L., Ward, H. C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K. F. G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., & Zhang, Z. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99, 70-87.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Matzarakis, A., Muthers, S., & Rutz, F. (2015). Application and comparison of UTCI and PET in temperate climate conditions. *Finisterra*, 49(98).
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227-235.
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237-254.
- QGIS Development Team. (2018). QGIS v. 2.18: Open Source Geospatial Foundation Project.
- Ratti, C., & Richens, P. (2004). Raster Analysis of Urban Form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), 297-309.
- Rich, P. M., Hetrick, W. A., & Saving, S. C. (1994). Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers* (pp. 524-529). Reno, Nevada: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Robert McNeel & Associates. (2018). Rhinoceros 3D v. 6.0: Robert McNeel & Associates,.
- Rotem-Mindali, O., Michael, Y., Helman, D., & Lensky, I. M. (2015). The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing. *Applied Geography*, 56, 145-153.
- Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A., & Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 1-18.
- Sadeghipour Roudsari, M., & Pak, M. (2013). *Ladybug: a parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. Paper presented at the BS2013: 13th International IBPSA Conference, Chambéry, France.

- Serra, M. L. A., & Pinho, P. (2013). Tackling the structure of very large spatial systems - Space syntax and the analysis of metropolitan form. *Journal of Space Syntax*, 4(2), 179-196.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1498-1506.
- Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2009). Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 30, 44-57.
- Sofer, M., & Potchter, O. (2005). The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, 85(1-2), 81-88.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99-103.
- Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*, 27, 253-264.
- Varoudis, T. (2014). depthmapX (Version 0.3b). Retrieved from varoudis.github.io/depthmapX
- Yu, B., Liu, H., Wu, J., & Lin, W.-M. (2009). Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne LIDAR data and a solar flux model: a case study of downtown Houston. *International Journal of Remote Sensing*, 30(17), 4359-4385.