

מדריך לשימוש במדדים כמותיים להצלחה בתכנון עירוני בישראל

אור אלכסנדרוביץ, נעמה שפירא, מישל קלארק לוינסון,
שחר צור ודויד פרלמוטר

דצמבר 2024 |

מדריך לשימוש במדדים כמותיים להצלחה בתכנון עירוני בישראל

אור אלכסנדרוביץ, נעמה שפירא, מישל קלארק לוינסון,
שחר צור ודויד פרלמוטר



**GUIDELINES FOR APPLYING QUANTITATIVE SHADE INDICATORS
IN URBAN PLANNING IN ISRAEL**

Or Aleksandrowicz, Naama Shapira, Michelle Clark Levenson,
Shachar Zur and David Pearlmutter

ייעוץ מקצועי: ד"ר עומרי חסון, דרך צל
הפקה: אור קונפורטי, אלה הדר בהלול, דרך צל
עריכת לשון: ענבר קמחי-אנגרט
עיצוב גרפי: דינה אוסטרובסקי

נדפס בישראל תשפ"ה, 2024
הפרסום יוצא לאור מטעם דרך צל - המרכז לייעור עירוני ולהצללה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה

תוכן עניינים

17	מבוא: אתגר כימות ההצללה בסביבות עירוניות
23	שיטות קיימות לכימות הצללה במרחב העירוני
35	גיבוש אסטרטגיית הצללה למרחב העירוני: שיטה מוצעת
69	השפעת עיצוב הרחוב על זמינות ההצללה במדרכות
87	היתכנות העמידה ביעדי ההצללה בתרחישי תכנון שונים
101	סיכום
107	ביבליוגרפיה
113	תודות
115	נספח א': מדד ההצללה המרחבי
121	נספח ב': Kikayon, קוד פרמטרי לחישוב הצללה ברחובות
127	על המחברים



תקציר

במסמך זה מוצגת מתודולוגיה סדורה לקידום תוכניות הצללה אסטרטגיות במרחב העירוני במטרה לתת בידי גופי התכנון והמתכננים מדדים להערכה כמותית ואיכותית של רמות הצללה קיימות ועתידיות על פי תרחישי תכנון שונים. המסמך מכיל סקירה תמציתית המאתרת את נקודות התורפה בשיטות הקיימות לכימות ההצללה במרחב העירוני בארץ ובעולם, ולאחריה מוצגת שיטה חדשה להצבת יעדים לתכנון הצללה ברחובות עירוניים. שיטה זו, המוצגת כאן כחלק מתהליך כולל של גיבוש אסטרטגיה עירונית להצללה, מבוססת על מדד כמותי חדש, **מדד זמינות ההצללה**.

7

קידום הצללה ברחובות עירוניים באמצעות עצים, כחלק מהותי בהתמודדות המרחבית בישראל עם תוצאות ההתחממות העולמית, עומד במרכזה של החלטת ממשלה 1022 מיום 23.1.2022. במסמך **תכנית אסטרטגית לאומית להצללה וקירור במרחב העירוני באמצעות עצים** שפרסמו המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמועצה הלאומית לכלכלה בשלהי 2022, נכללה כבר הכרה מובלעת בקשיים המתודולוגיים הטמונים ביישום החלטת הממשלה מראשית אותה שנה. התוכנית הכירה בכך שחסרה עדיין מתודולוגיה מדעית הזוכה להסכמה רחבה לקביעת יעדי הצללה וייעור עירוניים ולהגדרת צורכי המיפוי המדויקים הנובעים מיעדים אלה. בהיעדר מתודולוגיה כזאת, יתקשו כל הגורמים המעורבים בקידום

ההחלטה בהוצאה לפועל יעילה ואפקטיבית של נטיעת עצי צל בערי ישראל, במעקב אחרי התקדמות הפעולות בתחום זה ובהפניית משאבים למקומות שהם נדרשים במיוחד.

הצללה בסביבה העירונית תלויה לחלוטין באופן התכנון והעיצוב של המרחב הבנוי, ומכאן שאין לצפות להצללה ברחובות בלי שניתן לכך מקום משמעותי בתהליכי התכנון בדרגים השונים. בתצורות גאומטריות מסוימות, הצללה טובה יכולה להיות מושגת באמצעות בניינים הסמוכים למדרכות. עם זאת, במקרים רבים כדי להבטיח הצללה מספקת יש צורך בשימוש במרכיבים תלת-ממדיים נוספים במפלס הרחוב, כגון פרגולות, כדי הצללה ובעיקר עצי רחוב. כדי שגורמי התכנון יוכלו לעמוד ביעדי הצללה מדידים שהוגדרו מראש ולמטב את הקצאת המשאבים להשגתם, יש לאמץ שיטה אחידה להערכה כמותית מדויקת של ההשפעה המצטברת של הצללה ממבנים, מעצים ומכל אלמנט נופי אחר. מדד זמינות ההצללה, השם דגש על תנאי ההצללה במדרכות, פותח לצורך זה. שיפור מערכת במצב ההצללה ברחובות דורש גיבוש אסטרטגיית הצללה עירונית. אנו מציעים להבחין בין שלושה שלבים בתהליך זה: מיפוי, תיעדוף פעולות ותכנון התערבות. בשלב המיפוי אנו מציעים להכין מפת צל בהתאם לשיטה שפיתחנו בעבר. שיטה זו נוסתה לראשונה בעבודה מול עיריית תל אביב-יפו (2019) ויושמה מאז ביותר מעשר ערים נוספות בארץ. מפת צל עירונית חושפת את היררכיית "נכסי הצל" של העיר: אילו מקטעי רחובות מוצלים היטב, ובאילו חלקים מהעיר הליכה ברחובות בעונה החמה כרוכה בחשיפה קשה לקרינת השמש. על בסיס זה העירייה יכולה לאתר את נקודות התורפה האקלימיות שבעיר ולתעדף פעולות להקלה

משמעותית בעומס החום הנחוה בהן. התיעדוף צריך לנבוע מתוך מערך שיקולים עירוני הכולל בתוכו, לצד מצב ההצללה, גם שיקולים נוספים: כלכליים, חברתיים, דמוגרפיים ותחבורתיים.




תכנון ההצללה המפורט שבא בעקבות איתור נקודות התורפה ותיעדוף הטיפול בהן נועד להבטיח שהפעולות המעשיות שתנקוט העירייה יביאו לשינוי משמעותי בתנאי ההצללה בתוך פרק זמן סביר. מעצם הגדרתו, תהליך התכנון צפוי להיות כרוך בבחינת חלופות שונות, שההשוואה ביניהן צריכה להיות מבוססת בראש ובראשונה על עמידה ביעדי סף מדידים של הצללה. **מדד זמינות ההצללה** בא לענות על צורך זה.

מדד זמינות ההצללה מחושב עבור כל אחת מרצועות ההליכה או המדרכות במקטע הרחוב, בשל הרצון לתת עדיפות להצללה ולקירור של מרחב ההליכה בעיר. המדד מחושב על ידי מדידת כמות השטח המוצל בכל מדרכה בעשר נקודות זמן שעתיות בין השעות 8:00 ל-17:00 ביום קיץ טיפוסי בתחילת חודש אוגוסט (**זמן הייחוס** לחישוב המדד), משום שבזמן זה עומס החום נמצא בשיאו בתנאי האקלים השוררים בישראל. בכל אחת מעשר נקודות זמן אלה נבחן היחס שבין השטח המוצל במדרכה לשטח המדרכה הכולל. נקודת זמן ששטח המדרכה המוצל בה עולה על 50% משטח המדרכה הכולל היא נקודת זמן שמתקיים בה **מצב מספק של הצללה במדרכה**.

מדד זמינות ההצללה מתאר בסולם שבין 0 ל-1 את השיעור היחסי של הזמן שמדרכה או רצועת הליכה נמצאות במצב **מספק** של הצללה בעשר נקודות הזמן שהגדרנו. לדוגמה, כאשר שטח המדרכה המוצל הוא 50%

ומעלה בארבע נקודות זמן מתוך העשר, מדד זמינות ההצללה הוא 0.4. המדד מתייחס לנקודה במרחב כנקודה מוצלת אם לא פוגעת בה קרינת שמש ישירה. לצורך פישוט החישוב, החישוב אינו מתייחס להשפעת קרינה מוחזרת, שעשויה לגרום להבדלים קלים בעוצמת קרינת האור בנקודה המוצלת. חישוב מדד זמינות ההצללה מניח כי הבינוי ואמצעי ההצללה ברחוב פזורים לאורכו פחות או יותר במרווחים קבועים. במקרים שאופי הבינוי או פריסת ההצללה במקטע רחוב מסוים משתנים באופן מהותי לאורכו, יש לחשב את מדד זמינות ההצללה בנפרד בכל אחד מחלקי מקטע הרחוב שחתך הרחוב בהם אחיד.

על בסיס מדד זמינות ההצללה ניתן גם לקבוע יעדי הצללה נורמטיביים להצללה במדרכות. אנו מציעים לקבוע שלוש דרגות הצללה:

הצללה מצוינת	הצללה טובה מאוד	הצללה מתקבלת על הדעת
ערך מדד זמינות הצללה של 0.9 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.7 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.5 ומעלה
		

מכיוון שהמדד משקף משך זמן יחסי שמתקיימים בו תנאי הצללה מספקים (לפחות 50% משטח המדרכה מוצל), ניתן לומר שמדרכה שהתנאים מתקיימים בה לפחות במחצית משעות האור הרלוונטיות (8:00-17:00) ביום קיץ היא מדרכה שבה מתקבלת הצללה מתקבלת על הדעת. הצללה מצוינת מתקבלת כאשר לפחות ב-90% מהזמן מתקיימים תנאי הצללה אלה. מנגד, מדרכה אינה יכולה להיחשב כמוצלת אם תנאי ההצללה

המבוקשים מתקיימים בה בפחות מ-50% מזמן הייחוס.

מדד זמינות ההצללה אינו מייחס משקל שונה להצללה בשעות שונות, אף שעוצמת קרינת השמש משתנה במהלך היום. הדבר נובע מכך שבזמן הייחוס (מרבית שעות האור ביום קיץ טיפוסית), הצורך בהצללה חיוני בכל שעה כמעט באותה מידה, גם אם השפעתה הפיזיקלית של הקרינה על עומס החום שגוף האדם חשוף אליו מעט שונה, משום שבהיעדר הצללה עומס החום שהאדם יחוש צפוי להיות קיצוני בכל זמן הייחוס. המדד אינו מבחין בין צל רציף לאורך המדרכה לבין מקטעי רוחב של אור וצל לסירוגין, כל עוד סך השטח המוצל הכולל עולה על מחצית משטח המדרכה. הסיבה לכך היא שאנו סבורים שכאשר מחצית משטחה של מדרכה נמצא בצל במקרה של הצללה רציפה, מתאפשרת בחירה שוויונית של משתמשי הדרך בין תנועה בצל לבין תנועה בחשיפה מלאה לקרינת השמש. מנגד, כאשר לפחות 50% משטח המדרכה נמצאים בהצללה לסירוגין, מתקיים נתיב המשכי של הליכה לסירוגין בצל לאורך כל מסלול ההליכה.

11

כחלק מתהליך העבודה על פיתוח הדירוג הנורמטיבי של מדד זמינות ההצללה, ערכנו גם בדיקה פרמטרית מקיפה של אלפי תרחישי תכנון כדי לבחון אם ניתן לעמוד בשלוש דרגות ההצללה שקבענו בתכנון רחובות ראשיים ומשניים, בהנחה שגובה הבניינים ברחוב הוא ארבע קומות או יותר. הבדיקה העלתה כי ניתן להגיע גם לרף העליון שהגדרנו (ערך מדד זמינות הצללה של 0.9 או יותר) ברוב המכריע של תרחישי תכנון סבירים ברחובות ראשיים ובכל תרחיש תכנוני סביר ברחובות משניים. עם זאת, כדי להגיע למצב זה יהיה צורך לנטוע עצי צל בשיעור גבוה של המקרים. הדבר נכון ללא קשר לכיוון הרחוב, אף על פי שבכיוונים

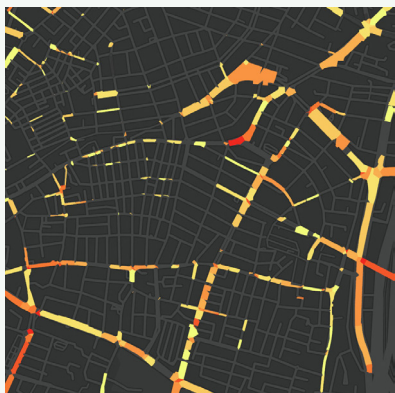
מסוימים ובתצורות גאומטריות מסוימות ניתן לעמוד ברף ההצללה הגבוה באמצעות בינוי בלבד.

בהקשר זה חשוב להדגיש כי עצי צל הם עצים שהנוף שלהם (כלל ענפי העץ והעלים שעליהם) רחב וצפוף דיו כדי להטיל צל הומוגני יחסית על הקרקע. מכאן, שלא כל עץ הנטוע במרחב הבנוי הוא עץ צל, גם אם העץ עצמו הוא ממין המומלץ לנטיעה ברחובות. הנחת התכנון צריכה להיות כי עץ המוגדר כעץ צל יהיה עץ שתנאי הגידול, הגיזום והתחזוקה שלו מאפשרים לנוף שלו לבלום בעונה החמה לפחות 90% מקרינת השמש הישירה הפוגעת בשכבה העליונה של נוף העץ, ושהצל שהוא מטיל המשכי והומוגני יחסית בכל שטח קו המתאר של היטל ההצללה על הקרקע. מובן, שלנוכחותם של עצים במרחב העירוני עשויות להיות השפעות סביבתיות חיוביות או שליליות ללא קשר לצל שהם מטילים, ויש לשקול את ההשפעות האלה בעת תכנון הצללה המתבססת בחלקה על שימוש בעצי צל. עם זאת, מדד זמינות ההצללה אינו מיועד לבחינה כמותית של ההשפעות האלה, והוא ממוקד בהשפעת השימוש בעצי צל ממינים שונים ובגדלים שונים על שיפור מצב ההצללה במדרכות.

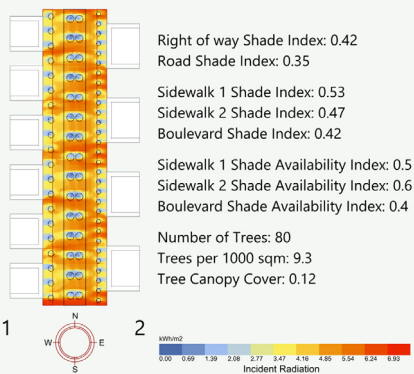
שלבים בגיבוש אסטרטגיית הצללה עירונית וביישומה



1 מיפוי היררכיית הצללה
באמצעות מפות צל

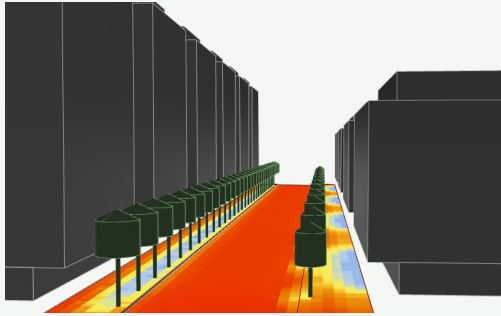


2 תיעדוף אתרי התערבות
לעיבוי צל או לשימור צל



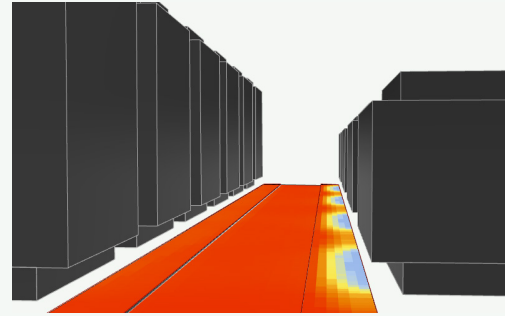
3 תכנון הצללה מפורט
על פי מדד זמינות הצללה

דירוג רמות הצללה על פי מדד זמינות הצללה (SAI)



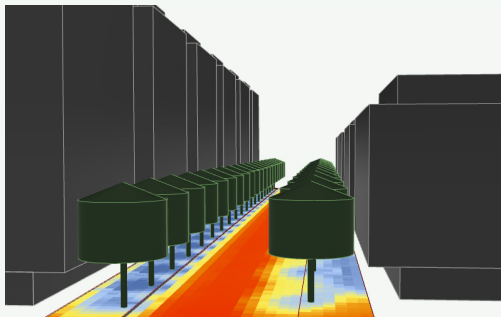
הצללה מתקבלת על הדעת

ערך מדד זמינות הצללה של 0.5 ומעלה



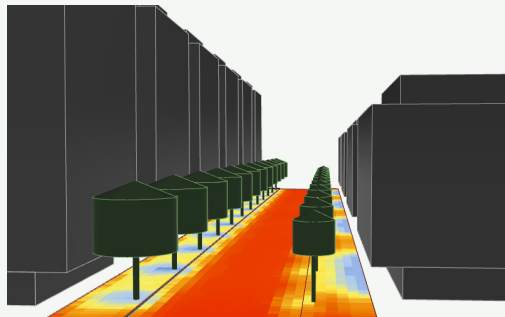
הצללה בלתי מספקת

ערך מדד זמינות הצללה נמוך מ-0.5



הצללה מצוינת

ערך מדד זמינות הצללה של 0.9 ומעלה



הצללה טובה מאוד

ערך מדד זמינות הצללה של 0.7 ומעלה





מבוא | אתגר כימות ההצללה בסביבות עירוניות

עלייה הדרגתית בטמפרטורת האוויר בחודשים החמים לצד עלייה במשכם של גלי חום ובתכיפותם צפויות להתחולל בעשורים הקרובים בישראל בשל שינוי האקלים העולמי ובשל ההתפשטות המרחבית והציפוף של הריכוזים העירוניים בה, הגורמים להחרפת תופעת אי החום העירוני. השינויים האלה עתידים להביא להחרפה ניכרת בעוצמת עומסי החום שחווים המשתמשים במרחב העירוני, אלא אם כן יינקטו פעולות מקדימות להקלה בעומסים האלה. לצד זאת, כבר כיום בתנאי האקלים השוררים בישראל במהלך חודשים רבים (ולפחות בין החודשים מאי לנובמבר), חשיפה ישירה ועקיפה לקרינת השמש היא הגורם הסביבתי המשפיע ביותר במהלך שעות היום על עלייה ניכרת בעוצמת עומס החום המורגש ועל הפחתה חדה בנוחות התרמית מחוץ לבניינים.¹ נוסף על כך, חשיפת המרחב הבין-בנייני לקרינת שמש ישירה במשך שעות ארוכות מביאה להתחממות הסביבה העירונית כולה בשעות הערב והלילה המוקדמות, באופן שמגביר את עוצמת עומסי החום בשעות אלה בתוך בניינים ומחוץ להם, ומכאן גם את צריכת האנרגיה של מערכות למיזוג אוויר.

17

1 Aleksandrowicz, O., & Pearlmutter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588.

פעולות תכנוניות יכולות אמנם לגרום להפחתה בטמפרטורת האוויר או להתגברות מהירות הרוח הנושבת בסביבה העירונית, אולם בתנאי האקלים האופייניים לישראל יש לפעולות האלה השפעה מוגבלת על שיפור הנוחות התרמית. לעומת זאת, תכנון שמבטיח הצללה משמעותית ורציפה לאורך רחובות ובשטחים ציבוריים פתוחים, יכול להביא להקלה משמעותית של עומסי החום המורגשים כבר עתה, וביתר שאת עם העלייה הצפויה בטמפרטורות האוויר בשל שינוי האקלים. להצללה בסביבה העירונית יש יתרונות נוספים, כגון מניעת תחלואה בסרטן עור, מיתון תופעת אי החום העירוני, הפחתת צריכת אנרגיה לקירור חללים פנימיים באמצעות מיזוג אוויר ושיפור התנאים הפיזיים המאפשרים לקדם הליכתיות (walkability) במרחב העירוני.²

18

הצללה בסביבה העירונית קשורה קשר הדוק לתכנון ולעיבוד המרחב הבנוי. בתצורות גאומטריות מסוימות הצללה טובה יכולה להיות מושגת באמצעות בניינים הסמוכים למדרכות. עם זאת, במקרים רבים יש צורך בשימוש במרכיבים תלת-ממדיים נוספים במפלס הרחוב, כגון פרגולות, כדי הצללה ובעיקר עצי רחוב, כדי להבטיח הצללה טובה. לעצים יש יתרונות נוספים מעבר להצללה בלבד - הפחתת זיהום אוויר וזיהום מקורות מים עיליים, תרומה אקולוגית כבית גידול למגוון בעלי חיים, שיפור המראה האסתטי של המרחב הבנוי ובמידה מסוימת גם ויסות נגר עילי.³

2 הכנסת - מרכז המחקר והמידע (2022). [מדיניות הצללה במרחב הציבורי](#); המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, משרד החקלאות, המועצה הלאומית לכלכלה (2022). [תכנית אסטרטגית לאומית להצללה וקירור במרחב העירוני באמצעות עצים](#).

3 Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., & de Vries, S. (2005). Benefits and uses of urban forests and trees. In C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (Eds). *Urban Forests and Trees* (pp. 81-114). Springer.

מחקרים מהעולם גם מצביעים על יתרונות אפשריים נוספים לנטיעת עצים ברחובות, כגון הגדלת פריון בתי עסק⁴ והעלאת ערך הנדל"ן.⁵ עם זאת, הצללה באמצעות עצים דורשת השקעת משאבים כספיים להבטחת בטי גידול תת-קרקעיים משמעותיים לצימוח שורשים ולתחזוקה מתמדת (גיזום, השקיה); ללא השקעה זו סביר להניח שנוף העץ (כלל ענפי העץ והעלים שעליהם) לא יספק הצללה אפקטיבית. מעבר לכך, נטיעת עצים חדשים בדרך כלל אינה מספקת מענה מיידית להיעדר הצללה, מאחר שעץ צל בוגר מפתח נוף משמעותי ומצל רק לאחר כעשור או יותר מנטיעתו, וגם זאת רק אם קיבל את תנאי הגידול הנאותים.⁶

קידום הצללה ברחובות באמצעות עצים, כחלק מרכזי בהתמודדות המרחבית בישראל עם תוצאות ההתחממות העולמית, עומד במרכזה של החלטת ממשלה 1022 מיום 23.1.2022.⁷ החלטת הממשלה התבססה על דו"ח שחיבר צוות בין-משרדי בהובלת המועצה הלאומית לכלכלה.⁸ מסקנות הצוות היו שעל אף ההכרה בתועלת הרבה של עצי הרחוב - מהיבטים סביבתיים, בריאותיים, חברתיים ואף כלכליים - ולמרות חשיבותם בהיערכות לשינוי האקלים, קיומם ושגשוגם של עצים

19

4 Wolf, K. L. (2005). Business district streetscapes, trees, and consumer response. *Journal of Forestry*, 103(8), 396-400.

5 Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 162-170.

6 גלון, י., היר, א. (2013). מדריך עצי הרחוב בישראל. משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמשרד להגנת הסביבה.

7 החלטה מספר 1022 של הממשלה מיום 23.1.2022. הצללה וקירור של המרחב העירוני באמצעות עצי רחוב במסגרת היערכות לשינוי האקלים.

8 המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה (2022). קידום עצי רחוב בערי ישראל - הצללה וקירור של המרחב העירוני באמצעות עצי רחוב כהיערכות לשינוי האקלים, סיכום והמלצות בעקבות שולחן עגול ממשלתי בנושא ייעור עירוני.

ברחובות הערים בישראל נתקלים בחסמים רבים, הן בשלב התכנון הן בשלבי הביצוע והאחזקה, בין השאר בשל מחסור ממשי בנתונים. במסמך **תכנית אסטרטגית לאומית להצללה וקירור במרחב העירוני באמצעות עצים** שפרסמו המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמועצה הלאומית לכלכלה בשלהי 2022 נכללה כבר הכרה מובלעת בקשיים המתודולוגיים הטמונים ביישום החלטת הממשלה מראשית אותה שנה.⁹ התוכנית הכירה בכך שחסרה עדיין מתודולוגיה מדעית מבוססת לקביעת יעדי הצללה וייעור עירוניים ולהגדרת צורכי המיפוי המדויקים הנובעים מיעדים אלה. בהיעדר מתודולוגיה כזאת יתקשו כל הגורמים המעורבים בקידום ההחלטה בהוצאה לפועל יעילה ואפקטיבית של נטיעת עצי צל בערי ישראל, במעקב אחרי התקדמות הפעולות בתחום זה ובהפניית משאבים למקומות שהם נדרשים במיוחד.

קביעת שיטת מדידה מוסכמת של הצללה במרחב העירוני חשובה למטרות אסדרה, תכנון ועיצוב. עם זאת, התוויה איכותית או כמותית של שיעורי הצללה הנדרשים מעוררת קשיים מתודולוגיים הנובעים בראש ובראשונה מהצורך להגדיר מה היא הצללה, כיצד נכון לכמת אותה מבחינה מרחבית, ובאילו מועדים חשוב במיוחד לספק הצללה. נקודה נוספת שיש לתת עליה את הדעת היא יחידת השטח הבסיסית למדידת הצללה, מאחר שניתן לחשב שיעורי הצללה שונים ליחידות

9 המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, המועצה הלאומית לכלכלה (2022). **תכנית אסטרטגית לאומית להצללה וקירור במרחב העירוני באמצעות עצים**. ראו גם גרסה מעודכנת יותר של התוכנית: ילינק, א., שווק, ק. (2023). **תוכנית אסטרטגית לאומית להצללה ולקירור במרחב העירוני באמצעות עצים**. המועצה הישראלית לבנייה ירוקה.

שטח שונות, כגון מקטע רחוב הכולל את כל זכות הדרך (כלומר, כלל שטח הרחוב המוקצה לשימושים ציבוריים), מדרכות בלבד, שטח הליכה אפקטיבי במדרכות בלבד וכיו"ב.

במסמך זה מוצגת מתודולוגיה סדורה שתענה על השאלות האלה במטרה לתת בידי גופי התכנון והמתכננים מדדים להערכה כמותית ואיכותית של רמות הצללה קיימות ועתידיות. בפרקים הבאים נביא סקירה תמציתית המאתרת את נקודות התורפה בשיטות הקיימות לכימות הצללה במרחב העירוני בארץ ובעולם, ולאורן נציג שיטה חדשה להצבת יעדים לתכנון הצללה ברחובות. שיטה זו, המוצגת כאן כחלק מתהליך כולל של גיבוש אסטרטגיה עירונית להצללה, מבוססת על מדד כמותי חדש, **מדד זמינות ההצללה**, השם דגש על תנאי ההצללה במדרכות, ברוח ההנחיה בהחלטת ממשלה 1022. נוסף על תיאור מפורט של המדד ושל היעדים הנגזרים ממנו, יש בעבודה גם הדגמות שיטתיות של שימוש במדד בתנאי תכנון שונים וניתוח היתכנות העמידה ביעדים הנורמטיביים שקבענו בעבודה זו בתכנון מעשי של רחובות בישראל.



שיטות קיימות לכימות הצללה במרחב העירוני

נושא ההצללה בסביבות עירוניות זוכה במקומות מסוימים בעולם להתייחסות מערכתית במסגרת מסמכים מסוגים שונים: תוכניות אב, תקני תכנון, הנחיות בריאות, הנחיות להתמודדות עם חום, מדריכים תכנוניים והמלצות עיצוביות. ככלל, המסמכים האלה מדגישים את התועלת הבריאותית, החברתית, הסביבתית והכלכלית של הצללה בכלל ושל עצים בפרט, כגון הפחתת עוצמתו של אי החום העירוני, עידוד פעילות פיזית, הפחתת צריכת אנרגיה, שיפור איכות האוויר, ניהול נגר עילי, תמיכה במגוון ביולוגי ועוד. אלא שבעוד שחלק מהמסמכים כוללים סטנדרטים מחייבים, אחרים מתייחסים להצללה כהמלצה כללית בלבד. לא תמיד ניתן ללמוד מפרסומים המציגים דרישות או המלצות מרחביות להצללה, עד כמה יש להם תוקף מחייב, הגם שחלק מהם מפנים להוראות מחייבות חיצוניות.¹⁰

מסמכי מדיניות העוסקים בהצללה פורסמו עד היום במגוון מצומצם יחסית של מקומות בעולם. רבים מהם מצביעים על הצורך לתת עדיפות למיזמי הצללה כך שתושג מרב התועלת החברתית והסביבתית בכפוף לזמינותם של אמצעים כלכליים, אך זאת פעמים רבות ללא הצבת יעדים כמותיים או שיטה לתיעודף פעולות על סמך מדרג כמותי של איכות

10 סקירה נרחבת של הנושא מובאת בדו"ח המקדים שהוכן במסגרת מחקר זה: שפירא, נ., אלכסנדרוביץ', א. (2024). סקירה וניתוח שיטות להערכה, לכימות ולקידום הצללה במרחב העירוני. מעבדת BDAR ומוסד שמואל נאמן.

ההצללה במרחבים שונים. לדוגמה, חלק מהמסמכים מציינים כי יש לקדם מקומות שהייה מוצלים כחלק מעיצוב הרחוב או לעשות מאמץ להבטיח הצללה מיטבית, אולם אינם נותנים תיאור כמותי אובייקטיבי המאפשר להגדיר מקום שהייה כ"מקום שהייה מוצל" או הצללה כ"הצללה מיטבית".

המסמכים המפורטים והנרחבים ביותר שאותרו במסגרת מחקר זה פורסמו באבו דאבי, בדרום-מזרח אוסטרליה ובאריזונה שבארצות הברית, וכולם מציעים גם שיטת מדידה כמותית של הצללה. תכליתם של מסמכים אלה משתנה בהתאם למאפיינים האקלימיים של האזור ולאופי הגוף שיזם את הפרסום. באבו דאבי הנחיות הצללה נכללו במסגרת מדריכים לתכנון מקיים של המרחב הציבורי. באוסטרליה נושא ההצללה הופיע לראשונה במסמכי מדיניות שעסקו במניעת סרטן עור, הגם שבשנים האחרונות ניכר שהצללה מוצגת שם יותר ויותר גם כאמצעי חשוב בהתמודדות עם עומסי חום. באריזונה הושם דגש על הגברת נוחות תרמית באמצעות הצללה כבסיס לעידוד תחבורה לא ממונעת, תוך הכרה במקומה של ההצללה גם בהפחתת עוצמתו של אי החום העירוני. עם זאת, התייחסות של שלושת המסמכים לכימות ההצללה (טבלה 1) דומה: הצללה מחושבת באופן גאומטרי פשוט, כיחס שבין שטח ההיטל של אמצעי ההצללה (ובתוך כך עצים) על משטח אופקי מוצל לבין שטח מרחב הייחוס שהוא אמור להצל עליו. מרחב ייחוס זה יכול להיות מקטע רחוב, גן ציבורי, כיכר, שכונה או אפילו עיר שלמה.

טבלה 1: תמצית מדדי הצללה במדינות שונות

אריזונה ¹³	אוסטרליה ¹²	אבו דאבי ¹¹	
יצירת נוחות תרמית לטובת עתיד בטוח ובריא	קירור עירוני לצד היבטים בריאותיים	שיפור הנוחות התרמית (עירוניות מקיימת)	תכלית ההצללה
טבעית ובנויה	בעיקר טבעית	טבעית ובנויה	סוג ההצללה
גאומטרית, היטל אמצעי ההצללה על משטח אופקי יחסית לשטח הייחוס	גאומטרית, היטל אמצעי ההצללה על משטח אופקי יחסית לשטח הייחוס	גאומטרית, היטל אמצעי ההצללה על משטח אופקי יחסית לשטח הייחוס	שיטת חישוב ההצללה
לאורך של 20 דקות (הליכה והמתנה) - הצללה מינימלית קבילה היא בשיעור של 20%; הצללה טובה היא בשיעור של 30%, הצללה מצוינת היא בשיעור של 60%	כיסוי חופת עצים עירונית - 30%; בשבילים - עץ כל 15 מטר; חניות - 10%; התייחסות ספציפית למתקנים רגישים (חינוך, בריאות)	רחובות - 60% עד 75%; שטחים ציבוריים פתוחים - 60%; אזורי ישיבה - 70%; מסלולי רכיבה - 50%; גני משחקים - 90%; חניות - 40%	אחוז הצללה מינימלי
אין התייחסות מפורשת	אין התייחסות מפורשת	כן - מדידה לאחר חמש שנים ובזמן הבגרות של העצים	התייחסות לזמן הצימוח של עצים
18:00-12:00, מאי עד אוקטובר	15:00-9:00	13:00, ב-21 במרץ וב-21 ביוני	מועד ייחוס
רצועת ההליכה	אין הגדרות מפורשות	1.8 מטר מאזור ההליכה הראשי ברחובות	הגדרת אזור ההצללה

11 Abu Dhabi Urban Planning Council (2010). *The Pearl Rating System for Estidama Community Rating System*; Abu Dhabi Urban Planning Council (2016). *The Pearl Rating System for Estidama Public Realm Rating System*.

12 Stoneham, M., Earl, C., & Baldwin, L. (2007). *Creating shade at public facilities: Policy and guidelines for local government* (Edition 2). Australian Institute of Environmental Health (AIEH), Australia; Low Carbon Living CRC (2017). *Guide to Urban Cooling Strategies*; Coutts, A., & Tapper, N. (2017). *Trees for a Cool City: Guidelines for optimised tree placement*. Melbourne Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.

13 Nature's Cooling Systems Project (2019). *Heat Action Planning Guide, for Neighbourhoods of Greater Phoenix*. *Creating Urban Heat Solutions in the Valley of the Sun*.

בתוך כך, במסמכים האלה קיימות נקודות שלא ניתן להן מענה, כדלקמן:

- מדד כיסוי חופת עצים (Tree Canopy Cover) עירונית, שבו ערך ממוצע בודד אמור לייצג את מצב היער העירוני בכל העיר, רחוק מלאפשר הבנה טובה של השונות המרחבית, אם היא קיימת, בחלוקת משאב העצים העירוני. לדוגמה, כאשר שטח השיפוט העירוני כולל "חגורות ירוקות" בשולי העיר, הדבר משפיע לטובה על שיעור כיסוי חופת העצים העירונית, אך עשוי שלא לייצג כלל מחסור בכיסוי חופת העצים בשכונות ברחבי העיר.

- בדומה לכך, גם קביעת שיעור כיסוי חופת העצים הנדרש במרחב נתון או ברחוב, ללא התייחסות לרצף ההצללה באותו מרחב או להשתנות תמונת ההצללה במהלך שעות היום ובין עונות השנה, עלולה להניב פתרונות עיצוביים שיעילותם מוגבלת.

- כאשר הצללה מחושבת על בסיס שטח היטל אמצעי ההצללה על משטח אופקי (כמו במדד כיסוי חופת העצים), ייצוג זה אינו מבטא מצב מציאותי, משום שברוב המוחלט של המקרים השמש אינה ממוקמת בזנית (זווית של 90 מעלות ביחס לפני הקרקע), אלא בזוויות נמוכות יותר. שיטה זו מתעלמת מעוצמות הקרינה המשתנות של השמש במהלך שעות היום ועונות השנה וכן מהכיוונים המשתנים שקרינת השמש הישירה מגיעה מהם, הגורמים פעמים רבות לכך שפריסת הצל על הקרקע מרוחקת מאמצעי ההצללה עצמו (לדוגמה, עץ שהנוף שלו מטיל צל על הכביש שלצידו ולא על המדרכה שהוא נטוע בה). מאותה סיבה, שיטת חישוב זו מתעלמת מתרומתם של בניינים להצללת הרחוב, אף על פי שבמקרים מסוימים היא עשויה להיות משמעותית.

● מאחר שהפריסה המרחבית של ההצללה משתנה משעה לשעה ומעונה לעונה, הגדרה רחבה של זמן ייחוס (למשל, 11:00-15:00 בין אפריל לספטמבר) אינה מביאה בחשבון את ההבדלים הניכרים במיקום השמש בשמיים ובעוצמות הקרינה בחודשים האלה. הגדרה רחבה מדי עשויה להביא לאימוץ פתרונות הצללה שלא ייתנו מענה מיטבי דווקא בזמנים שעומסי החום הם הכבדים ביותר.

● ההנחה שאמצעי ההצללה למיניהם (עצים, בדים, רשתות, פרגולות וכיו"ב) חוסמים את קרינת השמש הישירה במלואה אינה מדויקת ברוב המקרים. השיטות לחישוב שטח הצללה מתעלמות מכך, ומתייחסות באופן שווה לאמצעי הצללה ששיעורי חדירת קרינת השמש דרכם עשויים להיות שונים באופן משמעותי.

27

בישראל קידום הצללה נאותה במרחב הציבורי מתבצע כיום באמצעות כלי מדיניות שונים. הנחיות **מחייבות** להצללה קיימות כיום רק במרחבים מוגדרים, ובפרט במוסדות חינוך ובגני שעשועים, בבריכות שחייה ובחופי רחצה, ותכליתן היא הגנה על אוכלוסיות פגיעות באזורים בעלי חשיפה משמעותית לשמש. ניתן ללמוד מדיונים שהתקיימו בנושא כי המוטיבציה המרכזית לאימוץ התקינה היא סיבות בריאותיות ובטיחותיות (הגנה מפני סרטן עור וכוויות), עם דגש מועט על נושא הנוחות התרמית במרחב העירוני הפתוח.¹⁴ עם זאת, גם התקנות העדכניות והמפורטות ביותר בנושא, הנוגעות להצללה של גני שעשועים, אינן נותנות מענה בהיר דיו לאופן השגת ההצללה אפילו במרחבים אלה. התקנות אומנם מגדירות

14 למשל, הוועדה המיוחדת לזכויות הילד, ישיבה מיום 14.7.2015, בנושא הצללה במגרשי משחקים. פרוטוקול מס' 8.

זמן ייחוס למדידת ההצללה, וכן קיימת בהן התייחסות לאיכות הצל ("התנאים התרמיים המתקבלים על ידי פתרון הצללה, ובכללם צפיפות הצל, שימור תנאי הצל לאורך זמן ונוחות תרמית"), אך הן קובעות כי ההצללה תתוכנן ותבוצע תוך התחשבות בתנאים אלה, ואינן מפרטות ערכים כמותיים מחייבים כלשהם. כמו כן, גם ההגדרה מה הוא צל ("אזור שקרני השמש לא מגיעות אליו באופן ישיר") מניחה במובלע שכל משטח שמשמש להצללה בולם קרינת שמש ישירה במלואה, אולם מצב זה נדיר שיתקיים במציאות. אם לא די בכך, התקנות מתמקדות בהצללת מתקני המשחקים, ולפיכך אינן מתייחסות כלל להצללת אזורי הישיבה והמנוחה הסמוכים, כמו גם לדרכי הגישה לגני השעשועים ולמתקנים עצמם בתוך שטחם. פירושו של דבר הוא כי בפועל אין כיום בישראל הנחיות מחייבות לתכנון הצללה ברחובות עירוניים, ולא ניתן מענה אסדרתי הולם שיבטיח את שיפור הנוחות התרמית בעונה החמה במרחב הציבורי בערי ישראל.

הפער בין הרצון לשפר באופן משמעותי את מצב ההצללה במרחב העירוני לבין מחסור בכלים כמותיים לתכנון הצללה הביא בשנים האחרונות לניסיונות ראשונים להציע שיטה כוללת לכימות ההצללה במרחבים עירוניים שונים, תוך מתן דגש על רחובות עירוניים. מסמך הנחיות לתכנון צל במרחב הציבור שהכינו תמי הירש ושחר צור עבור עיריית תל אביב-יפו בשנת 2017 הוא אולי מסמך המדיניות הראשון שפורסם בישראל בנושא הצללה עירונית וכלל מדדים כמותיים מקיפים.¹⁵ המסמך, שאינו בעל תוקף מחייב, עוסק בהצללה של מרחבים

15 הירש, ת., צור, ש. (2017). תא/9083, מסמך הנחיות לתכנון צל במרחב הציבור, עבור תכניות פיתוח ועיצוב אדריכלי ופרויקטים עירוניים במרחב"צ. משרד אדריכל העיר - מנהל הנדסה, עיריית תל-אביב-יפו.

שונים בעיר, ובהם רחובות, שטחים פתוחים, שטחי חוץ של מבני חינוך, ספורט וקהילה וחניונים, באמצעות פתרונות הצללה מלאכותיים וטבעיים, כולל הצללה ממבנים. כימות ההצללה נעשה באמצעות חישוב גאומטרי של שטח היטל הצל על פני מישור אופקי ביחס לשטח הכולל של אותו מישור. לפי המסמך, השטח המוצל צריך להיות לפחות 80% משטח הייחוס במקומות הבאים: מוקדי שהייה ועניין (מתקני משחקים, מקומות ישיבה), שבילי מעבר ורחובות (נדרש כיסוי המשכי של 80%, אולם רק באחת משתי המדרכות ברחוב). המסמך קובע אחוזי הצללה נמוכים יותר לחצרות בתי ספר ולחניונים על-קרקעיים (50%), לכיכרות או לרחבות (40%) ולמרכזי ספורט ולשטחים מגוננים כגון פארקים (20%). המסמך אינו מנמק מדוע נקבעו ספי ההצללה הכמותיים כפי שנקבעו, או את הסיבה להבחנה בין ספי ההצללה הנדרשים בשטחים פתוחים מסוגים שונים. כמו כן, אין במסמך התייחסות ברורה לאופן חישוב גבולות שטח הייחוס בשטחים שהגדרתם עמומה (לדוגמה, כיצד נקבעים גבולות "מוקד שהייה ועניין" מסוג מסוים).

המסמך נוקב בתשעה מועדי ייחוס שמרחב הייחוס צריך לעמוד בהם בסף ההצללה הנדרש: שלושה מועדים (10:00, 13:00 ו-16:00) בכל אחד משלושה ימי ייחוס (21 ביוני, 21 באוגוסט ו-21 באוקטובר). אין במסמך הסבר לבחירה במועדים אלה, אולם ניתן להניח כי הכוונה הייתה לייצג את מצב ההצללה לאורך שעות האור בראשית הקיץ, בשיא הקיץ ובסתיו. ההנחיות אינן כוללת הסבר ברור מה הוא הכלי שבאמצעותו מחושב היטל הצל על שטח הייחוס, אולם ניתנת המלצה לבצע את החישוב בתוכנות מידול תלת-ממדיות הזמינות בשוק (כגון אוטוקאד, רוויט, סקצ'אפ וריינו).

לצד החישוב הכמותי, מסמך ההנחיות מציג שיטה להערכת איכות הצללה הכוללת ארבעה היבטים של השפעת אמצעי ההצללה על האקלים המקומי בקרבתו (טמפרטורת האוויר, הלחות, פליטת החום והגבלת הרוחות), שני היבטים של נוחות ובריאות (מעבר האור והגנה מקרינת UV), ושני היבטים של תחזוקה (אורך החיים ותכיפות התחזוקה). כל אמצעי הצללה (טבעי או מלאכותי) מדורג בהתאם לכל אחד מהיבטים (בסולם של שלוש דרגות: מספק, ניטרלי/בינוני וטוב מאוד). נוסף על כך, המסמך מציג ארבעה תנאי יסוד לטיפול עצי צל בריאים ומאריכי ימים בשטחים מרוצפים, מאפיין עצי צל מומלצים לשילוב בתוכניות, ומכתיב הנחיות לתכנון צל לפי סוג המרחב העירוני הפתוח, כגון העדפת פתרונות הצללה טבעיים, בחירה וטיפול עצים שיבטיחו הצללה איכותית לטווח ארוך, תכנון פתרונות הצללה משלימים לשלבים שונים לאורך צימוח העצים ומרווח נטיעה מינימלי. עם זאת, המסמך אינו מספק כלי יישומי להשוואה בין חלופות תכנוניות ואינו בוחן את מידת היתכנות העמידה בספי ההצללה שנקבעו בו בתרחישי תכנון שונים.

מדיניות והנחיות להצללה במרחב העירוני הציבורי פותחו בשנים 2017 - 2019 על ידי צוות מחקר בהובלת אדריכלית נעמי אנג'ל, שהייתה אז מתכנתת מחוז תל אביב במנהל התכנון, לימור שעשוע-בר, אביבה פיטרס וסמדר מאיר. העבודה, שלא קיבלה תוקף מחייב ולא פורסמה במסמך רשמי של מנהל התכנון, התמקדה בהצללה ברחובות, בצירי הליכה ובשבילי אופניים.¹⁶ מטרת העבודה הייתה לקבוע קריטריונים כמותיים

16 העבודה הוצגה בישיבת מליאה מספר 865 של הוועדה המחוזית תל אביב ביום 3.9.2018, ותמצית שלה פורסמה במאמר: Peeters, A., Shashua-Bar, L., Meir, S., Shmulevich, R. R., Caspi, Y., Weyl, M., Motzafi-Haller, W., & Angel, N. (2020). A decision support tool for calculating effective shading in urban streets. *Urban Climate*, 34, 100672.

ואיכותיים לתכנון צל רציף במרחב העירוני ציבורי ולגבש הנחיות עבור הצללה מיטבית. העבודה קבעה כי מטרת ההצללה היא למנוע באופן מוחלט עומס חום על גוף האדם (נוחות תרמית מלאה), ומיעד זה נגזרו יעדים כמותיים שחושבו באמצעות מדד חדש בשם "מדד צל למרחב העירוני הציבורי". המדד פותח על בסיס סדרה של מדידות אקלימיות מדגמיות ברחובות עירוניים והדמיות תרמיות שבחנו תרחישי תכנון שונים בשעות היום בחודש יולי במישור החוף.

מדד הצל למרחב העירוני הציבורי הוא מדד גאומטרי במהותו, הקובע יעדים על פי היחס שבין שטח ההיטל של אמצעי ההצללה על משטח אופקי לבין שטח הייחוס (ברוב המקרים, שטח זכות הדרך במקטע רחוב). המדד מבחין בין איכות הצל של אמצעי הצללה שונים, ומעניק משקל שונה לעצים בצפיפויות עלווה שונות ולאמצעי הצללה מלאכותיים שונים. את המשקל הרב ביותר מעניק המדד לעצים צפופי עלווה. למשל, נקבע כי ברחוב עם עצים בעלי עלווה צפופה נדרש כיסוי חופת עצים של 60% לפחות משטח זכות הדרך, אולם אם ההצללה נעשית באמצעות פרגולות בלבד, יידרש אחוז כיסוי גבוה יותר, של 85% לפחות. עבודה זו לא בדקה עד כמה קל ליישם את יעדי ההצללה שנקבעו בה במורפולוגיות עירוניות שונות, או עד כמה היעדים שנקבעו בה מתקיימים כבר עתה במרחבים עירוניים בישראל.

התבססותו של המדד על חישוב שטח ההיטל האנכי של אמצעי ההצללה מתעלמת מהשוני שבהיטלי הצל על פני הקרקע בכיווני רחובות שונים, בחתכי רחוב שונים ובשעות שונות. נתונים אלה מובלעים אומנם במדד שפותח, משום שההדמיות התרמיות שעמדו בבסיסו בוצעו עבור רחוב בכיוון מזרח-מערב וביחס גובה/רוחב של 1. למרות זאת, רחוב כזה מייצג

תרחיש ייחוס מחמיה, שאינו אופייני למצבי תכנון רבים. מכאן, שעבודה זו קבעה יעדי הצללה גורפים בלי להבחין בין מורפולוגיות עירוניות שונות שייטכן שניתן להבטיח בהן נוחות תרמית בקיץ גם כאשר ספי התכנון נמוכים יותר מכפי שנקבע בעבודה. נוסף על כך, התבססותה של העבודה על ההנחה כי באמצעות הצללה ניתן להגיע לנוחות תרמית בקיץ הישראלי, הגם שגובתה במספר מדידות מדגמיות שנערכו במטרופולין תל אביב, אינה עולה בקנה אחד עם ממצאים של מחקר המבוסס על מדידות במאות נקודות שערכנו בתל אביב ובכפר סבא. מחקר זה הראה כי במקרים רבים בקיץ, הצללה מצוינת אינה ערובה לתנאים של נוחות תרמית מלאה, הגם שהיא חיונית להורדה משמעותית בעומס החום בשעות היום.¹⁷ מכאן עולה כי בגיבוש מדד כמותי להצללה יש טעם להתמקד בתרומה היחסית של הצללה להפחתה ניכרת בעומס החום ולא בתרומתה האבסולוטית להשגת נוחות תרמית מלאה בקיץ.

17 Aleksandrowicz, O., & Pearlmutter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588.



גיבוש אסטרטגיית הצללה למרחב העירוני ויישומה: שיטה מוצעת

השיטה המתוארת במסמך זה מיועדת לתת כלים מעשיים להערכה כמותית של מצב הצללה קיים או מוצע במרחב העירוני בקני מידה שונים של תכנון עירוני. ברמה הלאומית ניתן להשתמש בשיטת ההערכה המתוארת לקביעת יעדים לאומיים ישימים להצללה, לניסוח אסדרה מחייבת להכללת הצללה בתוכניות מתאר ולקביעת יעדים במכרזים בתמיכה ממשלתית ליישום בפועל של תוכניות לתוספת הצללה במרחבים עירוניים. ברמה המקומית, השיטה יכולה לשמש לגיבוש תוכניות אסטרטגיות להצללה, לעיצוב חתכי רחוב עירוניים של שכונות חדשות ולתכנון תוספת רכיבי הצללה למקטעי רחובות קיימים.

בשיטה שאנו מציעים, קביעת אסטרטגיית הצללה עירונית מבוססת על תהליך תלת-שלבי (טבלה 2): מיפוי היררכיית ההצללה העירונית; תיעדוף אזורי התערבות לתוספת הצללה; תכנון מפורט של ההצללה בקנה המידה של מקטע הרחוב הבודד. שיטת מיפוי היררכיית ההצללה העירונית המופיעה במסמך זה גובשה כבר על ידי המחברים בעבודה

קודמת, ויושמה עד היום במספר ערים בישראל,¹⁸ ומשום כך נביא במסמך זה רק תיאור תמציתי שלה. תיעדוף אזורי ההתערבות כרוך בשיקולים עירוניים מקומיים החורגים מהתחום האקלימי הטהור, ולכן שלב זה יתואר כאן בקווים מנחים בלבד. עיקרה של העבודה מוקדש לתיאור השיטה, המבוססת על קביעת יעדי הצללה כמותיים נורמטיביים ותכנון מפורט על פיהם. שיטה זו, המוצגת כאן לראשונה, מבוססת על מדד חדש, מדד זמינות ההצללה, המתואר בהרחבה בהמשך. השיטה מתאימה במידה שווה לעיצוב מחדש של רחובות קיימים ולתכנון רחובות עתידיים במסגרת תוכניות מתאר עירוניות.

טבלה 2: רלוונטיות שלבי העבודה המוצעים לתרחישי התכנון השונים

תכנון הצללה מפורט	תיעדוף פעולות הצללה	מיפוי היררכיית הצללה	
✓	✓	✓	קביעת מדיניות לאומית
✓	✓	✓	גיבוש אסטרטגיה עירונית
✓	✓		תכנון תוכנית מתאר עירונית
✓			תכנון מפורט של מקטע רחוב

18 אלכסנדרוביץ', א., צור, ש., לבנדיגר, י., לרמן, י. (2019). מפות צל והשימוש בהן לטובת שימור ועיבוי צל בתל-אביב-יפו - דו"ח מסכם. מוגש למחלקת השימור, עיריית תל-אביב-יפו.

מיפוי היררכיית הצללה עירונית: מדד ההצללה המרחבי

המרחב העירוני מפותח לאורך שנים ותקופות ועל פי תפיסות תכנוניות שונות, עם הבדלים ניכרים בצפיפות הבינוי ובנוכחותם של עצי צל או אמצעי הצללה אחרים במרחב הציבורי. פעמים רבות נושאים אקלימיים, ובתוכם הצללת המרחב הציבורי, אינם מובאים בחשבון בזמן התכנון ואינם משמשים אמת מידה לבחינת איכות התכנון. בעקבות זאת, רחובות רבים בישראל, ובהם גם רחובות ראשיים המושכים אליהם ציבור רחב, אינם מספקים הגנה מינימלית מפני חשיפה לקרינת שמש (ישירה, מפוזרת ומוחזרת) בעונה החמה. לנוכח זאת, השלב הראשון בקביעת אסטרטגיית הצללה עירונית הוא מיפוי מפורט של היררכיית ההצללה העירונית, כדי לאתר את נקודות התורפה האקלימיות ברשת הרחובות העירונית הקיימת.

37

מפות צל עירוניות הן מפות המתארות את רמות ההצללה במרחבים העירוניים ברזולוציה גבוהה, הנדרשת להבנת מצב ההצללה הפרטני בכל נקודה בעיר מנקודת מבטם של משתמשי הדרך הלא-ממונעים (הולכי רגל, רוכבי אופניים וכיו"ב). מפות כאלה חייבות להתבסס על מדד כמותי ברור ובר-שחזור, שיאפשר השוואה פשוטה בין רמות ההצללה השוררות במרחבים הציבוריים השונים בעיר. אנו מציעים להכין את מפות הצל העירוניות על פי **מדד ההצללה המרחבי** (SI - Shade Index, המפורט בנספח א'), בשיטה שיישמנו כבר במספר

ערים בישראל.¹⁹ מדד ההצללה המרחבי מתאר בסולם פשוט בין 0 ל-1 באיזו מידה נבלמת פגיעתה הישירה המצטברת של קרינת השמש במפלס הקרקע במהלך יום קיץ טיפוסי. שיעור בלימת הפגיעה נגזר ממיקומה של השמש בשמיים בכל שעה נתונה, מעוצמתה של קרינת השמש באותה השעה ומתכונותיו התלת-ממדיות של המרחב העירוני (רוחב זכות הדרך, גובה המבנים וצפיפותם, צפיפות נטיעת העצים וגם גובה, שטח ההיטל והצפיפות של נוף העצים). מצב ההצללה המופיע במפת הצל עשוי להשתנות באופן משמעותי בעקבות שינויים מהותיים בסביבה הבנויה (לדוגמה, הריסת בניינים, הגבהת בניינים או הקמת בניינים חדשים) וביער העירוני (לדוגמה, כריתת עצים, גיזום עצים, נטיעת עצים חדשים או צימוח מהיר של נוף עצים צעירים). אי לכך, מומלץ להכין מפות צל עירוניות במרווחי זמן קבועים של בין שלוש לחמש שנים לכל הפחות, פרק זמן המאפשר לעקוב אחרי שינויים מהותיים במבנים ובעצים ולהעריך את התועלת שנובעת ממיזמים ממוקדים לשיפור מצב ההצללה בעיר.

מפת צל ברחובות ובשטחים ציבוריים פתוחים מאפשרת להציג תמונה עשירה של היררכיית ההצללה במרחבי ההליכה העיקריים בעיר. במפה זו, מדד ההצללה המרחבי מחושב בכל מקטע רחוב (קטע רחוב התחום בין שני צמתים הכולל את כל זכות הדרך) ובכל שטח ציבורי פתוח. לדוגמה, מפת הצל ברחובות ובשטחים הציבוריים הפתוחים של העיר

¹⁹ שם, וכן:

Aleksandrowicz, O., Zur, S., Lebendiger, Y., & Lerman, Y. (2020). Shade maps for prioritizing municipal microclimatic action in hot climates: Learning from Tel Aviv-Yafo. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101931; Aleksandrowicz, O. (2022). Mapping and management of urban shade assets: A novel approach for promoting climatic urban action. In A. Khan, H. Akbari, F. Fiorito, S. Mithun, & D. Niyogi (Eds). *Global Urban Heat Island Mitigation* (pp. 1-27). Elsevier Amsterdam.

חולון (איור 1) מציגה טווח רחב של רמות הצללה, החל משיעור הצללה של 0.0 (כלומר, ללא הצללה כלל) ועד 0.75 (כלומר, שלושה רבעים מקרינת השמש המצטברת ביום קיץ נבלמת טרם הגעה לפני הקרקע). עם זאת, ניתוח סטטיסטי של המצב מעלה כי שיעור ההצללה במרבית מקטעי הרחובות בעיר נע בין 0.10 ל-0.30, שהם שיעורים נמוכים עד נמוכים מאוד. על סמך מפה זו ניתן, אם כן, להציג בקלות מקטעי רחובות ושטחים פתוחים שתנאי ההצללה בהם נמוכים באופן יחסי, להבחין במקומות שנהנים מתנאי הצללה גבוהים באופן יחסי, ועל סמך היררכיה זו ובשילוב עם שיקולים תכנוניים אחרים, לתעדף פעולות קונקרטיות וממוקדות לשיפור מצב ההצללה.

39

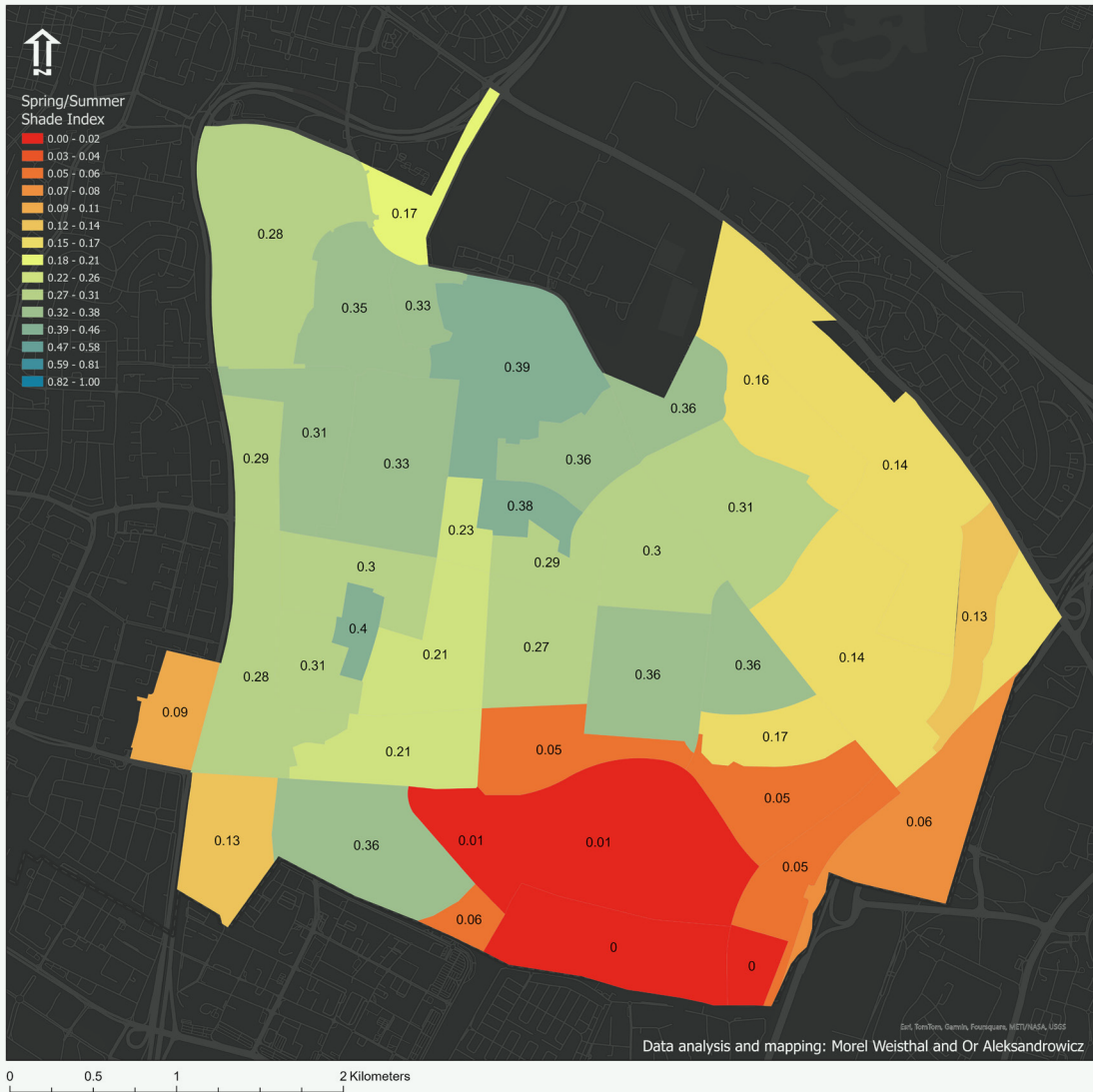
מדד ההצללה המרחבי מאפשר גם לחשב שיעורי הצללה ממוצעים בשכונות או באזורים עירוניים שגבולותיהם מוגדרים מראש (כגון רבעים, מרחבי תכנון, אזורים סטטיסטיים). לדוגמה, **מפת צל** אזורית המציגה את מצב ההצללה הממוצע במרחבים עירוניים שהגדירה עיריית חולון (איור 2) מגלה הבדלים ניכרים בהצללה בין השכונות הוותיקות יותר של העיר (בעיקר בצפון העיר) לבין אזור התעשייה הגדול במזרח העיר. כמו כן, ניתן להבחין כי באזור בלב העיר שמרוכזים בו מספר מוזיאונים ובנייני ציבור מרכזיים בעיר, רמת ההצללה הכללית נמוכה בהשוואה לשכונות המגורים שסביבו. ניתוח כזה, בשילוב עם נתונים נוספים המשויכים לאותם אזורים או שכונות, מאפשר למתכננים להתמקד באזור מוגדר שתנאי ההצללה בו נמוכים בממוצע באופן משמעותי בהשוואה לשאר האזורים בעיר, גם אם בתוך אותו אזור נמצאים מקטעי רחובות מסוימים שנהנים מתנאי הצללה מוצלחים. שילוב בין שני סוגי המפות (איור 3) מאפשר גם לגלות בקלות רחובות הסובלים מהיעדר ניכר בהצללה דווקא

באזורים שההצללה הממוצעת בהם טובה יחסית, ולהפך.

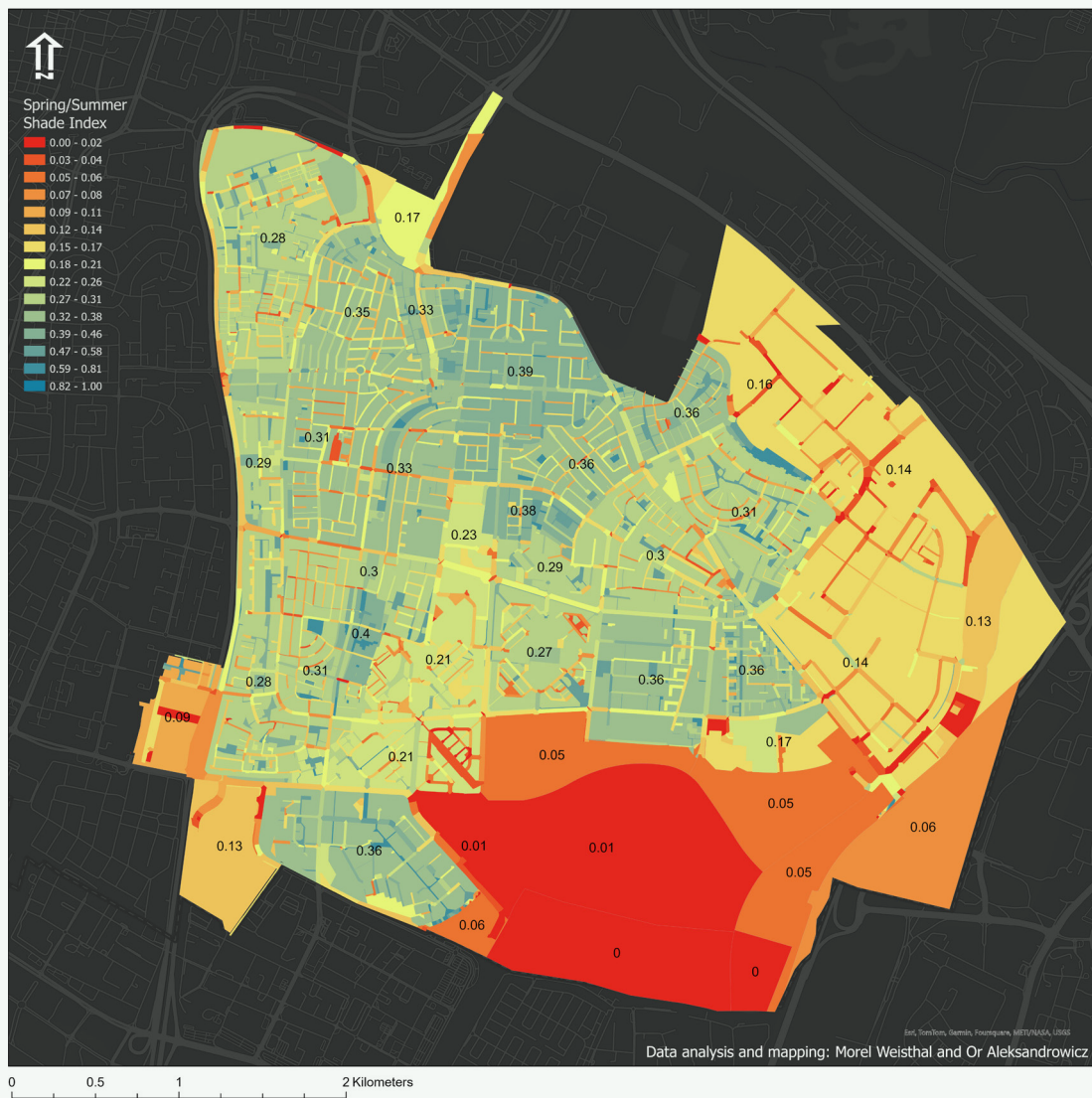
מפות צל מאפשרות לבחון גם את התלות היחסית שיש לרמת ההצללה ברחובות, בשטחים ציבוריים או בשכונות, בהצללה מעצים. על ידי השוואה בין מפת צל המציגה את המצב הקיים למפת צל המציגה את מצב ההצללה בניכוי ההצללה מעצים (איור 4 ואיור 5) ניתן לאתר מקטעי רחובות ואזורים שקיימת בהם תלות גדולה במיוחד בעצי צל לצורך הבטחת רמות הצללה סבירות, ולכוון לשם מאמצי שימור של העצים הקיימים. הפרש גדול במדד ההצללה בין המצב הקיים למצב ההצללה בניכוי השפעת עצים מעיד גם על כך שלמורפולוגיה העירונית (המאפיינים הפיזיים של הסביבה הבנויה, כגון צפיפות וגובה הבינוי ורוחב וכיוון הרחובות) כמעט שאין השפעה חיובית על שיפור מצב ההצללה, אף שבתכנון נכון ניתן להבטיח רמות הצללה סבירות ואפילו טובות רק באמצעות בניינים. בהקשר הישראלי, ההשוואה גם מבליטה את יתרונם של רחובות הנפרסים מצפון לדרום בהצללת שטח הרחוב באמצעות בניינים על פני רחובות הנפרסים ממזרח למערב, שקשה להשיג בהם רמות הצללה מתקבלות על הדעת ללא שכבה משמעותית ורציפה של עצי צל. מההשוואה עולה גם כי בנייה צפופה יחסית ברחובות מאפשרת להגיע לרמות הצללה גבוהות בזכות חתך רחוב צר וגבוה (בניינים גבוהים יחסית לצד זכות דרך צרה יחסית).



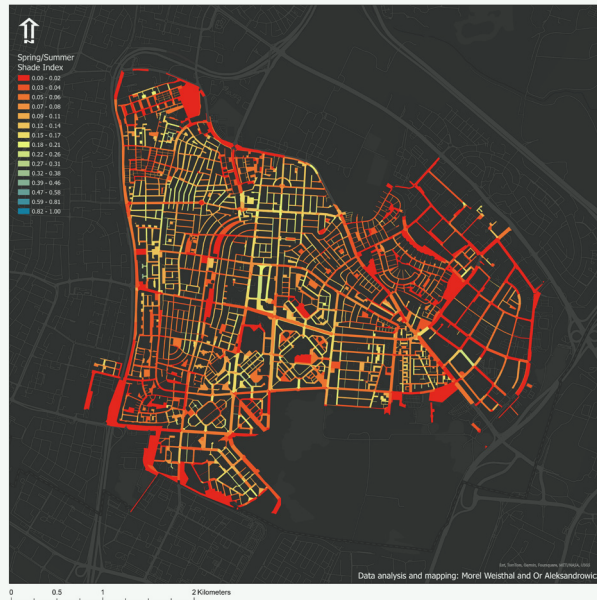
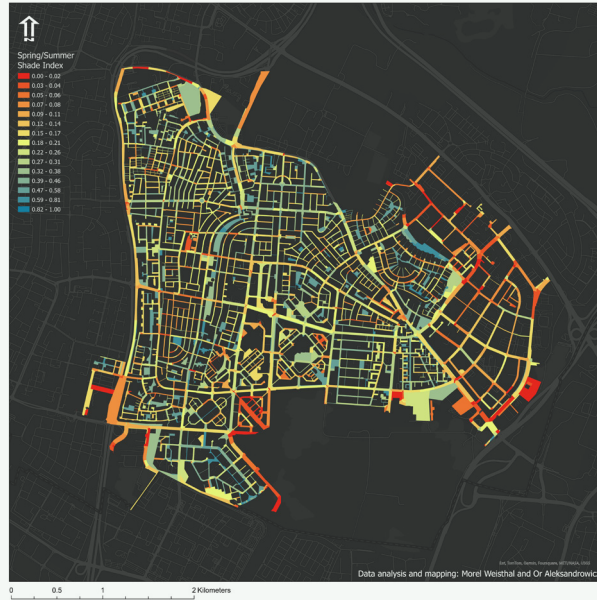
איור 1: מפת צל במקטעי רחובות ובשטחים ציבוריים פתוחים בעיר חולון על פי סולם הערכים של מדד ההצללה המרחבי (SI), הנע בין 0 (ללא צל) ל-1 (צל מלא) (מיפוי: מוראל ויסטל ואור אלכסנדרוביץ'). ניתן להבחין בהבדלים ניכרים ברמות ההצללה.



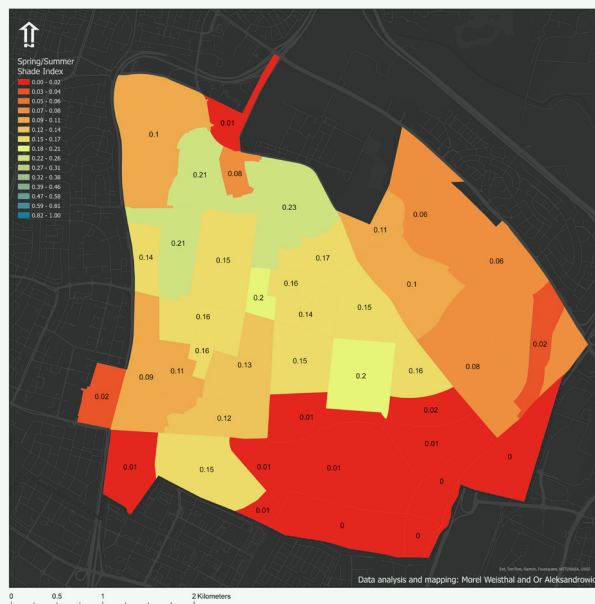
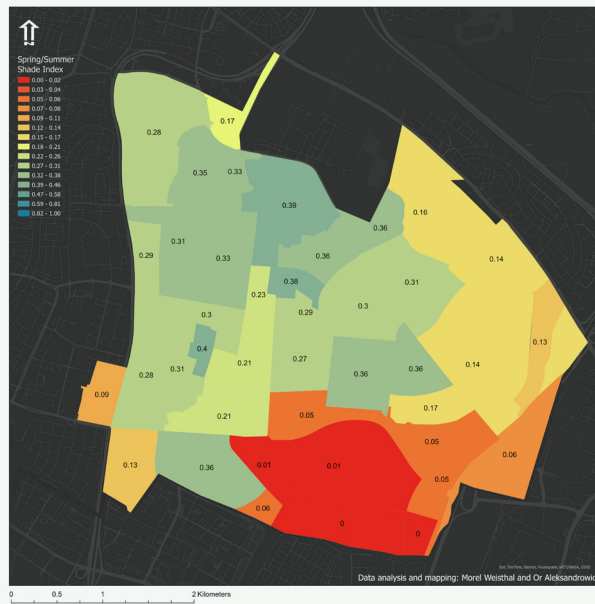
איור 2: מפת צל אזורית של מרחבים עירוניים בעיר חולון (מיפוי: מוראל ויסטל ואור אלכסנדרוביץ'). מפה זו מאפשרת להבחין בסביבות עירוניות שלמות ששוררים בהן תנאי הצללה משופרים באופן ממוצע על פי מדד ההצללה המרחבי (SI).



איור 3: שילוב בין מפת צל ברחובות ובשטחים ציבוריים פתוחים למפת צל אזורית בעיר חולון (מיפוי: מוראל ויסטל ואור אלכסנדרוביץ'). ניתן להבחין ברחובות או בשטחים חריגים לטובה או לרעה מבחינת רמת ההצללה ביחס לסביבתם.



איור 4: מפות צל ברחובות ובשטחים ציבוריים של חולון (מיפוי: מוראל ויסטל ואור אלכסנדרוביץ'). השוואה בין המצב הקיים כולל הצללה מעצים (למעלה) ומצב ייחוס בניכוי הצללה מעצים (למטה).



איור 5: מפות צל במרחבים עירוניים של חולון (מיפוי: מוראל ויסטל ואור אלכסנדרוביץ').
השוואה בין המצב הקיים כולל הצללה מעצים (למעלה) ומצב ייחוס בניכוי הצללה מעצים
(למטה).

תיעדוף פעולות באתרים הזקוקים לתוספת הצללה

השלב השני בקביעת אסטרטגיית הצללה עירונית הוא שלב תיעדוף פעולות ההתערבות. ניתוח הצללה כלל-עירוני באמצעות מפות הצל מאפשר להעריך בצורה השוואתית יתרונות או חסרונות מבחינת תנאי ההצללה שיש לאזורים מסוימים על פני אזורים אחרים, ולקבוע על פי הערכה זו אתרים להתערבות. בחינה השוואתית יכולה לסייע לא רק בהבנת ההיקף המרחבי של המחסור בהצללה, אלא גם באיתור רחובות או חלקי עיר שתנאי ההצללה בהם מוצלחים מאוד. מכאן גם אפשר להציע שני סוגים של התערבות עירונית במרחב לטובת הצללה: "עיבוי צל" באזורים שרמות ההצללה בהם נמוכות, ו"שימור צל", בעיקר באמצעות הימנעות מכריתה ותחזוקה מקיימת של עצים, באזורים שהתגלו בהם רמות יוצאות דופן לטובה של הצללה. האזורים המוצלחים במיוחד, הניתנים לאיתור מהיר באמצעות מפות הצל, יכולים גם לתת השראה לשיטות פעולה להוספת הצללה במקומות אחרים.

לצד הגדרת אתרי ההתערבות, העירייה נדרשת גם לתעדף את פעולות ההתערבות בהם ולהגדיר באילו אתרים דחוף יותר לפעול. אומנם, עירייה יכולה לבחור להסתמך באופן בלעדי על מדד ההצללה המרחבי ולסמן באופן גורף רחובות שרמות ההצללה בהם נמוכות מסף מסוים (לדוגמה, 0.2) כרחובות שאינם מוצלחים בצורה סבירה, ומשום כך מיועדים לעיבוי צל בעדיפות גבוהה. עם זאת, קביעת סף מספרי המבוסס רק על מדד ההצללה המרחבי לעיבוי או לשימור צל עלולה שלא להספיק לתיעדוף הפעולות העירוניות, משום שמספר מקטעי הרחובות שיוגדרו בשיטה

זו כאתרי התערבות עשוי להיות רב מאוד ולחרוג מהאמצעים העומדים לרשות העירייה. הורדת הסף כדי לצמצם את מספרי אתרי ההתערבות עלולה להביא לכך שמקטעי רחובות רבים ששוררים בהם תנאי הצללה גרועים מאוד, כלל לא יובאו בחשבון כמיועדים לעיבוי צל, גם אם הם ממוקמים במקומות מרכזיים בעיר. לכן, על העירייה לבחון הטמעת שיקולים נוספים בתהליך קביעת תיעדוף הפעולות, באופן שיאפשר לה לקבוע את סדר הפעולות ואת קצב ההוצאה לפועל של המיזמים בהתאם למשאבים המוקצים לנושא. אותם שיקולים נוספים אמורים לסייע לעירייה למקד את הפעולות באתרים שהשפעת הפעולות בהם תהיה ניכרת במיוחד (לדוגמה, רחוב מסחרי ראשי המושך כמות גדולה של הולכי רגל או שכונה שמתגוררת בה אוכלוסייה מבוגרת) מתוך כלל האתרים שרמות ההצללה בהם דומות.

47

הגדרת השיקולים הנוספים לקביעת תיעדוף פעולות ההצללה היא עניין ערכי, הנובע מהיכרות עם הצרכים העירוניים המקומיים. בשל השונות הרבה בתנאים המקומיים ובהעדפות התכנוניות בכל עיר, אנו סבורים שאין זה נכון להגדיר שיטה אחידה ומחייבת לבחירה בשיקולים שישפיעו על תיעדוף פעולות ההצללה. עם זאת, חשוב שבכל עיר המגבשת אסטרטגיית הצללה יתקיים דיון שיוביל לקביעת קריטריונים ברורים ומדידים לתיעדוף פעולות ההצללה, מעבר לרמת ההצללה המרחבית הניתנת לכימות באמצעות מדד ההצללה המרחבי (SI). קריטריונים אלה יכולים להתייחס להיבטים חברתיים, סביבתיים ותכנוניים, שאינם קשורים קשר ישיר לרמות ההצללה הקיימות במרחב, לדוגמה:

הליכתיות - מרחבים עירוניים שהעירייה מזהה בהם פוטנציאל להגברת

התנועה של הולכי הרגל או שמגיעים אליהם כבר הולכי רגל רבים, עשויים להיות מרחבים מועדפים לעיבוי צל או לשימור צל בשל הקשר ההדוק שבין חשיפה לקרינת שמש לעומס חום הפוגע בהולכי הרגל. לכן, התחשבות במידת ההליכתיות או במידת הקישוריות של רחובות ואזורים בעיר עשויה להבטיח שמפעולות ההצללה העתידיות ייהנה המספר הרב ביותר של משתמשי דרך לא-ממונעים.

פגיעות בריאותית - קשישים וילדים, לצד חולים במחלות כרוניות שונות, משתייכים לאוכלוסיות המוכרות כרגישות או פגיעות במיוחד לעומסי חום. שיפור תנאי ההצללה בסביבת המגורים היום-יומית של אזורים שיש בהם ריכוז גבוה של אוכלוסיות אלה עשוי למנוע פגיעות בריאותיות נקודתיות או מתמשכות או למנוע את החרפת הפגיעה. לכן, תיעדוף פעולות ההצללה על פי איתור ריכוזים חריגים של אוכלוסיות פגיעות מבחינה בריאותית עשוי להביא הקלה מיוחדת למי שההצללה היא צורך חיוני בעבורו.

פגיעות כלכלית - אוכלוסיות במעמד חברתי-כלכלי נמוך הן אוכלוסיות הנסמכות יותר מאחרות על תנועה רגלית ועל תחבורה ציבורית, שהגישה אליה היא כמעט תמיד בהליכה. נוסף על כך, האוכלוסיות האלה עלולות להיות פגיעות יותר לתנאים חמים עקב מחסור באמצעי קירור יעילים במקומות מגוריהן. לכן, תיעדוף פעולה לקידום הצללה בשכונות שהאוכלוסייה בהן מעוטת אמצעים כלכליים עשוי לשרת מספר רב יותר של תושבים שאין בידם ברירות נוחות יותר מאשר תנועה רגלית ושהייה בשטחים פתוחים.

התחדשות עירונית - לחתך הרחוב ולצפיפות הבינוי יכולה להיות תרומה משמעותית להצללה המתקבלת ברחובות. לכן, ניתן לתת עדיפות לתכנון הצללה באזורים המיועדים להתחדשות עירונית, כך שהצללה באזורים האלה תהיה מבוססת במידה רבה על מורפולוגיית הבינוי, לצד נטיעת עצים בכמות מספקת. מנגד, אזורים שהתחדשות העירונית נמצאת בהם בעיצומה, עשויים להיות אזורים שלא תינתן בהם עדיפות לפעולות עיבוי הצללה בטרם יושלם חלק ניכר מפעולות הבינוי שיוצרות מצב חדש.

תכנון הצללה מפורט: מדד זמינות ההצללה

לאחר איתור הרחובות להתערבות לטובת עיבוי הצללה, השלב השלישי בקביעת אסטרטגיית הצללה עירונית צריך להיות תכנון ההצללה המפורט. כדי שיהיה אפקטיבי, תכנון ההצללה צריך לעמוד ביעדים כמותיים המנוסחים באמצעות מדד אחיד המתאר את מידת קיומם של תנאי הצללה מספקים במהלך שעות היום בשיא הקיץ. הצורך בקביעת יעדי הצללה על פי מדד כמותי אחיד נובע מהקושי הקיים כיום לבצע הערכה שיטתית של איכות ההצללה, להשוות את איכות ההצללה בתרחישי תכנון שונים ולהבטיח שהפעולות העירוניות לעיבוי הצללה יהיו אפקטיביות ויעילות בעת ובעונה אחת. מדד זמינות ההצללה

(SAI - Shade Availability Index),²⁰ המדד שאנו מציגים בעבודה זו כאמצעי לקביעת יעדי הצללה נורמטיביים, הוא מדד קל יחסית לחישוב, המאפשר לכמת את מידת ההצללה במדרכות או בשבילי הליכה בשלב התכנון המפורט, להעריך את איכותה היחסית של ההצללה ולבחון את השפעתם של שינויים בתכנון על מידת השיפור במצב ההצללה. בו-בזמן, הוא גם מתגבר על נקודות התורפה בשיטות הקיימות להערכת ההצללה, שסקרנו בראשית המסמך.

סקירת השיטות הקיימות כיום בארץ או במדינות אחרות להערכת הצללה בסביבות עירוניות העלתה כי קביעת יעדי ההצללה נעשית במספר קטן של מקומות, וגם זאת כמעט תמיד על בסיס מדדים גאומטריים פשוטים (לדוגמה: מדד כיסוי חופת עצים), שברובם המכריע אינם מביאים בחשבון את ההצללה המתקבלת ממבנים, את הזמנים שההצללה נחוצה בהם ביותר, ואת השוני בפריסת ההצללה המתקבלת בשעות שונות ובמועדים שונים. המדדים האלה בעייתיים, משום שהם מתקשים להציג תמונה מציאותית של מצב ההצללה במרחב העירוני, ומתעלמים מהבדלים פיזיים רבים שיש להם השפעה ישירה על תנאי ההצללה במרחב. נוסף על כך, לעיתים המדדים האלה קובעים רמות סף גבוהות לעמידה ביעדי הצללה, באופן שאינו מייצג תרחישי תכנון ריאליים מבחינה פיזית או כלכלית. מדד זמינות ההצללה נותן לכך מענה משום שהוא מביא בחשבון את ההצללה המתקבלת ממבנים ומעצים, מכמת את רמת ההצללה לפי שטח כיסוי הצל במפלס הקרקע

20 Aleksandrowicz, O., & Ozery, E. (2023). A parametric tool for outdoor shade design: Harnessing quantitative indices and visual feedback for effective and efficient climatic design of streets. In M. Turrin, C. Andriotis, & A. Rafiee (Eds). *Computer-Aided Architectural Design. INTERCONNECTIONS: Co-computing Beyond Boundaries* (pp. 302-316). Springer Nature Switzerland.

לאורך מספר רב של שעות בשיא הקיץ, ומבוסס על בדיקה שיטתית נרחבת של אפשרויות העמידה בתנאי הסף שהמדד קובע בתרחישי תכנון סבירים.

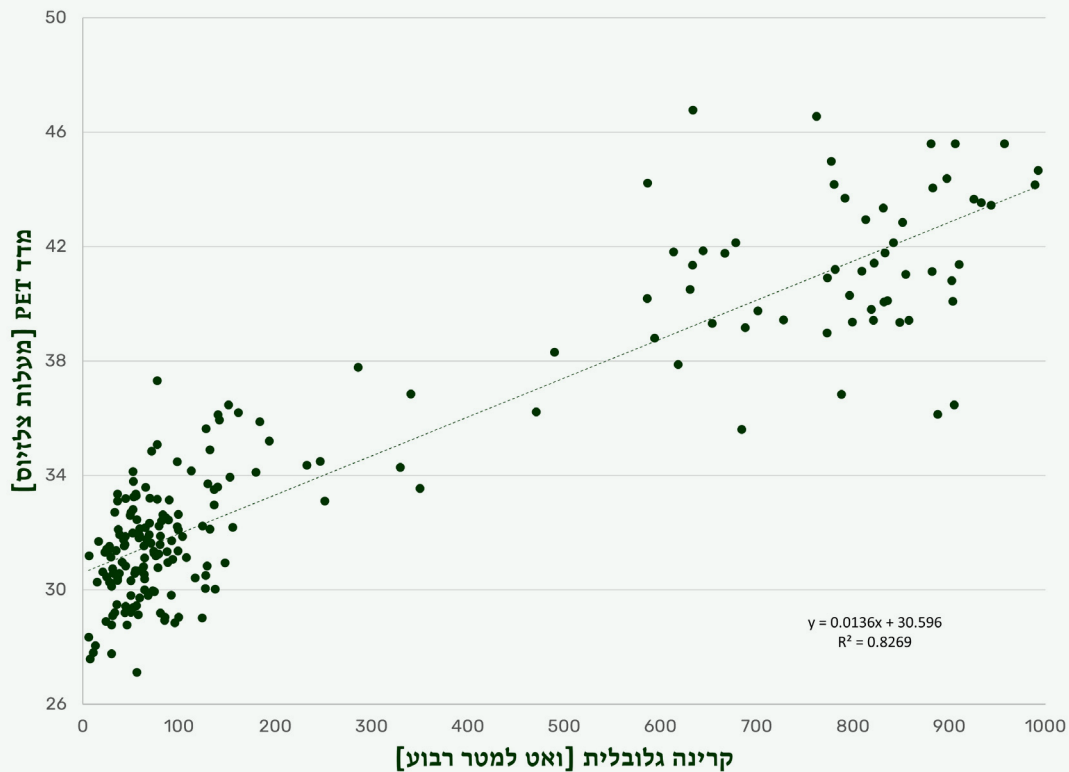
מדד זמינות ההצללה מבוסס על חישוב גאומטרי של שטח היטל הצל על משטח ייחוס, אך ללא כימות מדויק של השפעת ההצללה על הפחתה בעומס החום שחש האדם. הבחירה להימנע משקלול הנוחות התרמית בחישוב מדד ההצללה נובעת, בראש ובראשונה, ממורכבות החישוב המדויק של עוצמת עומס החום, התלויה במאפיינים פיזיים ייחודיים לכל סביבה עירונית, ובהשפעתם על המשתנים האקלימיים - טמפרטורת האוויר, הלחות היחסית, מהירות הרוח ומאזן הקרינה על גוף האדם - הנכללים בחישוב עומס החום. מאחר שאין בידינו כלים חישוביים אמינים ומהירים לחישוב מדד נוחות תרמית לצרכים תכנוניים שונים, הערכה שיטתית של עומס החום במרחב העירוני לטובת תכנון עירוני צריכה להיעשות על ידי פיתוח שיטות חישוב יעילות יותר, גם כאשר כימות עומס החום מדויק פחות. בתנאי האקלים השוררים בישראל בקיץ, הדרך לעשות זאת היא בראש ובראשונה על ידי התמקדות בהצללה, משום שקיומה של הצללה מספקת יכול להבטיח במידה גבוהה של ודאות הפחתה משמעותית בעומס החום. מערך מדידות נרחב שערכנו בשנים 2020 ו-2021 בתל אביב (207 נקודות מדידה) ובכפר סבא (100 נקודות מדידה) תומך בתובנה זו. המדידות העלו כי בעונה החמה בישראל יש להצללה השפעה מכרעת על הורדה משמעותית בעומס החום. עם זאת, חשוב להדגיש כי מהמדידות עלה עוד כי הצללה אינה יכולה להבטיח נוחות תרמית מוחלטת בקיץ: באף אחת מהנקודות המוצלות שמדדנו בקיץ (146 נקודות בתל אביב ו-73 נקודות בכפר סבא) לא התקיים

מצב של נוחות תרמית מלאה, וברובן המכריע שרר עומס חום מתון עד בינוני (איור 6 ואיור 7).²¹

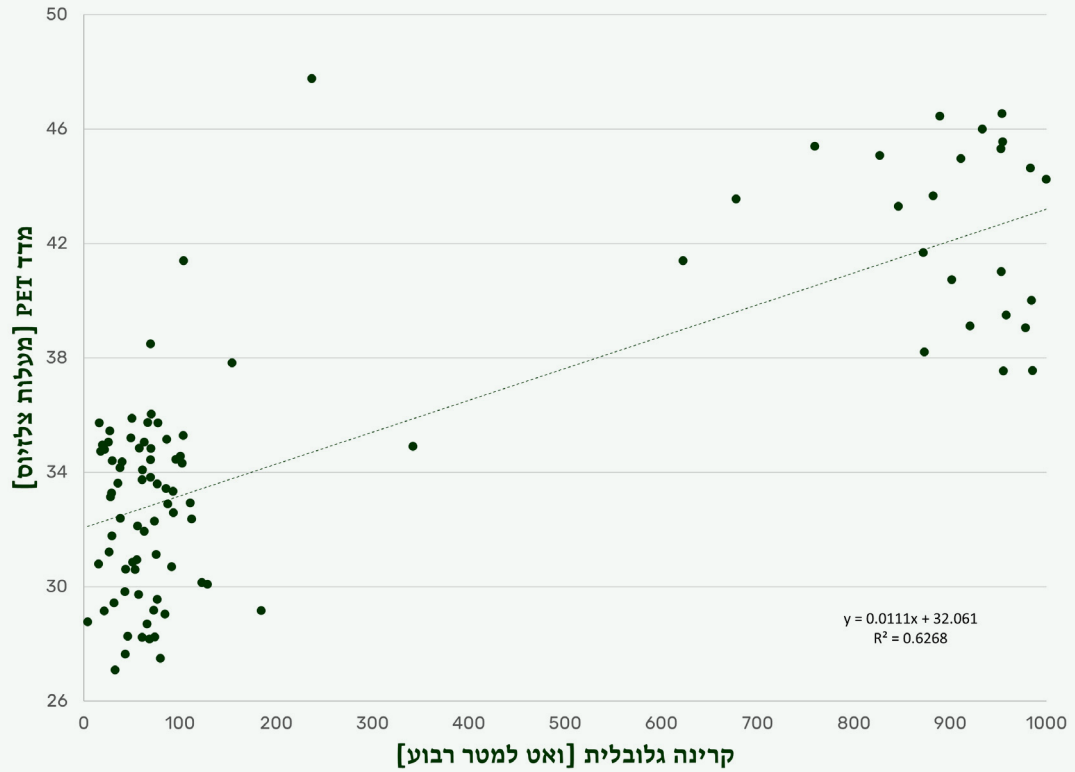
המדידות שערכנו העלו עוד כי עוצמת השפעתה החיובית של ההצללה על הקלה בעומס החום חורגת בהרבה מהקלה בעומס החום שעשויה להיגרם מירידה קלה בטמפרטורת האוויר או בלחות היחסית או מעלייה במהירות הרוח.²² בתנאים השוררים בקיץ בישראל, שיפור במשתנים האקלימיים האלה מוגבל בעוצמתו, ואינו מתקרב לעוצמת ההקלה בעומס החום שיוצרת הצללה. הדברים היו נכונים במיוחד כאשר מדדנו שתי נקודות סמוכות במרחב הפתוח. שלוש סיבות עיקריות גורמות לכך: ראשית, טמפרטורת האוויר בעיר בקיץ בישראל גבוהה יחסית, ובשילוב עם לחות יחסית גבוהה בחלק מאזורי הארץ נוצרים תנאים בסיסיים של עומס חום גם ללא השפעת קרינת השמש; שנית, תנועת האוויר גורמת להשוואה כמעט מלאה בטמפרטורת האוויר בין האזורים החשופים לקרינת השמש לאזורים מוצלים סמוכים ברחובות עירוניים; שלישית, ברוב המקרים הסביבה העירונית גורמת לבלימה משמעותית של מהירות הרוח, ומקטינה כך באופן משמעותי את יכולתה של הרוח להביא להקלה בעומס החום.

21 קביעת דרגת עומס החום לפי מדד PET (Physiological Equivalent Temperature) נעשתה על פי סולם הערכים המותאם לתנאי האקלים בישראל, כפי שנקבע ב: Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37(1), 1-10.

22 Aleksandrowicz, O., & Pearlmutter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588; Middel, A., Alkhaled, S., Schneider, F. A., Hagen, B., & Coseo, P. (2021). 50 grades of shade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(9): E1805-E1820.



איור 6: היחס בין קרינה גלובלית לנוחות תרמית לפי מדד PET כפי שעלה במדידות שערכנו בתל אביב בין 5.7.2020 ל-1.9.2020 (207 נקודות מדידה). באף מדידה לא התקיים מצב של נוחות תרמית מלאה (PET מתחת ל-26 מעלות צלזיוס). כמעט בכל אחת מהמדידות בצל נמדד עומס חום (PET מעל 28 מעלות צלזיוס), גם במקרים שהייתה בהם הצללה איכותית (קרינה גלובלית של פחות מ-100 ואט למ"ר).



איור 7: היחס בין קרינה גלובלית לנוחות תרמית לפי מדד PET, כפי שעלה במדידות שערכנו בכפר סבא בין 15.6.2021 ל-11.8.2021 (100 נקודות מדידה). גם מערך מדידות זה העלה ממצאים דומים ביחס לחוסר האפשרות הריאלית להבטיח נוחות תרמית מוחלטת בצל במהלך היום בקיץ.

מערך המדידות שקיימנו העלה, אם כן, כי בתנאי האקלים השוררים בקיץ בישראל די לבחון אם בסביבה מסוימת מתקיימת הצללה מספקת כדי להסיק מכך שעומס החום שישרור בה יהיה נמוך במידה משמעותית בהשוואה לסביבה דומה במאפייניה הפיזיים שאינה מוצלת. בה בעת, תוצאות המדידות העלו עוד כי גזירת יעדי הצללה בישראל אינה יכולה להתבסס על שאיפה להשיג נוחות תרמית מלאה בקיץ במישור החוף בישראל, שהיא מצב בלתי ריאלי בעליל לנוכח תוצאות המדידות שערכנו, אלא צריכה להתמקד במיטוב בלימת הפגיעה של קרינת שמש ישירה במרחבי ההליכה והשהייה העירוניים.

55

בגיבוש של כל מדד הצללה חשוב לתת מענה מדויק וברור ככל האפשר לשלוש שאלות עקרוניות, שהתשובה עליהן גם עשויה להעיד על מידת הקשר שבין המדד הכמותי לאיכות הפחתת עומס החום בתקופה החמה בשל מניעת החשיפה לשמש: מה הוא שטח הייחוס שעבורו מחשבים את שיעור הצללה; מה הוא זמן הייחוס שעבורו מחשבים את שיעור ההצללה; מתי אפשר לקבוע כי נקודה במרחב נמצאת בהצללה. מדד זמינות ההצללה נותן מענה לשלוש השאלות האלה באופן הבא:

- שטח הייחוס העיקרי שעבורו מחושב מדד זמינות ההצללה הוא שטחה הכולל של מדרכה במקטע רחוב נתון. מקטע רחוב מוגדר כקטע רחוב התחום בין שני צמתים. במרחב זה קיימות לרוב שתי מדרכות, משני צדדיו של כביש (או מִיִסְעָה), הגם שקיימים רחובות (לדוגמה, מדרחובים) ששטח המדרכה בהם שווה לשטח זכות הדרך. הסיבה לבחירה בשטח מדרכה במקטע רחוב כיחידת הייחוס המרחבית שעבורה מחושב המדד נובעת מן ההבנה, כי ההצללה חיונית בייחוד

עבור משתמשי דרך לא-ממונעים, וכי חשוב לקיים רצף הצללה לכל אורך המדרכה במקטע נתון כדי להבטיח הפחתה משמעותית בעומס החום בזמן הליכה.

- זמן הייחוס לחישוב ההצללה הוא מרבית שעות האור ביום קיץ טיפוסי. במקרה של ישראל, קבענו את זמן הייחוס לשעות 8:00 עד 17:00 (שעון קיץ) ב-6 באוגוסט, שהוא יום האמצע בין היום הארוך ביותר בשנה (21 ביוני) ליום השוויון הסתווי (22 בספטמבר), ומייצג גם את שיא עומס החום השנתי הנובע מעוצמתה של טמפרטורת האוויר בשעות היום.²³

- במדד זה, נקודה במרחב נמצאת בהצללה כאשר קרינת שמש ישירה אינה פוגעת בה במפלס הקרקע (להבדיל מגובה הראש או מרכז הכובד של גוף האדם). המדד אינו מביא בחשבון את ההשפעה של קרינה מוחזרת, הן משום שמלבד מקרים קיצוניים עומס החום שנגרם מהקרינה המוחזרת זניח יחסית לעומס החום שגורמת קרינת שמש ישירה, הן בשל הקושי לאמוד במדויק את מקדמי ההחזרה של כל המשטחים במרחב הרחוב.

על בסיס ההגדרות האלה הגדרנו את **מדד זמינות ההצללה** המתאר בסולם שבין 0 ל-1 את השיעור היחסי של הזמן ששטח הייחוס (מדרכה) נמצא במצב מספק של הצללה בכל משך זמן הייחוס (8:00 עד 17:00 ב-6 באוגוסט). השאלה מה הוא "מצב מספק" של הצללה היא שאלה

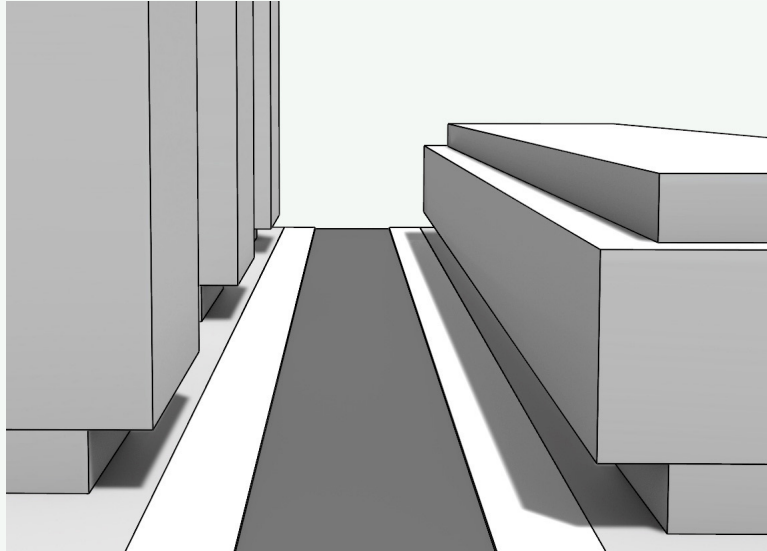
²³ הסיבה לכך היא שטמפרטורת האוויר נגזרת ממספר גורמים שהחשוב בהם הוא קיבול החום של כדור הארץ. פני השטח של כדור הארץ מתחממים מקרינת השמש ופולטים אל האטמוספירה חום בצורת קרינה בתהליך איטי שאורך לרוב בין 4 ל-6 שבועות. משום כך הימים החמים ביותר בישראל הם הימים שבתחילת אוגוסט, כחודש וחצי לאחר היממה שבה כמות הקרינה הפוגעת בפני השטח היא הגבוהה ביותר. ראו: דגן, ש. (2010). מדוע אוגוסט הוא החודש החם בשנה? מכון דוידסון, הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

נורמטיבית, ואין לה תשובה מדעית חד-משמעית. כאן בחרנו לקבוע כי שטח ייחוס (לדוגמה, מדרכה בודדת) יימצא במצב מספק של הצללה ברגע נתון אם לפחות 50% משטחו נמצאים בהצללה, בהנחה שהבינוי ואמצעי ההצללה ברחוב מפוזרים לאורכו פחות או יותר במרווחים קבועים. אנו סבורים שכאשר מחצית משטחה של מדרכה נמצא בצל בתנאים אלה, מתאפשרת בחירה שוויונית של משתמשי הדרך בין תנועה בצל לבין תנועה בחשיפה מלאה לקרינת השמש במקרה של הצללה רציפה (איור 8). מנגד, כאשר לפחות 50% משטח המדרכה נמצאים בהצללה לסירוגין (איור 9), מתקיים נתיב המשכי של הליכה לסירוגין בצל לאורך כל מסלול ההליכה. חשוב להדגיש כי במקרים שחתך הרחוב משתנה באופן מהותי לאורכו של מקטע רחוב בודד, יש לחשב את מדד זמינות ההצללה בנפרד עבור כל אחד מחלקי מקטע הרחוב שחתך הרחוב בהם אחיד.

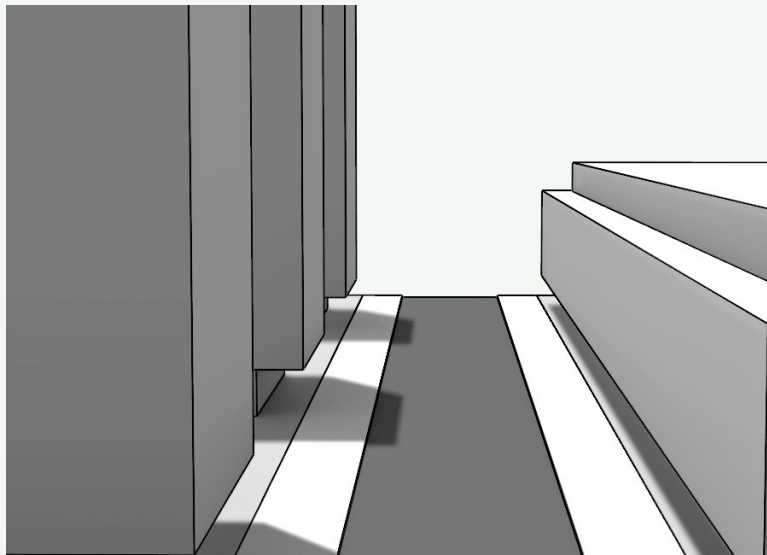
57

מובן, שניתן היה מבחינה נורמטיבית להציב יעד שאפתני יותר (לדוגמה, 75% משטח המדרכה או אפילו כל שטח המדרכה) כנקודת מוצא לחישוב מדד זמינות ההצללה. אולם השאלה שיש לשאול היא עד כמה יעד שאפתני מעין זה ניתן למימוש בתנאי תכנון ריאליים, ועד כמה הוא עשוי לשפר באופן מהותי את האפשרות הסבירה ללכת בצל. אנו סבורים שקביעת הצללה של 50% משטח המדרכה כ"מצב מספק" של הצללה נותנת מענה מאוזן לאתגר התכנוני של הצללת מרחב ההליכה, משום ששיעור זה מבטיח קיום של שטח הצללה מספק להליכה רציפה במדרכה שרוחבה כשלושה מטר ומעלה.

כדי לחשב את מדד זמינות ההצללה של מדרכה, יש לבדוק בכל אחת






איור 8: דוגמה להצללה רציפה בשיעור העולה על 50% משטח המדרכה במדרכה הימנית.



איור 9: דוגמה להצללה לא רציפה בשיעור העולה על 50% משטח המדרכה במדרכה השמאלית.

מהשעות העגולות שבין 8:00 ל-17:00 (ובסך הכול בעשר נקודות זמן) ב-6 באוגוסט אם לפחות 50% משטח המדרכה נמצאים בהצללה. מדד זמינות ההצללה מתאר את היחס בין מספר השעות העגולות שהמדרכה נמצאת במצב הצללה מספק (הצללה ב-50% מהשטח ומעלה) לבין המספר הכולל של השעות העגולות בזמן הייחוס (לפי ההגדרות לעיל, 10 שעות). ככל שהצללה ב-50% לפחות משטח המדרכה מתקיימת ביותר שעות עגולות במהלך זמן הייחוס, כך מדד זמינות ההצללה גבוה יותר וקרוב יותר ל-1. לדוגמה, אם יותר מ-50% משטח המדרכה נמצאים בהצללה ב-6 שעות עגולות במהלך זמן הייחוס, מדד זמינות ההצללה של המדרכה יהיה 0.6.

יתרון השימוש במדד זמינות ההצללה הוא בפישוט חישוב ההצללה לחישוב גאומטרי וביכולת לאמץ אותו כמדד נורמטיבי קל להבנה, משום שהוא מבטא בעיקר את שיעור הזמן לאורך יום קיץ ששוררים בו תנאי הצללה נאותים, ללא צורך בחישובים מורכבים הנוגעים לכימות השפעת קרינת השמש על עוצמת עומס החום. לדוגמה, קל יחסית להבין כי ערך מדד זמינות הצללה בשיעור של 0.3 אינו מביח תנאי הצללה סבירים, משום שמשמעותו היא שב-70% מזמן השימוש העיקרי במדרכה במהלך שעות היום אין בה שטח מוצל במידה מספקת. מכאן גם נובע כי ניתן לקבוע סולם נורמטיבי של רמות זמינות הצללה רצויות על סמך כימות שיעור הזמן שמתקיימים במדרכה תנאי הצללה מספקים. עבור תנאי הארץ, אנו מציעים לקבוע שלוש דרגות הצללה כיעדים נורמטיביים רצויים בתכנון עירוני מוכוון הצללה. שלוש הדרגות הן:

הצללה מתקבלת על הדעת	הצללה טובה מאוד	הצללה מצוינת
ערך מדד זמינות הצללה של 0.5 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.7 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.9 ומעלה
		

קביעת שלוש דרגות של זמינות הצללה מאפשרת לקבוע יעדים הדרגתיים לעיבוי צל על בסיס יכולות עכשוויות ועתידיות. לדוגמה, העירייה יכולה לקבוע כי רחובות מסוימים צריכים להגיע למצב שתושג בהם הצללה מתקבלת על הדעת בתוך חמש שנים, והצללה טובה מאוד - בתוך עשר שנים. כדי לעמוד ביעדים אלה, העירייה תנקוט פעולות מתמשכות שיכללו גם מעקב אחר התקדמות מצב ההצללה בטווחי הזמן השונים. עם זאת, מתוך הכרה במגבלות המעשיות ליישום פעולות לעיבוי צל, חשוב שהבחירה בדרגת זמינות ההצללה הרצויה תיעשה בהתאם לשיקולים מקומיים וליכולות העומדות לרשות הגורמים המתכננים, ולאחר בדיקה ראשונית שתראה במה כרוכה עמידה ביעד מסוים. בפרקים הבאים נרחיב על האופן שהחלטות עיצוביות עשויות להשפיע על רמת זמינות ההצללה לפי המדד שהוצג כאן, ונראה עוד כי עמידה גם בדרגות הגבוהות של המדד אפשרית כמעט תמיד בתכנון נכון ובשילוב מדויק ויעיל בין הצללה מבניינים להצללה מעצים או מאמצעי הצללה בנויים אחרים (פרגולות, סככות וכיו"ב).

מדד זמינות ההצללה מחושב בכל מדרכה בנפרד, ושיטת חישוב זו מאפשרת גמישות בקביעת יעדי הצללה שאינם זהים בכל אחת מהמדרכות או רצועות ההליכה ברחוב. לדוגמה, ניתן לכאורה לקבוע

כיעד תכנוני כי די שאחת משתי מדרכות ברחוב תעמוד בסף הצללה מסוים כדי שהרחוב כולו ייחשב כרחוב מוצל. באותו אופן, אפשר לכאורה לקבוע כי די ששדרת הליכה במרכזו של רחוב שיש בו גם מדרכות בכל אחת מדפנותיו תעמוד בסף הצללה מסוים. עם זאת, אנו סבורים כי יעדים חלקיים כאלה עלולים להחטיא את המטרה העיקרית שלשמה נוצר המדד, והיא עידוד תנועה לא-מנועית במרחב הרחוב לכל אורך שעות היום, משום שהם מאלצים את משתמשי הדרך לשנות את נתיב תנועתם הקצר ביותר בחיפוש אחר צל. לכן, המלצתנו היא כי בקביעת יעדי הצללה, יש להבטיח כי כל נתיבי ההליכה במקטע רחוב מסוים יעמדו לפחות בסף ההצללה הנמוך ביותר (הצללה מתקבלת על הדעת, ערך מדד זמינות הצללה של 0.5 ומעלה).

דוגמה לשימוש במדד זמינות ההצללה בתכנון

פרק זה מציג דוגמת תכנון הצללה בהתאם ליעדים שפורטו לעיל באמצעות קוד גראסהופר בשם Kikayon שפיתחו אור אלכסנדרוביץ' ועזרא עוזרי בעבודה שמימנה יוזמת ישראל 100 (להסבר מפורט, ראו נספח ב').²⁴ במקרה זה, אורכו של מקטע הרחוב המתוכנן הוא 200 מטר, רוחב כל אחת ממדרכותיו הוא 6.5 מטר, ובמרכזו נמצאת שדרת הליכה

24 Aleksandrowicz, O., & Ozery, E. (2023). A parametric tool for outdoor shade design: Harnessing quantitative indices and visual feedback for effective and efficient climatic design of streets. In M. Turrin, C. Andriotis, & A. Rafiee (Eds). *Computer-Aided Architectural Design. INTERCONNECTIONS: Co-computing Beyond Boundaries* (pp. 302-316). Springer Nature Switzerland; <https://israel100.org/project/1891>.

ברוחב 15 מטר. הרחוב ניצב על ציר מזרח-מערב במדויק, ופירושו של דבר שתרומת המבנים להצללה נמוכה. בצד הדרומי של הרחוב ניצב מבנה רציף בגובה 15 מטר, ובצידו הצפוני שלושה בניינים שגובהם 36 מטר, רוחב החזית שלהם 34 מטר, והמרחק הצידי בין כל אחד מהם הוא 32 מטר. בהתאם לתכנון המקורי של הרחוב, לא נטועים בו עצים. חישוב מדד זמינות ההצללה מעלה כי מצב ההצללה במדרכות ובשדרה גרוע מאוד (איור 10): בשדרה לא שורר מצב מספק של הצללה באף שעה משעות זמן הייחוס, ובכל מדרכה מתקיים מצב מספק של הצללה רק בשעה אחת מתוך עשר.

פעולת התכנון הראשונה נוגעת לתכנון הצללה בשדרה. לצורך זה מתוכננת נטיעה של שתי שורות עצים שמרחק הנטיעה ביניהם הוא 12.5 מטר. עצי הצל המתוכננים לנטיעה הם עצי צאלון נאה, וחישוב ההצללה נעשה ביחס למצבם עשר שנים לאחר הנטיעה, כאשר קוטר נוף העץ צפוי להיות 8 מטר. במצב זה, מדד זמינות ההצללה בשדרה מזנק מ-0 ל-1 (איור 11). באשר למדרכות, תחילה נבדק תרחיש נטיעה של עצי הצאלון במרווחים של 20 מטר בכל אחת מהמדרכות. במצב זה (איור 12) המדרכה הדרומית זוכה לתנאי הצללה מצוינים (ערך מדד זמינות הצללה 1.0), ואילו המדרכה הצפונית מוצלת באופן מתקבל על הדעת (ערך מדד זמינות הצללה 0.6). עם זאת, הקטנת מרווחי הנטיעה במדרכה הצפונית ל-12.5 מטר מביאה גם את המדרכה הזאת לזמינות הצללה בשיעור הגבוה ביותר (איור 13).

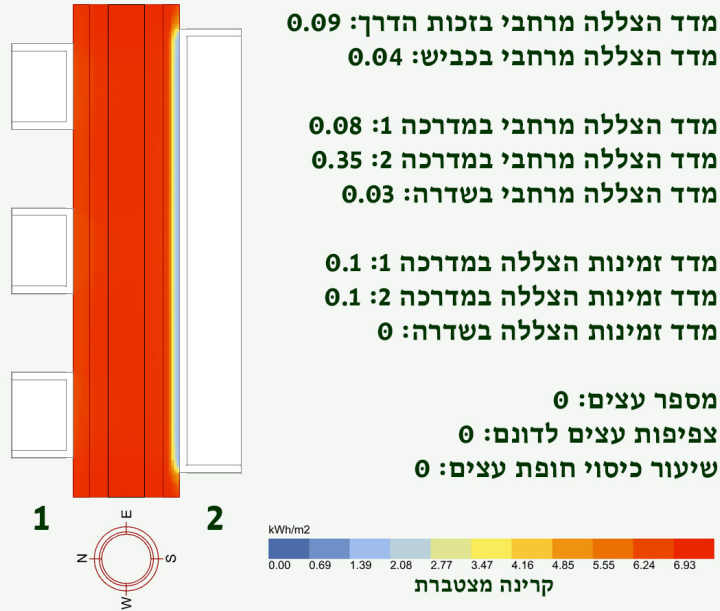
אף שלכאורה תכנון ההצללה באופן זה הניב פתרון מצוין, בפועל מדובר בפתרון שצפוי לבוא לידי ביטוי מלא רק כעשור לאחר יישומו בשל קצב צימוח העצים. לכן, חשוב לבדוק, עבור דפוס זה של נטיעת עצים, מה מצב ההצללה אחרי חמש שנות צימוח. בטווח זמנים זה עצי הצאלון

צפויים לפתח נוף בקוטר 5 מטר בלבד. במצב זה מדד זמינות ההצללה במדרכה הצפונית ובשדרה יהיה נמוך מאוד, ויגיע לרמה מתקבלת על הדעת, אך לא יותר מכך, במדרכה הדרומית (איור 14). כדי להבטיח הצללה מצוינת ברחוב גם לאחר חמש שנים, נדרש, אם כן, שימוש במספר גדול בהרבה של עצים.

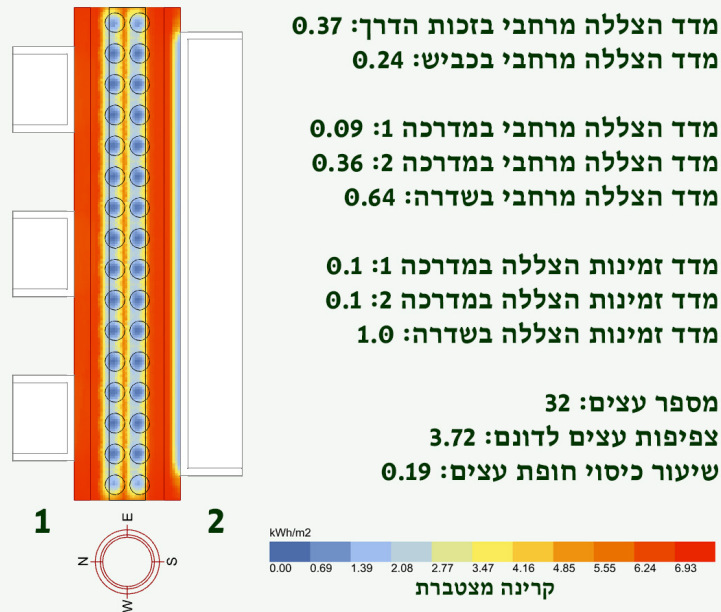
בתרחיש ציפוף העצים שבחנו, מרחקי הנטיעה במדרכה הדרומית הם כל 10 מטר, ובשדרה ובמדרכה הצפונית כל כ-6 מטר. במצב זה, בשתי המדרכות מגיע מדד זמינות ההצללה לרף המרבי (1.0), ואילו רמת ההצללה בשדרה מצליחה לטפס עד למצב של הצללה מתקבלת על הדעת (איור 15). ציפוף נוסף של מספר העצים בשדרה, כך שמרחק הנטיעה בין העצים יהיה 5 מטר, מביא גם את רמת ההצללה בשדרה לרף המרבי (איור 16). כדאי לשים לב לכך שמצב זה מושג גם כאשר אחוז כיסוי חופת העצים ברחוב נמוך יחסית (30%).

63

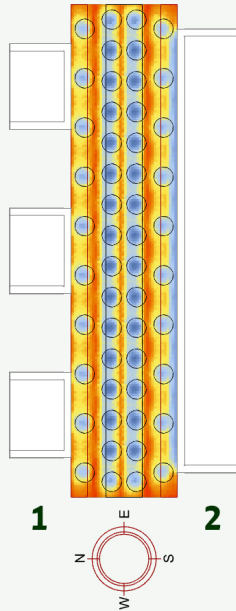
לאחר השלמת חישוב רמות ההצללה בתרחישי התכנון השונים עומדים בפני המתכננים מספר פתרונות אפשריים לשיפור משמעותי בהצללה ברחוב באמצעות עצים. השוני בין הפתרונות אינו נוגע רק לרמות ההצללה שניתן להשיג באמצעות עצים, אלא גם למועד השינוי המשמעותי בתנאי ההצללה ברחוב. הבדל נוסף ומשמעותי הוא מספר העצים שנטיעתם נדרשת בכל אחד מהפתרונות התכנוניים: מספר זה נע בין 56 ל-132 עצים. ההחלטה באיזה תרחיש תכנוני לבחור מבוססת, אומנם, על כימות רמות ההצללה באמצעות מדד זמינות ההצללה, אולם חייבת לערב שיקולים נוספים הנוגעים למשאבים העומדים לרשות גורמי הביצוע וליעדים תכנוניים וערכיים שאינם נוגעים ישירות ליכולת המעשית לנטוע העצים.



איור 10: מצב ההצללה ברחוב במצבו הראשוני, ללא הוספת עצי צל.



איור 11: מצב ההצללה בשדרה לאחר תוספת עצים.



מדד הצללה מרחבי בזכות הדרך: 0.53
 מדד הצללה מרחבי בכביש: 0.40

מדד הצללה מרחבי במדרכה 1: 0.50
 מדד הצללה מרחבי במדרכה 2: 0.63
 מדד הצללה מרחבי בשדרה: 0.65

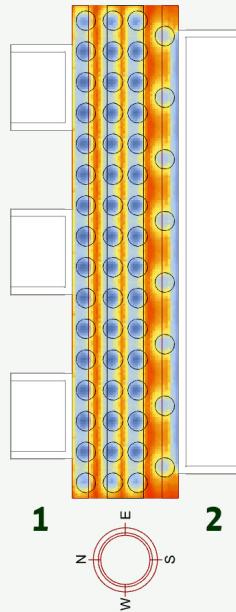
מדד זמינות הצללה במדרכה 1: 0.6
 מדד זמינות הצללה במדרכה 2: 1.0
 מדד זמינות הצללה בשדרה: 1.0

מספר עצים: 52
 צפיפות עצים לדונם: 6.05
 שיעור כיסוי חופת עצים: 0.30



איור 12: מצב ההצללה במדרכות לאחר תוספת עצים.

65



מדד הצללה מרחבי בזכות הדרך: 0.56
 מדד הצללה מרחבי בכביש: 0.41

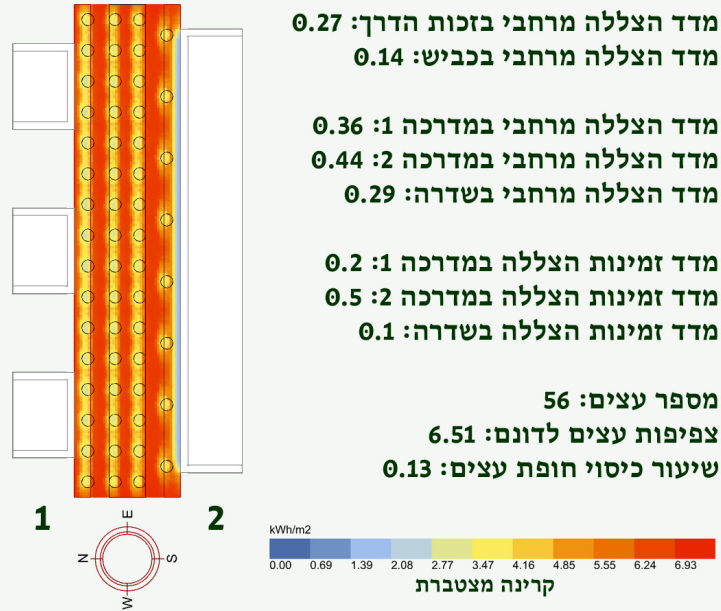
מדד הצללה מרחבי במדרכה 1: 0.72
 מדד הצללה מרחבי במדרכה 2: 0.58
 מדד הצללה מרחבי בשדרה: 0.65

מדד זמינות הצללה במדרכה 1: 1.0
 מדד זמינות הצללה במדרכה 2: 1.0
 מדד זמינות הצללה בשדרה: 1.0

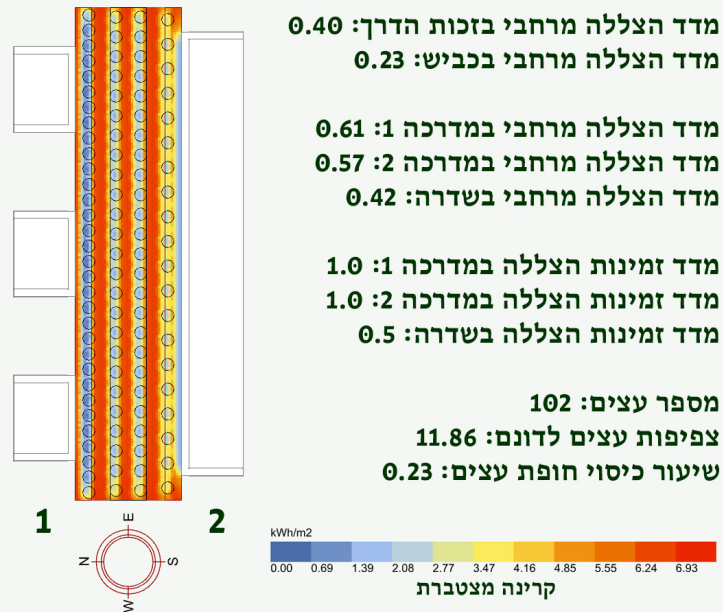
מספר עצים: 56
 צפיפות עצים לדונם: 6.51
 שיעור כיסוי חופת עצים: 0.33



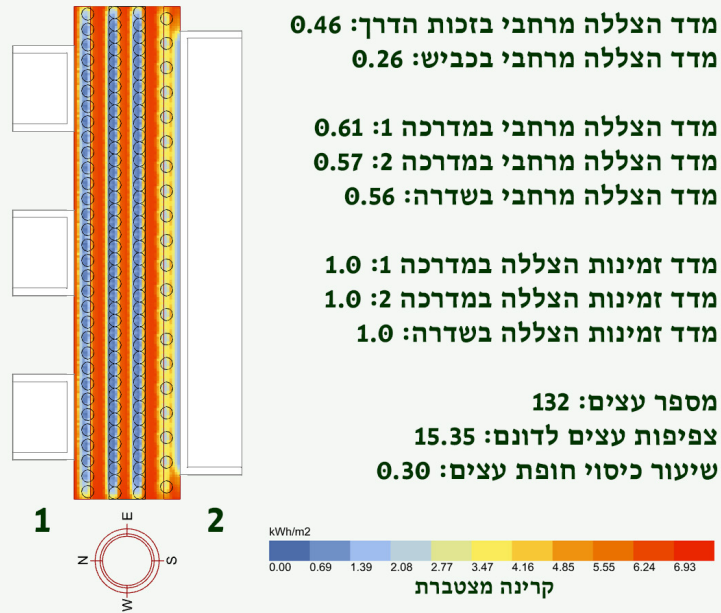
איור 13: שיפור מצב ההצללה במדרכה הצפונית באמצעות תוספת עצי צל.



איור 14: מצב ההצללה במדרכות ובשדרה אחרי חמש שנות צימוח.



איור 15: מצב ההצללה במדרכות ובשדרה אחרי חמש שנות צימוח לאחר תוספת משמעותית של עצים.



איור 16: מצב ההצללה במדרכות ובשדרה אחרי חמש שנות צימוח לאחר תוספת נוספת של עצים לשדרה.



השפעת עיצוב הרחוב על זמינות ההצללה במדרכות

מדד זמינות ההצללה (SAI) מאפשר לבחון בצורה השוואתית תרחישי תכנון שונים תוך כימות השפעתם המשתנה של רכיבים מסוימים בתכנון על שיפור או הרעה של תנאי ההצללה. ללא מדד כמותי כזה תכנון ההצללה עלול להתבסס על מידע חלקי או שגוי ולהביא להערכת יתר או חסר של הבדלים בין אפשרויות תכנון שונות. לדוגמה, תכנון הצללה ללא מדד כמותי עלול להביא לנטיעת כמות גדולה של עצי רחוב, גם כאשר ההשפעה היחסית של מרבית העצים החדשים על מצב ההצללה תהיה שולית בשל הצללה מספקת מבניינים או מעצים קיימים. את ההשקעה הכרוכה בנטיעת עצים אלה עדיף להפנות לנטיעות ברחובות שרמת ההצללה בהם נמוכה במיוחד.

69

כאשר ניגשים לתכנון הצללה מפורט של רחוב, אנו ממליצים לחשב תחילה את מדד זמינות ההצללה המתקבל ללא עצים או רכיבי הצללה חיצוניים, כגון פרגולות או סככות. בדרך זאת ניתן להבין טוב יותר מה היא רמת ההצללה הבסיסית שיוצרת התשתית הפיזית הקבועה של הרחוב: כיוון הרחוב, רוחב המדרכות, היחס בין רוחב זכות הדרך לגובה הבניינים והמרווחים בין הבניינים. לאחר חישוב זה קל לבחון שיטות שונות להעלאת דרגת זמינות ההצללה באמצעות עצים או רכיבים אחרים. שימוש במדד זמינות ההצללה יאפשר להשיג איזון סביר בין

עמידה ביעדי ההצללה הכמותיים לבין צמצום ההוצאה הציבורית הנדרשת לעמידה בהם, מתוך הכרה בכך שרכיבים אלה יקרים יחסית, ושעלות הצבתם ותחזוקתם נופלת על כתפי הציבור.

תהליך תכנון מפורט של הצללה צריך להביא בחשבון את תנאי הבסיס הייחודיים של כל רחוב המיועד לעיבוי צל, על סמך תיעוד מדויק של רכיביו המרכזיים של הרחוב, ובכלל זה עצים הנטועים בו. הסיבה לכך היא שהבדלים קטנים בעיצוב הרחוב עשויים במקרים מסוימים לשנות באופן משמעותי את רמות זמינות ההצללה. למרות זאת, לרוב רמת זמינות ההצללה נובעת מהחלטות תכנוניות עקרוניות הנוגעות לשלושה תחומים של החלטות עיצוביות: כיוון הרחוב; המורפולוגיה של הרחוב (גובה, מיקום הבינוי וצפיפותו, רוחב זכות הדרך); ממדיהם של עצי הצל, צפיפותם ומיקומם. ההשוואות המובאות כאן בין תרחישי תכנון שונים ורמות זמינות ההצללה הנובעות מהם נועדו להדגים את השפעת כל אחד מהתחומים, ובה בעת להראות כי עמידה ביעדי ההצללה שהוגדרו בעבודה זו אינה תלויה בפתרון מיטבי בודד, אלא ניתנת להשגה במגוון רחב של גישות עיצוביות שונות.

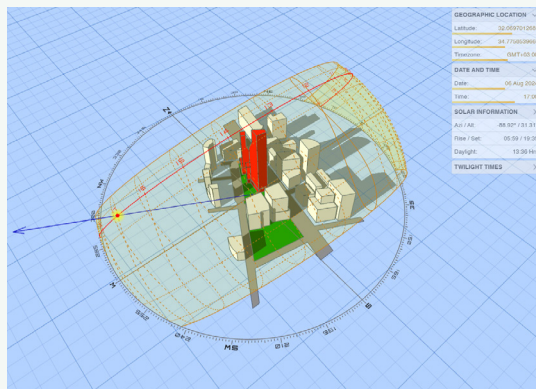
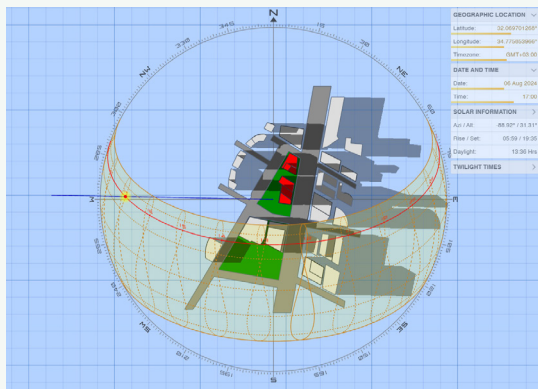
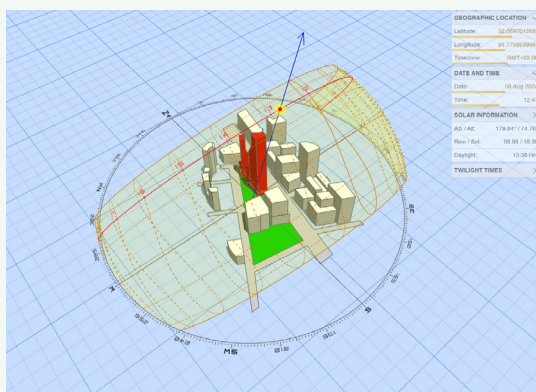
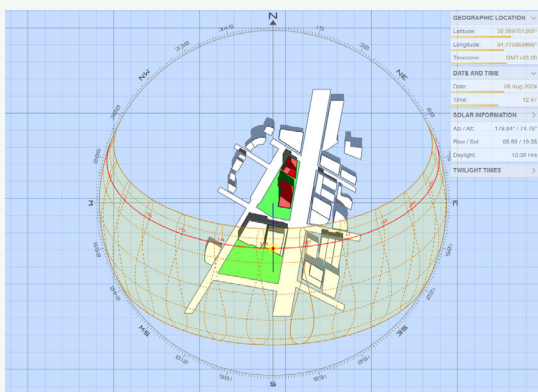
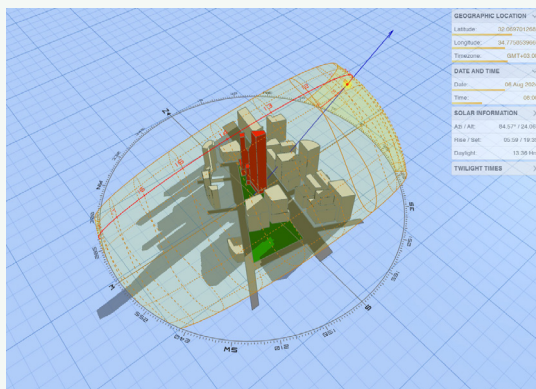
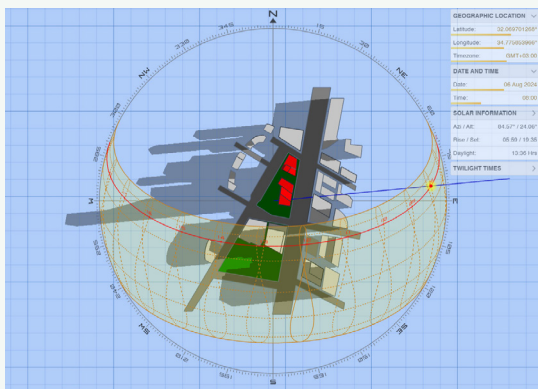
השפעת כיוון הרחוב על מדד זמינות ההצללה

מיקומה היחסי של השמש בשמים משתנה מעונה לעונה ובמהלך שעות היום. בקיץ הישראלי בשעות הבוקר השמש מאירה בזווית נמוכה יחסית של כ-30 מעלות, ומיקומה ביחס לכדור הארץ ממשיך להשתנות לכיוון

דרום עד אמצע היום. בשעה זו, קרני השמש פוגעות בפני הקרקע בזווית של כ-75 מעלות. מכאן, מיקום השמש הולך ו"ויורד" לכיוון מערב במסלול הופכי למסלול במחצית הראשונה של היום (איור 17). פירושו של דבר, לדוגמה, ששורת מבנים מזרחית ברחוב הנפרס מצפון לדרום תטיל צל ארוך בשעות הבוקר על צידו המערבי של הרחוב, אך תפסיק להטיל צל בכלל בשטח זכות הדרך (הכביש והמדרכות) של הרחוב משעות הצהריים. מצב זה שונה לחלוטין ברחובות הנפרסים ממזרח למערב, משום ששמש הצהריים הגבוהה גורמת לבניינים בצידו הדרומי של הרחוב להטיל צל קצר יחסית לתוך זכות הדרך.

71 באיור 18 מוצגת השוואה בין ארבעה תרחישי תכנון זהים בכל מאפייניהם (יחס גובה/רוחב 0.6, גובה נוף העצים 9 מטר מפני הקרקע) מלבד בכיוון הרחוב לצד תוצאות חישוב מדד זמינות ההצללה בכל מדרכה. באיור מוצגים מקטעי הרחובות במבט-על סכמטי ובו קווי המתאר של הבניינים (מלבנים לבנים), של אבני השפה (קווי אורך שחורים) ושל נוף העצים (עיגולים שחורים). שטח זכות הדרך צבוע בגוונים הנעים מכחול לאדום כדי להציג את עוצמת החשיפה המצטברת של מפלס הקרקע לקרינת השמש (ככל שהעוצמה פחותה וההצללה איכותית יותר, כך הגוון קרוב יותר לכחול).

ניתן לראות כי במקרה זה, שההצללה מושגת בשילוב בין מבנים לעצים, ניתן לעמוד ביעד של הצללה מתקבלת על הדעת בשתי המדרכות ברחוב בכיוון צפון-דרום ובמדרכה אחת בכל שאר הכיוונים. בכיוון מזרח-מערב ניכר פער גבוה בתנאי ההצללה בין שתי המדרכות: במדרכה הדרומית מדד זמינות ההצללה הוא 0.8, לעומת 0.2 במדרכה הצפונית.



איור 17: תיאור סכמטי של מסלול השמש בשמים ב-6 באוגוסט בתל אביב (הקו האדום), תוך הצגת זווית פגיעת השמש (החץ הכחול) בכמה שעות לאורך היום (שעון קיץ): 8:00 (שורה עליונה), 12:47 (חצות היום הסולארי, שורה אמצעית) ו-17:00 (שורה תחתונה). בכל שעה מוצגים מבט תלת-ממדי מכיוון דרום-מערב (מימין) ומבט-על (משמאל). התרשימים הופקו באמצעות האתר Sunpath3d שיצר ד"ר אנדרו ג' מארש (Marsh).

בשאר הכיוונים אין כלל פערים בתנאי ההצללה בין שתי המדרכות או שהם קטנים יחסית. ההשוואה מבליטה את יתרונם היחסי של רחובות הנפרסים מצפון לדרום ביצירת תנאי הצללה במדרכות (בעיקר בשל הצללת בניינים על שטח הרחוב) על פני רחובות הנפרסים ממזרח למערב. ברחובות אלה קשה להשיג רמות הצללה מתקבלות על הדעת ללא שכבה משמעותית ורציפה של עצי צל בייחוד במדרכה הצפונית, שהשפעת ההצללה מהבינוי כמעט שאינה מורגשת בה.

השפעת מורפולוגיית הרחוב על מדד זמינות ההצללה

73

המורפולוגיה של הרחוב נוגעת לכל ההחלטות העיצוביות באשר לממדיו הכלליים של הרחוב, לחלוקת זכות הדרך בין מדרכות לנתיבי נסיעה, למספר המבנים הניצבים בשני צדדיו, לצורתם הנפחית ולמיקומם ביחס לזכות הדרך. השפעת המורפולוגיה על רמות זמינות ההצללה תלויה גם בכיוון הרחוב, והיא תהיה מובהקת פחות ברחובות הנפרסים ממזרח למערב. עם זאת, ניתן לומר באופן כללי, כי ככל שהיחס בין גובה הבניינים לרוחב זכות הדרך שביניהם גבוה יותר, כך גדל הסיכוי להעלאת זמינות ההצללה במדרכות באמצעות הבניינים משני צידי הרחוב גם ללא תוספת עצים או אמצעי הצללה אחרים בתחום המדרכה.

באיור 19 מוצגים שלושה תרחישי הצללה ברחובות בכיוון צפון-דרום, כל תרחיש ברוחב שונה של זכות הדרך וברוחב כביש ומדרכות שונה.

התרחישים זהים מבחינת גובה המבנים (13 מטר), מספרם, נסיגת קו הבניין מקו המגרש וקווי הבניין הצידיים, ואינם כוללים עצים. התרחיש שרמת זמינות ההצללה בו היא הגבוהה ביותר הוא גם התרחיש שרוחב הכביש (11 מטר) ורוחב המדרכות (3 מטר כל אחת) בו הם הצרים ביותר, ואילו בתרחיש שהכביש (18 מטר) והמדרכות (8 מטר כל אחת) הם הרחבים ביותר, מדד זמינות ההצללה בו הוא הנמוך ביותר. ניתן ללמוד מכך שבכיוונים מסוימים ניתן להגיע לרמות הצללה מתקבלות על הדעת ברחובות צרים רק באמצעות הצללה מהמבנים עצמם. מעניין לבחון את תרחיש הביניים, שבו המדרכה צרה יחסית (ברוחב 3 מטר) אך הכביש רחב (18 מטר): אף שרוחב המדרכה וגובה המבנים שלצידה זהים בתרחיש זה לתרחיש של הרחוב הצר ביותר, מדד ההצללה בו נמוך יותר. הסיבה להפרש במקרה זה היא ההצללה הנוספת שמתקבלת מהמבנים בצידו השני של הכביש, שהשפעתם פוחתת ככל שרוחב הכביש בין המדרכות עולה. מכאן עולה שלרוחב הכביש יש השפעה שלילית על רמות ההצללה במדרכות כאשר קיים פוטנציאל להצללה משמעותית מבניינים על צידו השני של הרחוב.

באיור 20 מוצגת ההשפעה החיובית של עלייה בגובה הבניינים על רמת זמינות ההצללה במדרכות. ארבעת התרחישים המוצגים באיור זה הם של רחוב בכיוון צפון-דרום, ללא עצים, שרוחב כל אחת מהמדרכות בו 9 מטר ורוחב זכות הדרך הכוללת 36 מטר. ההשוואה בין תוצאות חישוב מדד זמינות ההצללה בכל אחד מהתרחישים מעלה כי ניתן לשפר את רמת זמינות ההצללה במדרכות על ידי הגבהה משמעותית של הבניינים משני צידי הרחוב גם ללא תוספת עצים. עם זאת, חשוב לזכור שהשפעה כזאת אופיינית בעיקר לכיוון המוצג באיור (צפון-

(דרום), ושעוצמתה תלך ותפחת ככל שיעלה רוחב זכות הדרך.

השפעת נטיעת עצי צל על מדד זמינות ההצללה

עצי צל הם עצים שהנוף שלהם רחב וצפוף דיו כדי להטיל צל הומוגני יחסית על הקרקע. מכאן, שלא כל עץ הנטוע במרחב הבנוי הוא עץ צל, גם אם העץ עצמו הוא ממין המומלץ לנטיעה ברחובות. הנחת התכנון צריכה להיות כי עץ המוגדר כעץ צל יהיה עץ שתנאי הגידול, הגיזום והתחזוקה שלו מאפשרים לנוף שלו לבלום לפחות 90% מקרינת השמש הישירה הפוגעת בשכבה העליונה של נוף העץ, ושהצל שהיא מטילה המשכי והומוגני יחסית בכל שטח קו המתאר של היטל ההצללה על הקרקע.²⁵ מובן, שלנוכחותם של עצים במרחב העירוני עשויות להיות השפעות סביבתיות חיוביות או שליליות בלא קשר לצל שהם מטילים, ויש לשקול את ההשפעות האלה בעת תכנון הצללה המבוססת בחלקה על שימוש בעצי צל. עם זאת, מדד זמינות ההצללה אינו מיועד לבחינה כמותית של ההשפעות האלה, אלא ממוקד בהשפעת השימוש בעצי צל ממינים שונים ובגדלים שונים על שיפור מצב ההצללה במדרכות.

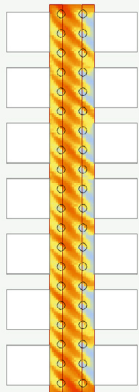

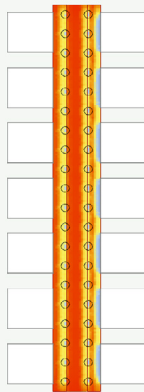

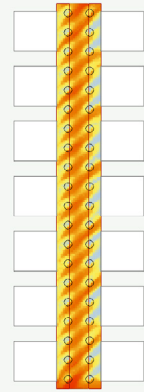

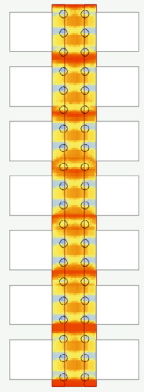

75

25 בישראל לא נעשו כמעט מחקרים שיטתיים שבדקו את שיעור סינון קרינת השמש של נוף עצים ממינים שונים. יוצא דופן הוא מחקרם של לימור שעשועבר ואח' על שלושה מיני עצים בתל אביב (Ficus Retusa, Date Palm, Tipuana Tipu);

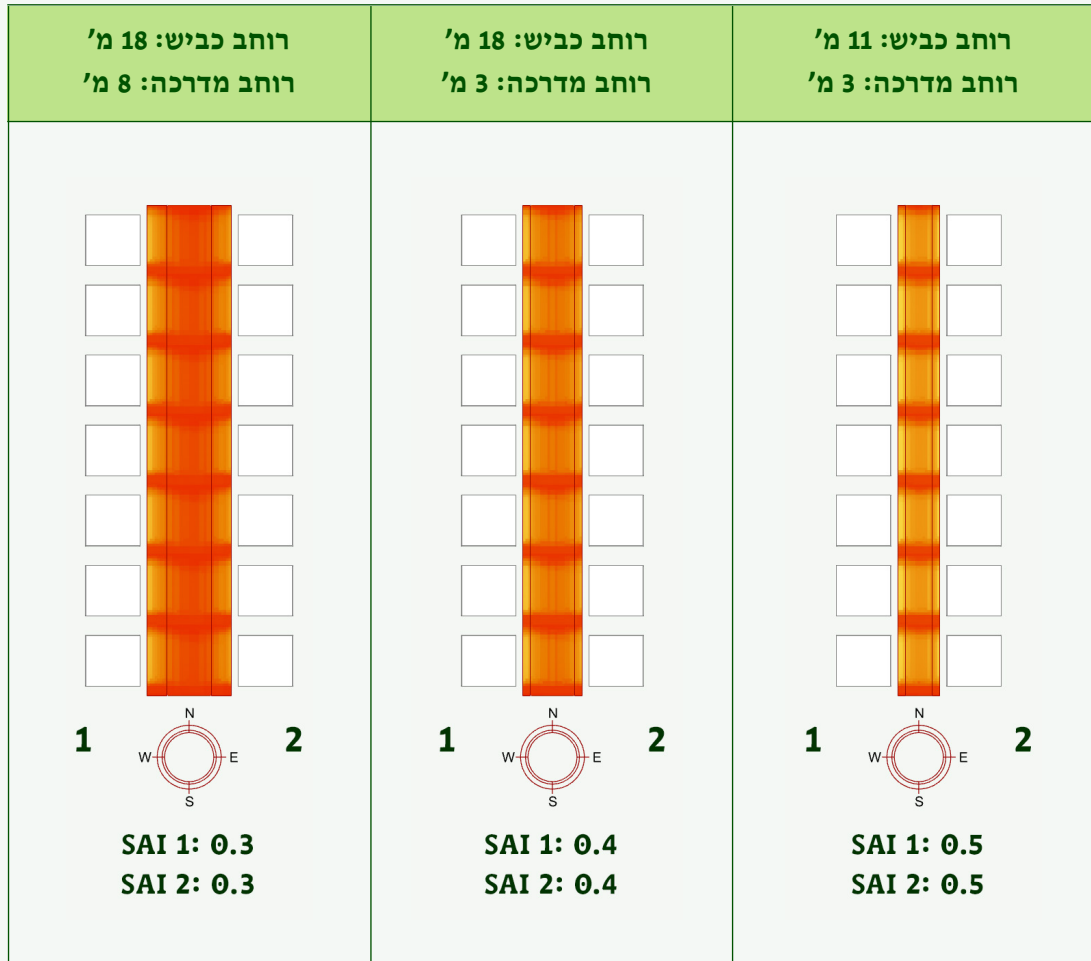
Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2010). Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 30(1), 44-57

עבודה רחבה בהרבה נעשתה בארצות הברית וייתכן שניתן להשליך ממנה על מעבר האור דרך הנוף של חלק ממיני העצים הניטעים בישראל, תוך התחשבות בתנאי הצימוח השונים בין שתי הארצות. ראו:

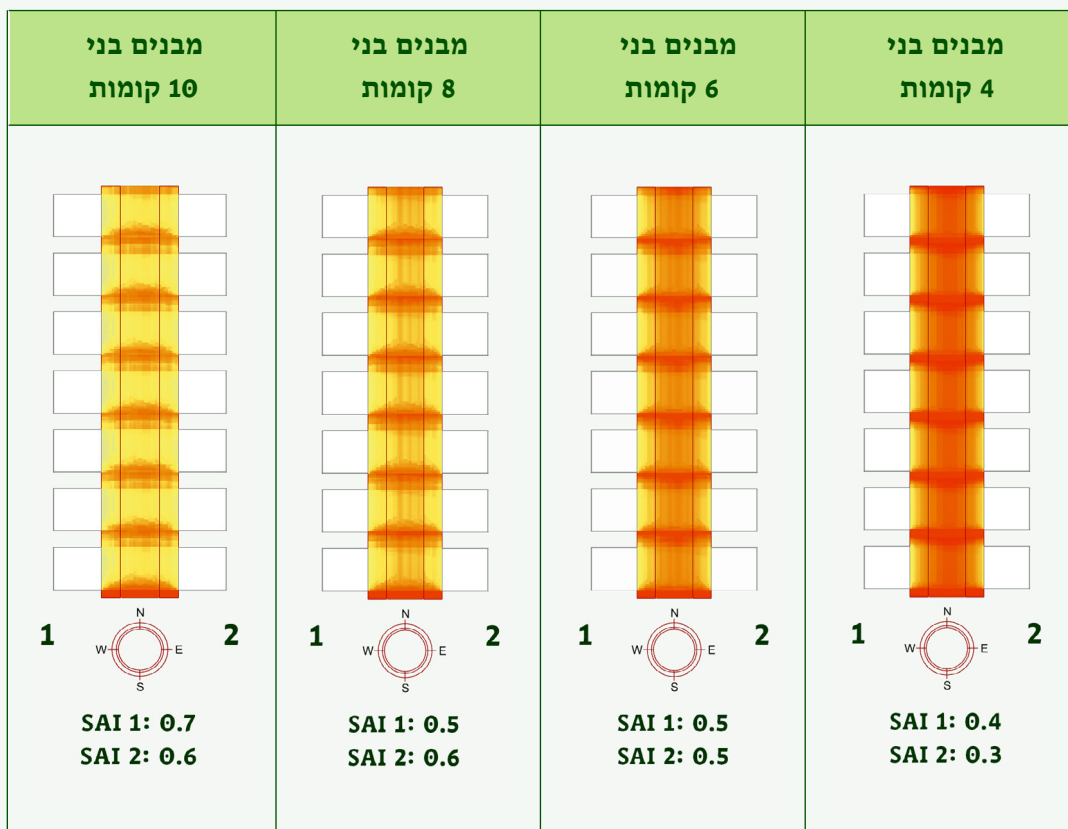
McPherson, E. G., Xiao, Q., van Doorn, N. S., Johnson, N., Albers, S., & Peper, P. J. (2018). Shade factors for 149 taxa of in-leaf urban trees in the USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31(March), 204-211

דרום-מזרח - צפון-מערב	מזרח-מערב	צפון-מזרח - דרום-מערב	צפון-דרום
 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.4 SAI 2: 0.5</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.2 SAI 2: 0.8</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.3 SAI 2: 0.6</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.5 SAI 2: 0.6</p>

איור 18: השוואת מדד זמינות הצללה ברחובות בכיוונים שונים. יחס גובה/רוחב של חתך הרחוב - 0.6.



איור 19: השוואת מדד זמינות הצללה ברחובות עם רוחב כביש ומדרכה משתנה. גובה המבנים - 13 מטר, כיוון הרחוב - צפון-דרום.



איור 20: השוואת מדד זמינות ההצללה ברחובות עם גובה בינוי משתנה. רוחב זכות הדרך - 36 מטר, כיוון הרחוב - צפון-דרום.

נטיעת עצי צל היא כלי מרכזי שיכול לשפר בתוך פרק זמן של שנים ספורות את מצב ההצללה ברחובות קיימים או מתוכננים. עם זאת, ובדומה להשפעת המורפולוגיה של הרחוב על דרגת זמינות ההצללה במדרכות, נטיעה של עצים עשויה להתגלות כבלתי יעילה בשיפור מצב ההצללה, משתי סיבות עיקריות: האחת, שבשל מגבלות בית גידול ותחזוקה, העצים שניטעו אינם ממצים את פוטנציאל הצימוח שלהם ומפתחים נוף מצומצם יחסית בגלל מענה לא מספק של בתי הגידול לצורכיהם; השנייה, שגם במצב של צימוח מיטבי של הנוף, מיקומם של העצים או מרווחי הנטיעה ביניהם אינם מספקים כיסוי הצללה מספק במדרכות. כשמבקשים לשפר את מצב ההצללה ברחובות באמצעות נטיעת עצים, חשוב גם לבחון את השפעתם של תרחישי נטיעה שונים על השיפור היחסי ברמת זמינות ההצללה, ולהביא בחשבון כי קצב הגידול בחופת העצים ברחוב עשוי להיות איטי מהצפוי.²⁶ משום כך, יש לשאוף למצב של נטיעת מספר קטן של עצים גדולים שיוצרים חופה רציפה, על פני מספר גדול יותר של עצים קטנים שעלוותם מצומצמת יותר אך מנגד נדרשת עבורם השקעת משאבים גדולה יותר (בעיקר השקיה, גיזום וטיפול בקרקע). מכאן, שניתן לחשב צפיפות נטיעות מיטבית, שמעליה התועלת השולית של כל עץ נוסף מבחינת רמת זמינות ההצללה במדרכות יורדת בחדות.

אחד המדדים המקובלים לכימות רמות הצללה הוא מדד כיסוי חופת העצים (TCC - Tree Canopy Cover). זהו מדד גאומטרי פשוט בין 0 ל-1, המחושב בחלוקה של שטח ההיטל הכולל על משטח אופקי של נוף

26 אילון, י. (2015). תכנון בר-קיימא של עצי רחוב. אדריכלות נוף, 54, 26-28.

העצים במרחב מוגדר (לדוגמה, זכות דרך במקטע רחוב) בשטח הכולל של אותו מרחב. מדד זה אינו מביא בחשבון את כיוון הפגיעה של קרינת השמש הישירה ואת הכיוון והגודל של היטל הצל הממשי שנוצר בשל כך, ולכן הוא עלול ליצור רושם מוטעה שכביכול רמות הצללה גבוהות ניתנות למימוש ברחובות רק כאשר שיעור כיסוי חופת העצים גבוה. כפי שנראה בדוגמאות הבאות, הקשר בין שיעור כיסוי חופת העצים ברחוב לרמת זמינות ההצללה במדרכות הוא קשר רופף יותר ככל ששיעור הכיסוי נמוך יותר, ולמעשה אין להסיק ששיעור כיסוי חופת עצים נמוך מוביל בהכרח גם לרמות הצללה נמוכות. משום כך, שימוש במדד כיסוי חופת העצים לקביעת תוכנית נטיעות עירונית עלול להוביל למסקנות מוטעות ביחס לכמות העצים הנדרשים לנטיעה.

באזור 21 מוצגים חמישה תרחישי הצללה ברחובות בכיוון צפון-דרום עם תוספת עצי צל בשלבי צימוח שונים ובמרווחי נטיעה שונים. התרחישים זהים מבחינת גובה הבינוי (24 מטר), רוחב הכביש (25 מטר) ורוחב המדרכות (10 מטר). בתרחיש הימני מוצג רחוב ללא תוספת עצים, לשמאלו שני תרחישים במרווחי נטיעה של 10 מטר בין עץ לעץ. במצב זה, חמש שנים לאחר נטיעתם, עצי הצל עדיין לא הצמיחו נוף משמעותי, ולכן אינם מביאים לשיפור במדד זמינות ההצללה. עם זאת, עשר שנים מנטיעתם (התרחיש האמצעי) מתקבלת הצללה מצוינת. בשני התרחישים השמאליים מרווחי הנטיעה הם של 5 מטר בין עץ לעץ. מרווח זה אומנם משיג שיפור ניכר ברמות ההצללה כבר לאחר חמש שנים, אך רמת ההצללה לאחר עשר שנים דומה להצללה המתקבלת מנטיעה במרווח של 10 מטר, והתועלת מהכפלת כמות העצים ברחוב (מ-40

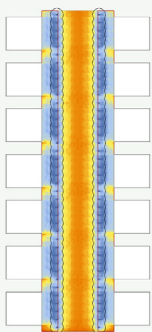

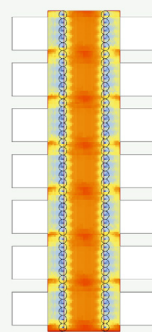

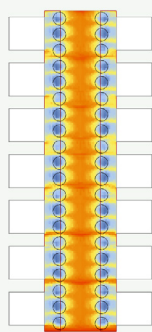

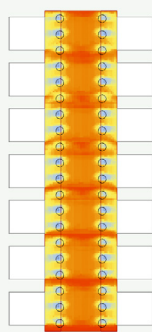

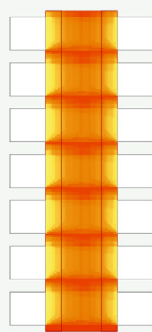

ל-80 עצים) מתגלה אז כשולית בלבד. פירושו של דבר, שבכיוון צפון-דרום ייתכן שנכון להסתפק בנטיעת עצים כל 10 מטר, משום שרמת ההצללה הבסיסית של הרחוב גם ללא עצים הייתה מתקבלת על הדעת. באיור 22 מוצגים חמישה תרחישי הצללה דומים לאלה שהופיעו באיור 21, אך הפעם כיוון הרחוב הוא מזרח-מערב. בכיוון זה הבינוי כמעט אינו משפיע על רמת ההצללה במדרכה הצפונית, אך במדרכה הדרומית ניתן להשיג שיפור משמעותי במדד זמינות ההצללה כבר לאחר חמש שנים מנטיעת העצים גם במרחקי נטיעה של 10 מטר. בשני התרחישים שמרווחי הנטיעה בהם הם של 5 מטר בין עץ לעץ, לא ניכר כל שיפור במצב ההצללה יחסית למצב המקביל במרווחי נטיעה של 10 מטר. הדבר נובע מכך שבכיוון זה היטל הצל של העצים נופל ברוב השעות בתחומי המדרכה, שלא כמו המצב ברחובות בכיוון צפון-דרום. עוד עולה מהשוואה זו, כי במדרכה הצפונית גם נטיעה צפופה במיוחד של שורת עצים אחת לא תוכל להבטיח אפילו רמת הצללה מתקבלת על הדעת אחרי חמש שנים, ובמקרה זה על המתכננים לבחון שיטות נוספות לתוספת הצללה, בין אם באמצעי הצללה זמניים ובין בהוספת שורת עצים נוספת קרובה יותר לחזיתות הבניינים.

81

באיור 21 ובאיור 22 מוצגים גם חישובים של רמת כיסוי חופת העצים ברחוב (TCC) המתקבלת בכל אחד מהתרחישים, לצד מדד זמינות ההצללה (SAI) בכל מדרכה. השוואה בין ערכי כיסוי חופת העצים לערכי זמינות ההצללה מעלה כי לא ניתן למצוא קשר ישיר בין שני הערכים, וכי גם שיעור כיסוי חופת עצים נמוך (0.17 או 0.22) יכול להניב רמות הצללה טובות מאוד ואפילו מצוינות, וכי בתרחיש תכנון

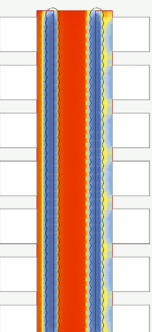

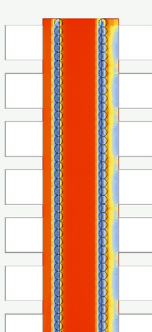

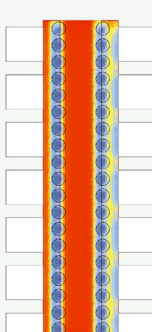

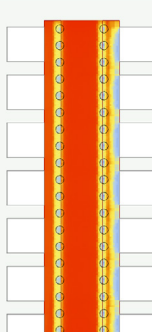

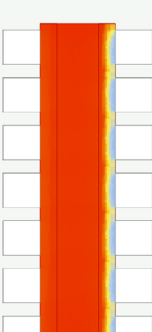

זה ניתן להבטיח רמת הצללה מתקבלת על הדעת אפילו כאשר כיסוי חופת העצים ברחוב נמוך מאוד (0.09). מכאן עולה שברמות נמוכות של כיסוי חופת עצים, ערכו של מדד כיסוי חופת העצים כמנבא מוצלח של רמת זמינות ההצללה נמוך. הסיבות לכך הן שמדד כיסוי חופת העצים אינו מביא בחשבון את תרומתם של בניינים למצב ההצללה ברחוב ואת כיוון הטלת הצל מהעצים.

באיור 23 מוצגת השוואה בין רחובות שההצללה שבהם מושגת אך ורק באמצעות עצים. מצב זה נוצר כאשר אין בניינים לצד המדרכות, כאשר הבניינים לצד המדרכות נמוכים מאוד, או כאשר הם מרוחקים מאוד מקו המגרש הקדמי. בכל אחד משלושת התרחישים רוחב הכביש (18 מטר) והמדרכות (7 מטר כל אחת) זהה, וכך גם מין העץ (עץ צל בן עשר שנים) ומרווחי הנטיעה (10 מטר) בין עץ לעץ. ההבדל בין התרחישים הוא בכיוון הרחוב. אף על פי שמדובר בעצים מפותחים, בחלק מהמדרכות לא מושגת אפילו רמת הצללה מתקבלת על הדעת, ומלבד המדרכה הצפונית בכיוון מזרח-מערב - רמת ההצללה אינה גבוהה. השוואה זו מדגישה עד כמה תרומת ההצללה מבניינים חשובה, גם כאשר נטועים ברחוב די עצי צל איכותיים.

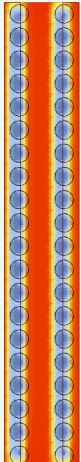

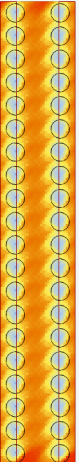

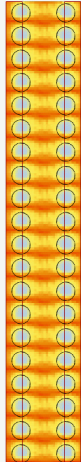

עשר שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 5 מ'	חמש שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 5 מ'	עשר שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 10 מ'	חמש שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 10 מ'	ללא עצים
 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.9 SAI 2: 1.0 TCC: 0.33</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.8 SAI 2: 0.8 TCC: 0.17</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.9 SAI 2: 0.9 TCC: 0.22</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.5 SAI 2: 0.5 TCC: 0.09</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.4 SAI 2: 0.5 TCC: 0</p>

איור 21: השוואת מדד זמינות ההצללה ברחובות בכיוון צפון-דרום ללא עצים ועם עצים במרחקי נטיעה משתנים ובזמני צימוח שונים.

83

עשר שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 5 מ'	חמש שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 5 מ'	עשר שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 10 מ'	חמש שנים מנטיעה, מרחק נטיעה 10 מ'	ללא עצים
 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 1.0 SAI 2: 1.0 TCC: 0.33</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.2 SAI 2: 0.8 TCC: 0.17</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 1.0 SAI 2: 1.0 TCC: 0.22</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0.2 SAI 2: 0.8 TCC: 0.09</p>	 <p>1  2</p> <p>SAI 1: 0 SAI 2: 0.5 TCC: 0</p>

איור 22: השוואת מדד זמינות ההצללה ברחובות בכיוון מזרח-מערב ללא עצים ועם עצים במרחקי נטיעה משתנים ובזמני צימוח שונים.

מזרח-מערב	צפון-מזרח-דרום-מערב	צפון-דרום
 <p data-bbox="359 1078 582 1118">1  2</p> <p data-bbox="399 1189 542 1260">SAI 1: 1.0 SAI 2: 0.4</p>	 <p data-bbox="702 1078 925 1118">1  2</p> <p data-bbox="742 1189 885 1260">SAI 1: 0.6 SAI 2: 0.4</p>	 <p data-bbox="1037 1078 1260 1118">1  2</p> <p data-bbox="1077 1189 1220 1260">SAI 1: 0.5 SAI 2: 0.6</p>

איור 23: השוואת מדד זמינות ההצללה ברחובות בכיוונים שונים ללא בינוי.



היתכנות העמידה ביעדי ההצללה בתרחישי תכנון שונים

הצבת יעדים כמותיים מדידים עלולה להתגלות כבלתי יעילה אם אי אפשר לעמוד ביעדים בתנאים מציאותיים סבירים. לכן, במהלך גיבוש הדרגות הנורמטיביות לזמינות הצללה בדקנו עד כמה קשה לעמוד ביעדים שהצבנו במגוון רחב של תרחישי תכנון סבירים. הבדיקה נעשתה על ידי מידול של כ-20,000 תרחישי תכנון באמצעות קוד פרמטרי שפיתחנו בעבודה קודמת (ראו נספח ב') וחישוב מדד זמינות ההצללה בכל מדרכה בכל תרחיש תכנון. מאגר נתונים זה אפשר לבחון באופן סטטיסטי מה שיעור העמידה ביעדי זמינות ההצללה בדרגות מדד ה-SAI השונות (0.5, 0.7, ו-0.9) מתוך כלל התרחישים שנבדקו. ניתוח התוצאות הראה כי הגעה ליעד ההצללה העליון אפשרית כמעט בכל מצב תכנוני האופייני למרחב הישראלי, אולם הגעה ליעד זה תלויה במקרים רבים בנטיעת עצי צל ברחובות.

מידול התרחישים נעשה באמצעות קוד Kikayon (ראו לעיל, הערה 24). התרחישים נועדו לכסות טווח רחב של עיצובי רחוב, תוך הפרדה בין רחובות ראשיים למשניים. בכל תרחיש נבדקו רמות זמינות ההצללה ללא תוספת עצים לצד תרחישי נטיעה שונים של עצים. המודל הבסיסי כלל רחוב ישר (ללא עיקולים) באורך 200 מטר ובו מדרכה אחת מכל צד של הרחוב וכביש במרכז. כל הרכיבים ברחוב, ובכלל זה הבניינים,

מודלו במספר מצבים אפשריים, ומתוך הנחה שהם זהים בכל צד של הרחוב, כדלקמן (איור 24):

כיוון הרחוב: מידלנו שלושה כיווני רחוב, צפון-דרום, צפון-מזרח-דרום-מערב ומזרח-מערב. בשל מסלולה הסימטרי של השמש בשמיים וחישוב מדד זמינות ההצללה כך שייצג את המצב המצטבר במשך רוב שעות האור, התוצאות הנוגעות לכיוון צפון-מזרח-דרום-מערב זהות למעשה לתוצאות בכיוון דרום-מזרח-צפון-מערב, ולא היה צורך למדל גם את התרחישים האלה.

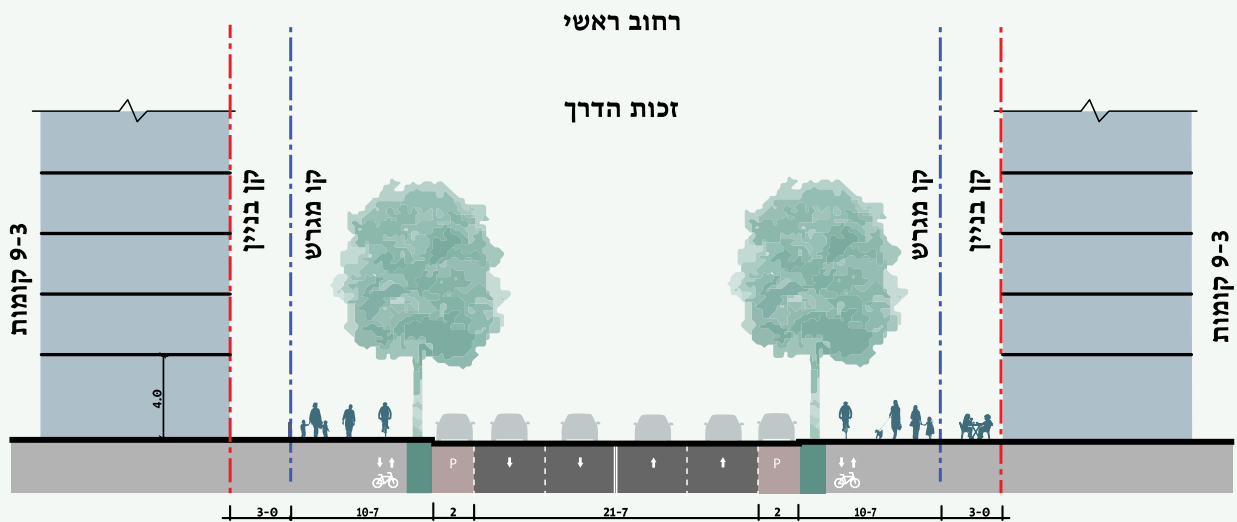
רוחב מדרכה: ברחובות ראשיים נבדקו מודלים בעלי רוחב מדרכה של 7, 8, 9 או 10 מטר, מתוך הנחה שבמפלס המדרכה מוקצה מקום גם לשביל אופניים ולרצועת נטיעה רציפה. ברחובות משניים, רוחב המדרכה במודלים היה 2, 3, 4 או 5 מטר, ללא שביל אופניים או רצועת נטיעה רחבה.

רוחב כביש: הנחת המוצא בכל תרחיש הייתה שקיימת רצועת חניה ברוחב 2 מטר בכל צד של הכביש. ברחובות ראשיים הובאו בחשבון כבישים של שניים, ארבעה או שישה נתיבים, וברחובות משניים נבדקו כבישים בני נתיב אחד או שניים. רוחב כל נתיב נקבע ל-3.5 מטר. בסך הכול, רוחב הכביש הכולל ברחובות ראשיים היה 11, 18 או 25 מטר, וברחובות משניים 7.5 או 11 מטר.

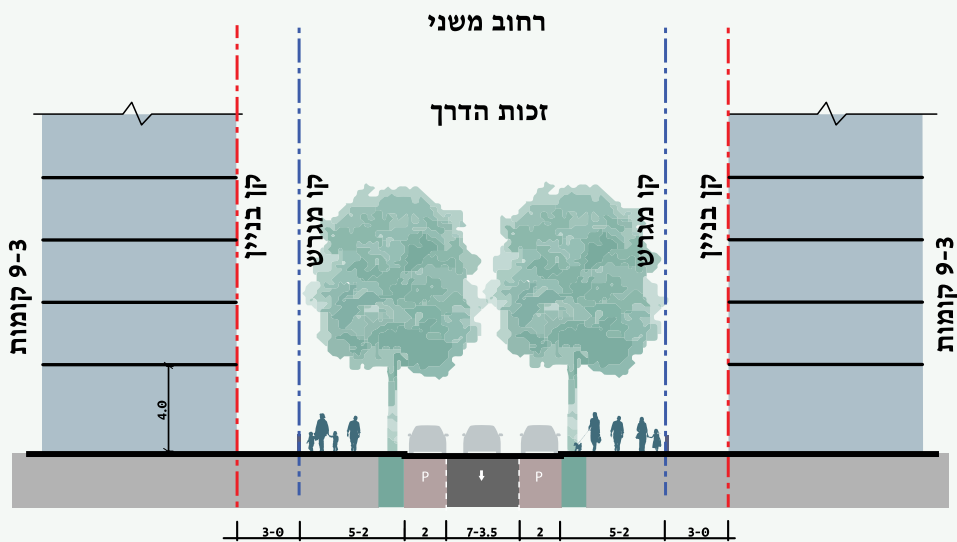
מספר המבנים לאורך הרחוב: מידלנו תרחישים שבהם שלושה, חמישה או שבעה בניינים משני צידי הרחוב.

קו בניין צידי: מידלנו שני תרחישים: קו בניין צידי של 4 או 8 מטר מקו המגרש, ובפועל רווח צידי בין בניינים של 8 או 16 מטר.

קו בניין קדמי: מידלנו שני תרחישים: קו בניין קדמי של 0 או 3 מטר.



89



איור 24: חתך רחוב סכמטי המציג את הרכיבים הקבועים והמשתנים במודלים שנבחנו, עבור רחוב ראשי (למעלה) ורחוב משני (למטה).

גובה המבנים: מידלנו ארבעה גבהים של מבנים: שלוש, חמש, שבע או תשע קומות מעל קומת מסד. גובה קומת המסד היה 4 מטר, וגובה קומה טיפוסית - 3 מטר. הגובה הכולל של המבנים שמידלנו היה לפיכך 13, 19, 25 או 31 מטר בהתאמה.

תרחישי הנטיעה של עצים בכל אחד מהמודלים הביאו בחשבון נטיעת עצי צל בלבד, בשני מרווחי נטיעה: 5 ו-10 מטר. עץ צל הוא עץ גדול, בדרך כלל מהקבוצה הבוטנית של רחבי העלים, הנטוע במטרה לספק צל משמעותי בסביבתו. המורפולוגיה הטבעית של עצי צל יוצרת חופה רחבה המשולבת בעלווה צפופה, באופן המאפשר חסימה מיטבית של קרינת השמש הפוגעת בנוף העץ. עם זאת, עבור עצים, שבית גידולם הטבעי הוא יערות וחורשים, הסביבה העירונית היא מרחב מחיה עוין ומאתגר. הרחוב העירוני רווי תשתיות הנדסיות. ריצוף בטון ואספלט אוטמים את הקרקע ומצמצמים במידה ניכרת חילופי גזים, חלחול נגר עילי והתאדות מים מהקרקע המקומית לאטמוספירה. יתר על כן, במקרים רבים הקרקע העירונית מתחת לריצוף נחשפה במשך שנים לתהליכי תיעוש, בנייה וזיהום מתשטיפי כביש. מעל לכול אלה, הגורם המגביל ביותר בגידול של עץ רחוב עירוני הוא היעדר נפח קרקע מספק לשורשים. הנחת המוצא במידול העצים הייתה כי ניתנו להם תנאים התומכים בצימוח תקין: נפח קרקע מספק להשרשה, השקיה, אוורור וניקוז בהתאם לסטנדרטים גבוהים של בתי גידול לעצים בסביבת ריצופים קשים.²⁷

את העצים מידלנו בשתי נקודות זמן אחרי נטיעתם, לאחר חמש ועשר

27 צור, ש. (2018). הנחיות לפרטי נטיעה ומרחב מחיה לעצי רחוב בתל אביב. מוגש לעיריית תל אביב-יפו.

שנים, שבהן העץ עשוי להצמיח כבר נוף משמעותי מבחינת הצל שהוא מטיל עוד בטרם הגיע לגודלו המרבי. תרחישי הנטיעה התבססו על סרגלי גדילה של שני עצי צל שכיחים בישראל, מִיש בונגה (גשר הזיו, Celtis Bungeana) וצאלון נאה (Delonix Regia).²⁸ המִיש הוא עץ שמוצאו מסין ומקוריא, בעל אופי נשיר וקצב צימוח מהיר. צורת הנוף שלו מעוגלת, גובהו כ-15 מטר, וקוטר נופו כ-10 מטר כעץ בוגר. הצאלון הוא עץ שמוצאו ממדגסקר, בעל אופי נשיר מותנה וקצב צימוח מהיר מאוד. צורת נופו סוככנית, גובהו כ-12 מטר, וקוטר נופו כ-20 מטר כעץ בוגר. בנקודות הזמן שמודלו (5 ו-10 שנים), קוטר הנוף של המִיש הוא 4 ו-8 מטר וגובהו 7 ו-9 מטר בהתאמה, ואילו קוטר הנוף של הצאלון הוא 5 ו-8 מטר וגובהו 7 ו-9 מטר. משום כך, התוצאות שהתקבלו אחרי עשר שנות צימוח היו למעשה זהות בשני העצים, אך שונות במצבם חמש שנים אחרי הנטיעה.

91

סיכום הניתוח הסטטיסטי של תוצאות המידול מופיע בטבלאות 3-8. בטבלאות מוצג אחוז התרחישים שעמדו באחת משלוש דרגות זמינות ההצללה מתוך כלל התרחישים מאותו סוג. תרחישים שהושג בהם יעד ההצללה ביותר מ-90% מהמקרים מסומנים בירוק בהיר, ותרחישים שיעד ההצללה מושג בהם ב-75% עד 90% מהמקרים מסומנים בכתום בהיר. לדוגמה, בטבלה שמוצגים בה כל תרחישי התכנון של רחובות ראשיים בכיוון צפון-דרום (טבלה 3), אפשר לראות שבאמצעות בינוי בלבד (בכל סוגי הבינוי וממדי הרחוב שנבדקו) ניתן לעמוד ביעד של זמינות הצללה מתקבלת על הדעת (0.5) ב-56% מהתרחישים שנבדקו במדרכה המזרחית

28 סרגלי הגדילה שהוטמעו בעבודה זו מבוססים על עבודתו של אדר' נוף יעקב אילון ועל ניסיונו האישי ארוך השנים.

וב-55% במדרכה המערבית. ניתוח התוצאות מעלה גם מספר מסקנות כלליות הנוגעות למידת היתכנות העמידה ביעדי ההצללה, כדלקמן:

כיוון הרחוב: לכיוון הרחוב השפעה ניכרת על עמידה בדרגות זמינות ההצללה. קל יותר להגיע לדרגות הצללה גבוהות גם ללא שימוש בעצים או בשימוש מועט בעצים ברחובות שכיוונם צפון-דרום או בהטיה אלכסונית (צפון-מזרח-דרום-מערב או דרום-מזרח-צפון-מערב). הרחובות הקשים ביותר להצללה ללא עצים הם רחובות הנפרסים בכיוון מזרח-מערב, אולם חשוב לזכור שגם ברחובות אלה עשויה להיות לבניינים השפעה חיובית מסוימת על מצב ההצללה בשעות מסוימות.

עצי צל: קשה מאוד, ובמקרים רבים בלתי אפשרי, להגיע לדרגת זמינות ההצללה הגבוהה ביותר (0.9) ללא נטיעה של עצי רחוב שהצליחו לפתח נוף מיטבי בתוך עשר שנים מנטיעתם. לשם השגת מטרה זו חשוב להבטיח בתי גידול תת-קרקעיים משמעותיים לצימוח שורשים ותחזוקה מתמדת (גיזום מכוון, השקיה) לאורך השנים.

גמישות תכנונית: קיימות דרכים רבות לעמוד בכל אחת משלוש דרגות זמינות ההצללה בשילוב נכון בין הצללה ממבנים ומעצים. משום כך, חיוב עמידה בדרגות ההצללה אינו צפוי לפגוע בגמישות התכנונית או במימוש מטרות תכנוניות שהן מעבר להבטחת הצללה גרידא.

הצבת יעדים גבוהים: סף ההצללה התחתון (הצללה מתקבלת על הדעת) נועד ליצור מכנה משותף נמוך כבסיס התחלתי שממנו משתפרים, ואינו יעד סופי. ניתן לעמוד ביעדי ההצללה העליונים כמעט בכל מורפולוגיה וכיוון (בהנחה של בינוי עירוני מעל גובה ארבעה קומות, גם ברחובות רחבים יחסית) באמצעות עצים, ומכאן שניתן להגשים מדיניות הצללה שאפתנית ברובם המכריע של המקרים.

טבלה 3: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצלחה ברחובות ראשיים בכיוון צפון-דרום מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצלחה מצוינת (זמינות הצלחה 0.9)		אחוז השגת הצלחה טובה מאוד (זמינות הצלחה 0.7)		אחוז השגת הצלחה מתקבלת על הדעת (זמינות הצלחה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב ראשי)
מדרכה מזרחית	מדרכה מערבית	מדרכה מזרחית	מדרכה מערבית	מדרכה מזרחית	מדרכה מערבית		
0	0	7	7	56	55		בינוי בלבד
0	0	13	14	65	66	10 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
0	0	18	19	68	70		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
72	69	97	98	99	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
7	9	53	44	83	78	5 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
32	33	84	89	97	100		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
95	99	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם

טבלה 4: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצלה ברחובות ראשיים בכיוון צפון-מזרח-דרום-מערב מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצלחה מצוינת (זמינות הצלחה 0.9)		אחוז השגת הצלחה טובה מאוד (זמינות הצלחה 0.7)		אחוז השגת הצלחה מתקבלת על הדעת (זמינות הצלחה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב ראשי)
מדרכה-דרום-מזרחית	מדרכה-צפון-מערבית	מדרכה-דרום-מזרחית	מדרכה-צפון-מערבית	מדרכה-דרום-מזרחית	מדרכה-צפון-מערבית		
0	0	7	0	59	10		בינוי בלבד
0	0	15	2	69	25	10 מטר	בינוי ועצי מיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
0	0	19	3	73	34		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
84	82	97	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
22	0	71	28	92	82	5 מטר	בינוי ועצי מיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
43	40	80	76	96	100		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
96	99	95	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם

טבלה 5: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצללה ברחובות ראשיים בכיוון מזרח-מערב מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצללה מצוינת (זמינות הצללה 0.9)		אחוז השגת הצללה טובה מאוד (זמינות הצללה 0.7)		אחוז השגת הצללה מתקבלת על הדעת (זמינות הצללה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב ראשי)
מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית		
0	0	7	0	31	0		בינוי בלבד
4	0	32	0	44	0	10 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
16	0	41	0	51	0		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
79	97	82	100	86	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
28	0	52	19	60	22		בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
44	25	64	46	70	51	5 מטר	בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
88	97	93	100	94	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם

טבלה 6: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצללה ברחובות משניים בכיוון צפון-דרום מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצללה מצוינת (זמינות הצללה 0.9)		אחוז השגת הצללה טובה מאוד (זמינות הצללה 0.7)		אחוז השגת הצללה מתקבלת על הדעת (זמינות הצללה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב משני)
מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית		
10	0	59	53	92	89		בינוי בלבד
25	16	77	70	94	98	10 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
41	19	82	73	95	99		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
100	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
85	80	98	99	100	100	5 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
96	98	100	100	100	100		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
100	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מִיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם

טבלה 7: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצללה ברחובות משניים בכיוון צפון-מזרח-דרום-מערב מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצללה מצוינת (זמינות הצללה 0.9)		אחוז השגת הצללה טובה מאוד (זמינות הצללה 0.7)		אחוז השגת הצללה מתקבלת על הדעת (זמינות הצללה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב משני)
מדרכה דרום-מזרחית	מדרכה צפון-מערבית	מדרכה דרום-מזרחית	מדרכה צפון-מערבית	מדרכה דרום-מזרחית	מדרכה צפון-מערבית		
9	0	65	30	93	70		בינוי בלבד
24	0	77	47	96	81	10 מטר	בינוי ועצי מיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
73	23	95	66	100	89		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
100	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
93	84	100	100	100	100	5 מטר	בינוי ועצי מיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
99	98	100	100	100	100		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
100	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם

טבלה 8: שיעור העמידה בדרגות זמינות ההצלה ברחובות משניים בכיוון מזרח-מערב מתוך כלל תרחישי המידול

אחוז השגת הצללה מצוינת (זמינות הצללה 0.9)		אחוז השגת הצללה טובה מאוד (זמינות הצללה 0.7)		אחוז השגת הצללה מתקבלת על הדעת (זמינות הצללה 0.5)		מרחקי נטיעה בין עץ לעץ	תרחיש עיצוב (רחוב משני)
מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית	מדרכה דרומית	מדרכה צפונית		
0	0	46	0	71	0		בינוי בלבד
75	0	84	5	86	71	10 מטר	בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
80	2	88	75	90	96		בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
99	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם
84	100	92	100	93	100		בינוי ועצי מִיש בונגה 5 שנים מנטיעתם
94	100	96	100	98	100	5 מטר	בינוי ועצי צאלון נאה 5 שנים מנטיעתם
100	100	100	100	100	100		בינוי ועצי צל (מיש בונגה/ צאלון נאה) 10 שנים מנטיעתם






סיכום

במסמך זה מוצגת שיטה מעשית לגיבוש אסטרטגיית הצללה עירונית על סמך מדדים כמותיים אחידים. השיטה מיועדת ליישום בקני מידה שונים של תכנון עירוני, החל מהתוויית מדיניות לאומית בנושא ההצללה וכלה בהכוונת פעולות התערבות במרחב העירוני. ברמה העירונית השיטה מבוססת על תהליך תלת-שלבי הכולל מיפוי היררכיית ההצללה העירונית, תיעדוף אזורי התערבות לתוספת הצללה ותכנון מפורט של ההצללה בקנה המידה של מקטע הרחוב הבודד. שיטת מיפוי היררכיית ההצללה העירונית המופיעה במסמך זה מבוססת על שיטה חישובית שפיתחו המחברים בעבודות קודמות, ויושמה עד היום במספר ערים בישראל. ביחס לשיטה לתיעדוף אזורי ההתערבות, נכון שתשלב בין תוצאות מיפוי הצל לנתונים בנושאים אחרים הנוגעים לסביבה העירונית, כגון הליכתיות, פגיעות בריאותית ופגיעות כלכלית של התושבים, וכן מהלכי תכנון כלל-עירוניים ובתוכם התחדשות עירונית. החידוש העיקרי בעבודה זו הוא הצגת מדד אחד לכימות הצללה במדרכות, **מדד זמינות ההצללה**, המאפשר לא רק לערוך השוואות כמותיות בין רמת ההצללה ברחובות שונים, אלא גם לקבוע יעדי הצללה נורמטיביים מדידים ליישום פעולות ההתערבות לשיפור מצב ההצללה ולמעקב אחר מידת הצלחתן.

מדד זמינות ההצללה הוא מדד המביא בחשבון את השטח המוצל הזמין להליכה לאורך מרבית שעות האור ביום קיץ טיפוסי. מדד זה מבטא את

איכות ההצללה לפי מספר השעות היחסי שמושגת בהן הצללה מרחבית מספקת במדרכה. יתרונו טמון בביטוי הנכון שהוא נותן להשפעה המשולבת של הצללה ממבנים, מעצים ומאמצעי הצללה אחרים על מצב ההצללה במדרכה, לצד שמירה על שיטת חישוב פשוטה יחסית וגאומטרית במהותה. פשטות זו היא שמאפשרת לקבוע לפי מדד זה דרגות נורמטיביות הניתנות להבנה אינטואיטיבית גם ללא הכרה עמוקה של השפעת גורמים אקלימיים שונים על תחושת הנוחות התרמית של האדם. עבור התנאים בישראל, אנו מציעים לקבוע שלוש דרגות הצללה כיעדים נורמטיביים רצויים בתכנון עירוני מוכוון הצללה, כדלקמן:

הצללה מצוינת	הצללה טובה מאוד	הצללה מתקבלת על הדעת
ערך מדד זמינות הצללה של 0.9 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.7 ומעלה	ערך מדד זמינות הצללה של 0.5 ומעלה
		

אנו מציעים לגבש על סמך סולם זה יעדי מינימום לתכנון רחובות חדשים בכל הארץ. באשר להתערבות ברחובות קיימים, מתוך הכרה במגבלות המעשיות לביצוע פעולות לעיבוי צל ומתוך היכרות עם מצב ההצללה הבעייתי באין-ספור רחובות ומרחבים עירוניים בארץ, המלצתנו היא לאפשר לכל רשות עירונית גמישות בבחירה של דרגת ההצללה שהיא שואפת להגיע אליה באתרי ההתערבות שהיא קובעת בהתחשב ביכולותיה העכשוויות והעתידיות, ועם זאת לחייב הגעה לדרגת ההצללה הנמוכה ביותר בסולם זה (הצללה מתקבלת על הדעת בכל אחת מהמדרכות) כיעד שמתחתיו רחוב לא יוכל להיחשב כרחוב מוצל.

אנו מודעים לכך שכדי לעודד שינוי משמעותי במצב ההצללה ברחובות בערים רבות בישראל יש לקבוע יעדים עירוניים כוללים, כגון שיעור הרחובות שצריכים לעמוד בסף הצללה מסוים. עם זאת, אנו סבורים כי קביעת יעדים כאלה אפשרית רק על סמך ניתוח שיטתי של המצב הקיים ושל היקף ההשקעה הכלכלית הדרוש למימוש היעדים העירוניים. מדד זמינות ההצללה מאפשר כעת לבצע הערכות מושכלות הנוגעות לכך, ואנו ממליצים להימנע מקביעת יעדים כמותיים גורפים בטרם מבוצעות הערכות כאלה, מאחר שהיעדים עשויים להתגלות כחסרי היתכנות בטווח הקצר או הארוך.

קביעת יעדים כמותיים הנוגעים להצללה תלויה גם בפיתוח כלי חישוב אחידים ופתוחים לשימוש בידי כל גורמי התכנון שעשויים להיות מעורבים בקידום מצב ההצללה במרחב העירוני, החל מגופים ממשלתיים וציבוריים וכלה במתכננים הפועלים בשוק הפרטי. המדדים שהצגנו בעבודה זו פותחו מתוך מחשבה על יישום פשוט שלהם בתוך כלי חישוב דיגיטליים. ללא פיתוח כלים כאלה יהיה קשה לבצע מעקב יעיל אחר יישום תוכניות הצללה המקודמות כיום או שיקודמו בעתיד, ויהיה קשה גם לוודא כי אימוץ המדדים שהוצגו בעבודה זו יהיה נכון או מדויק, אף על פי שאופן חישוב המדדים מוצג כאן בבהירות. מעבר לכך, ללא אימוץ מדדים כמותיים אחידים וכלי חישוב אחידים יהיה קשה לבחון את קידום נושא ההצללה במרחבים העירוניים ברמה השוואתית בין ערים שונות בישראל ולעדכן על סמך בחינה כזאת את יעדי ההצללה הלאומיים. אימוץ שיטת מדידה אחידה להצללה במרחב העירוני הוא הכרחי שבלעדיו תתקשה המדינה לקדם ביעילות ובאפקטיביות את הנושא, על אף החלטות שהתקבלו ברמה הארצית

או העירונית עד היום.

לסיום, יש להדגיש כי המדד המוצג במדריך זה מיועד לתכנון הצללה במדרכות בלבד, מתוך מחשבה על הבטחת הצללה לתנועה רגלית או לא-מנועית במרחב העירוני. אף על פי שניתן לפתח את התפיסה העומדת מאחורי מדד זה ולהרחיבה גם לשימושי קרקע אחרים בעיר שנדרשת בהם הצללה, כגון כיכרות, פארקים וגנים ציבוריים, גני משחקים, צמתים מרכזיים ורחבות כניסה לבנייני ציבור, כדי לעשות זאת יש צורך בעבודה משלימה שתבחן את צורכי ההצללה בכל אחד מהשימושים האלה ואת המדדים הכמותיים הנגזרים מהם ביחס להצללתם.



ביבליוגרפיה

אילון, י. (2015). תכנון בר-קיימא של עצי רחוב. אדריכלות נוף, 54, 28-26.

אלכסנדרוביץ', א., צור, ש., לבנדיגר, י., לרמן, י. (2019). מפות צל והשימוש בהן לטובת שימור ועיבוי צל בתל אביב-יפו - דו"ח מסכם. מחלקת השימור, עיריית תל אביב-יפו.

גלון, י., הלה, א. (2013). מדריך עצי הרחוב בישראל. משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמשרד להגנת הסביבה.

דגן, ש. (2010). מדוע אוגוסט הוא החודש החם בשנה? מכון דוידסון, הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

הירש, ת., צור, ש. (2017). תא/9083, מסמך הנחיות לתכנון צל במרחב הציבורי, עבור תכניות פיתוח ועיצוב אדריכלי ופרוייקטים עירוניים במרחב"צ. משרד אדריכל העיר - מנהל הנדסה, עיריית תל אביב-יפו.

הוועדה המיוחדת לזכויות הילד, ישיבה מיום 14.7.2015, בנושא הצללה במגרשי משחקים. פרוטוקול מס' 8.

החלטה מספר 1022 של הממשלה מיום 23.1.2022. הצללה וקירור של המרחב העירוני באמצעות עצי רחוב במסגרת היערכות לשינויי האקלים.

הכנסת - מרכז המחקר והמידע (2022). מדיניות הצללה במרחב הציבורי.

המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה (2022). קידום עצי

רחוב בערי ישראל - הצללה וקירור של המרחב העירוני באמצעות עצי רחוב כהיערכות לשינויי האקלים, סיכום והמלצות בעקבות שולחן עגול ממשלתי בנושא ייעור עירוני.

המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, המועצה הלאומית לכלכלה (2022). תכנית אסטרטגית לאומית להצללה וקירור במרחב העירוני באמצעות עצים.

ילינק, א., שוויץ, ק. (2023). תוכנית אסטרטגית לאומית להצללה ולקירור במרחב העירוני באמצעות עצים. המועצה הישראלית לבנייה ירוקה.

צור, ש. (2018). הנחיות לפרטי נטיעה ומרחב מחייה לעצי רחוב בתל אביב. עיריית תל אביב-יפו.

שפירא, נ., אלכסנדרוביץ', א. (2024). סקירה וניתוח שיטות להערכה, לכימות ולקידום הצללה במרחב העירוני. מעבדת BDAR ומוסד שמואל נאמן.

Abu Dhabi Urban Planning Council (2010). *The Pearl Rating System for Estidama Community Rating System.*

Abu Dhabi Urban Planning Council (2016). *The Pearl Rating System for Estidama Public Realm Rating System.*

Aleksandrowicz, O. (2022). Mapping and management of urban shade assets: a novel approach for promoting climatic urban action. In A. Khan, H. Akbari, F. Fiorito, S. Mithun, & D. Niyogi (Eds). *Global Urban Heat Island Mitigation* (pp. 1-27). Elsevier Amsterdam.

Aleksandrowicz, O., & Ozery, E. (2023). A Parametric Tool for Outdoor Shade Design: Harnessing Quantitative Indices and Visual Feedback for Effective and Efficient Climatic Design of Streets. In M. Turrin, C. Andriotis, & A. Rafiee (Eds.), *Computer-Aided Architectural Design. INTERCONNECTIONS: Co-computing Beyond Boundaries* (pp. 302-316). Springer Nature Switzerland.

Aleksandrowicz, O., & Pearlmutter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588.

109

Aleksandrowicz, O., Zur, S., Lebendiger, Y., & Lerman, Y. (2020). Shade maps for prioritizing municipal microclimatic action in hot climates: Learning from Tel Aviv-Yafo. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101931.

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

Coutts, A., & Tapper, N. (2017). Trees for a Cool City: Guidelines for optimised tree placement. Melbourne Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.

Low Carbon Living CRC (2017). Guide to Urban Cooling Strategies.

McPherson, E. G., Xiao, Q., van Doorn, N. S., Johnson, N., Albers, S., & Peper, P. J. (2018). Shade factors for 149 taxa of in-leaf urban trees in the USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31(March), 204-211.

Middel, A., AlKhaled, S., Schneider, F. A., Hagen, B., & Coseo, P. (2021). 50 grades of shade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(9), E1805-E1820.

Nature's Cooling Systems Project (2019). *Heat Action Planning Guide, for Neighborhoods of Greater Phoenix*. Creating Urban Heat Solutions in the Valley of the Sun.

Peeters, A., Shashua-Bar, L., Meir, S., Shmulevich, R. R., Caspi, Y., Weyl, M., Motzafi-Haller, W., & Angel, N. (2020). A decision support tool for calculating effective shading in urban streets. *Urban Climate*, 34, 100672.

Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2010). 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(1), 44-57.

Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 162-170.

Stoneham, M., Earl, C., & Baldwin, L. (2007). *Creating shade at public facilities: Policy and guidelines for local government* (Edition 2). Australian Institute of Environmental Health (AIEH), Australia.

Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., & de Vries, S. (2005). Benefits and uses of urban forests and trees. In C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (Eds). *Urban Forests and Trees* (pp. 81-114). Springer.

Wolf, K. L. (2005). Business district streetscapes, trees, and consumer response. *Journal of Forestry*, 103(8), 396-400.



תודות

אנו מבקשים להודות לפרופ' אדר' נעמי אנג'ל, לפרופ' אדר' שמאי אסיף, לפרופ' אביתר אראל, לאדר' איריס גבעולי ולאדר' נוף טלי וקסלר על ההערות והתובנות החשובות שחלקו איתנו במהלך הכתיבה. תודה מיוחדת שמורה לאנדי בניקה מקרן יד הנדיב ולנעם בר לוי, לאור קונפורטי ולד"ר עומרי חסון מהמרכז לייעור עירוני ולהצללה במועצה הישראלית לבנייה ירוקה על הליווי הצמוד והתמיכה בכל תהליך העבודה. אנו מבקשים להודות גם לטל מילס, מנכ"לית המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, ולשיר לבנון, מנהלת הכשרות וקהילה מהמרכז לייעור עירוני ולהצללה, על הסיוע הנוסף בקידום ובפרסום של העבודה. החוקרים מבקשים עוד להודות ליד הנדיב על מימון המחקר, ולאלה ברזני ממוסד שמואל נאמן על הסיוע באיתור מקורות מידע רלוונטיים.



נספח א' | מדד ההצללה המרחבי

מדד ההצללה המרחבי מספק כימות יחסי של כמות הקרינה הנבלמת במפלס הרחוב ביום קיץ טיפוסי. הוא מחושב על בסיס מיפוי תלת-ממדי ברזולוציה גבוהה של פני השטח הקיימים במרחב הבנוי, תוך הבחנה בין מבנים לעצים. מבחינה חישובית, הבחנה זו נחוצה משום שנוף העץ רחב מגזע העץ, והצל שהוא מטיל מתבטא גם בחלל הנמצא ישירות מתחתיו. המדד מביא בחשבון את השונות בעוצמת קרינת השמש לאורך שעות היום, ומשווה בין עוצמת הקרינה המצטברת בנקודה מסוימת במרחב לאורך אותן שעות ביחס לעוצמת הקרינה המצטברת בנקודה היפותטית חשופה לחלוטין לקרינת שמש ישירה לכל אורך זמן המדידה. הנוסחה המשמשת לחישוב המדד היא:

115

$$SI_p = 1 - \left(\frac{Insolation_p}{Insolation_r} \right)$$

כאשר SI_p הוא מדד ההצללה בנקודה מסוימת, $Insolation_p$ הוא עוצמת החשיפה לשמש בנקודת המדידה של רמת ההצללה, ו- $Insolation_r$ הוא עוצמת החשיפה לשמש בנקודת הייחוס שחשופה תמיד לקרינה. מכאן

נובע כי ככל שרמת ההצללה גבוהה יותר, כך ערך מדד ההצללה קרוב יותר ל-1.

רזולוציית החישוב של מדד ההצללה תלויה באיכות המיפוי שהיא מתבססת עליו. עם זאת, כדי לשקף הבדלים משמעותיים בעוצמת החשיפה של גוף האדם, מומלץ לחשב את המדד במרווחים שלא יעלו על 50 ס"מ. המדד מחושב כערך הצללה ממוצע ליחידת שטח מוגדרת, לרוב מקטע רחוב או שכונה, על בסיס חישוב ערכי מדד ההצללה הבודדים בכל נקודת דגימה הכלולה ביחידה השטח. באופן עקרוני, ניתן לחשב את מדד ההצללה המרחבי לא רק לכלל זכות הדרך אלא גם לכל מדרכה בנפרד, אולם בהיעדר מיפוי מדויק של מדרכות ברוב הערים בישראל, אין זה מעשי כרגע להפיק מפות צל במדרכות בלבד, בלי להביא בחשבון את ההצללה בשטח המיסעה.

116

כדי לשקף את רמת ההצללה הממוצעת לאורך יום קיץ טיפוסי, מפות הצל מציגות את מדד ההצללה המרחבי שמביא בחשבון את עוצמת החשיפה המצטברת של פני הקרקע בין השעות 8:00 ו-17:00 (שעון קיץ) ב-6 באוגוסט, שהוא יום האמצע בין היום הארוך ביותר בשנה (21 ביוני) ליום השוויון הסתווי (22 בספטמבר), ומייצג בישראל גם את שיא עומס החום השנתי הנובע מרמת טמפרטורת האוויר בשעות היום. ניתן, עם זאת, לחשב מדדי הצללה מרחביים לתקופות זמן אחרות (לשעות בודדות או לימים אחרים), אולם הם עשויים להניב תוצאות אחרות בשל ההבדלים בכיווני פגיעת קרינת השמש ובעוצמתה בתקופות שונות של השנה.

הפקת מפות צל על בסיס מדד ההצללה המרחבי נעשית באמצעות ניתוחים וחישובים מרחביים בסביבת ממ"ג (GIS). נתוני הקלט הדרושים להפקת מפות צל עירוניות הם:

• מודל גבהים דיגיטלי של פני השטח (DSM) ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל.

• מודל גבהים דיגיטלי של פני הקרקע (DTM) ברזולוציה של 0.5 מטר לפיקסל.

• קובץ וקטורי של חופת העצים בעיר.

• קובץ וקטורי של ייעודי הקרקע בעיר.

• קובץ וקטורי של ההיטל האופקי של כל הבניינים בעיר (לא חובה אך מומלץ מאוד).

אם ניתן, רצוי לספק גם את השכבות הבאות:

• אורתופוטו (רצוי כזה הכולל ערוץ NIR) ברזולוציה של 0.2 מטר לפיקסל, תואם ל-DSM. האורתופוטו יכול לסייע באיתור שגיאות בשכבות המיפוי האחרות.

• אם רוצים לחשב שיעור הצללה ביחידות מרחביות שכונתיות שאינן אזורים סטטיסטיים, קובץ וקטורי של גבולות שכונתיים בתוך העיר.

• אם רוצים לחשב שיעור הצללה במדרכות, קובץ וקטורי של קווי המתאר של כל המדרכות בעיר.

- אם רוצים לחשב צפיפות נטיעת עצים בעיר ואת השפעתה על תנאי ההצללה ברחובות ובשטחים ציבוריים פתוחים, קובץ וקטורי המכיל מיקומים מדויקים של כל גזעי העצים בעיר.

חשוב לציין כי מפות הצל מציגות תמונת מצב זמנית שעשויה להשתנות מהותית בעקבות שינויים במרחב העירוני (התחדשות עירונית, כריתות עצים או נטיעות עצים). לכן, אנו ממליצים להפיק מפות צל במרווחי זמן של אחת לשלוש עד חמש שנים לכל הפחות בהתאם לאינטנסיביות פעולות הפיתוח בעיר. מכאן גם שחשוב לוודא ברמה הלאומית שנתוני הבסיס הנחוצים להפקת מפות הצל מופקים בתדירות דומה או גבוהה יותר.

באמצעות עיבוד וניתוח של נתוני המיפוי הגולמיים שפורטו לעיל, ניתן להפיק את מפות הצל הבאות:

- מפה המציגה את מדד ההצללה המרחבי במקטעי רחובות ובשטחים פתוחים.
- מפה המציגה את מדד ההצללה המרחבי במקטעי רחובות ובשטחים פתוחים בהחרגת השפעת העצים על מדד זה.
- מדד ההצללה המרחבי באזורים סטטיסטיים, לפי החלוקה העדכנית לאזורים סטטיסטיים של הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, או לפי כל חלוקה מרחבית אחרת שבידי כל עירייה (רבעים, שכונות, מרחבי תכנון).
- מדד ההצללה המרחבי באזורים בהחרגת השפעת העצים על מדד זה.



נספח ב' | Kikayon, קוד פרמטרי לחישוב הצללה ברחובות

הקוד Kikayon הוא קוד גראסהופר שפיתחו אור אלכסנדרוביץ' ועזרא עוזרי בעבודה שמימנה יוזמת ישראל 100.²⁹ הקוד מאפשר לערוך בחינה פרמטרית של השפעת תכנון רחובות על תנאי ההצללה השוררים בהם, לבחון תרחישי הצללה שונים ולהעריך, על בסיס מדדים כמותיים, את השפעתם על שיפור תנאי ההצללה ברחוב. הקוד קולט לתוכו תכנון תלת-ממדי של מקטע רחוב, ומחשב על פיו את ערכיהם של שני מדדי הצללה שונים:

- מדד ההצללה המרחבי (Shade Index): כמפורט בנספח א' של מסמך זה.
- מדד זמינות ההצללה (Shade Availability Index): כמפורט בגוף מסמך זה.

מדד ההצללה המרחבי מחושב עבור כמה מחלקי הרחוב, כדלקמן:

- זכות הדרך (Right of way) בכללותה: כלל שטח מקטע הרחוב, הכולל

29 Aleksandrowicz, O., & Ozery, E. (2023). A Parametric Tool for Outdoor Shade Design: Harnessing Quantitative Indices and Visual Feedback for Effective and Efficient Climatic Design of Streets. In M. Turrin, C. Andriotis, & A. Rafiee (Eds.), *Computer-Aided Architectural Design. INTERCONNECTIONS: Co-computing Beyond Boundaries* (pp. 302-316). Springer Nature Switzerland.

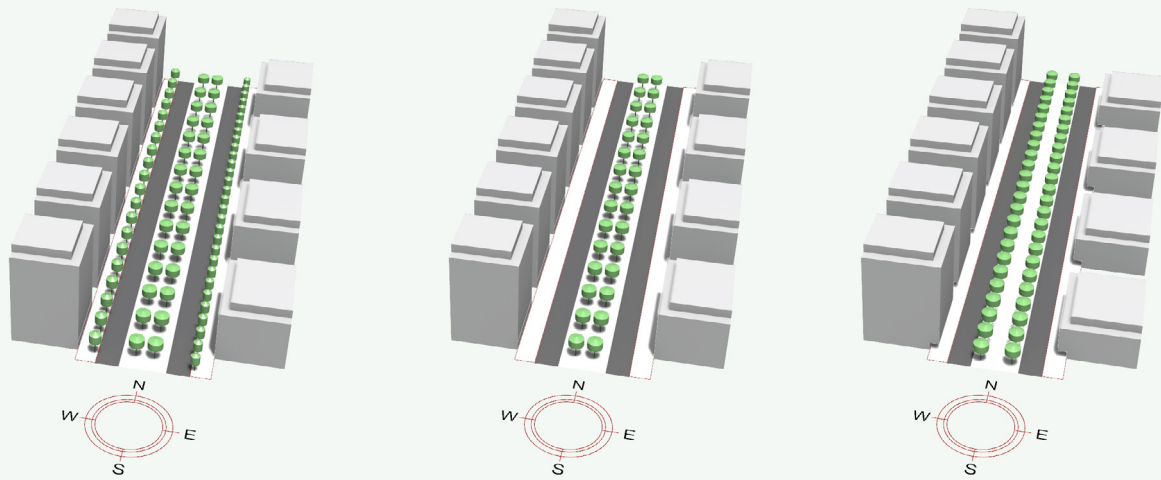
- את שתי המדרכות, הכביש והשדרה (אם קיימת).
 - **הכביש (Road):** השטח הכולל המוקצה למעבר מכוניות וכלי רכב, ובמקרה שבמרכז הרחוב מתוכננת שדרת הליכה - שטח הכביש כולל את שתי המיסעות התוחמות את השדרה משני עבריה.
 - **מדרכה שמאלית (Sidewalk 1):** לא כולל שטח פרטי פתוח הנמצא בין קו המגרש הקדמי לקו הבניין הקדמי.
 - **מדרכה ימנית (Sidewalk 2):** לא כולל שטח פרטי פתוח הנמצא בין קו המגרש הקדמי לקו הבניין הקדמי.
 - **שדרת הליכה מרכזית (Boulevard),** אם קיימת.
- מדד זמינות ההצללה מחושב רק עבור המדרכות ושדרת ההליכה המרכזית, אם קיימת. נוסף על כך, הקוד מחשב שלושה מדדים כמותיים הנוגעים לעצים, אם הם משולבים בתכנון:
- **מספר עצים (Number of Trees):** המספר הכולל של העצים המתוכננים ברחוב, ללא הבחנה בין מיני העצים.
 - **צפיפות עצים ליחידת שטח (Trees per Dunam):** מספר העצים ל-1000 מ"ר שטח זכות דרך. הערך המומלץ הוא 10 עצים לדונם, אם תנאי השטח מאפשרים זאת.
 - **מדד כיסוי חופת עצים (Tree Canopy Cover):** היחס בין השטח הכולל של ההיטלים האופקיים של נוף העצים ברחוב לשטח הכולל של הרחוב (כלל זכות הדרך).

לצורך החישוב, על המשתמשים לבנות תחילה מודל תלת-ממדי של מקטע רחוב על ידי הזנת מידות או כמויות של מספר רב של רכיבים פיזיים המרכיבים את מודל הרחוב, כדלקמן:

- אורך מקטע הרחוב
- כיוון הרחוב
- רוחב רצועת התנועה
- רוחב רצועת החניה, בצד אחד של הרחוב או בשני הצדדים
- רוחב שדרת הליכה במרכז הרחוב, אם קיימת
- רוחב רצועת ההליכה
- רוחב רצועה לריהוט רחוב או ישיבה
- רוחב שביל אופניים
- רוחב רצועת נטיעות
- מספר הבניינים בכל צד של הרחוב
- עומק כל בניין בכל צד של הרחוב
- קו הבניין הקדמי וקווי הבניין הצידיים של קומת המסד בכל צד של הרחוב
- גובה קומת המסד בכל צד של הרחוב
- מספר הקומות הטיפוסיות מעל קומת המסד בכל צד של הרחוב
- גובה קומה טיפוסית בכל צד של הרחוב
- קו הבניין הקדמי וקווי הבניין הצידיים של קומה טיפוסית בכל צד של הרחוב
- מספר קומות הגג בכל צד של הרחוב
- קו הבניין הקדמי וקווי הבניין הצידיים של קומות הגג בכל צד של הרחוב

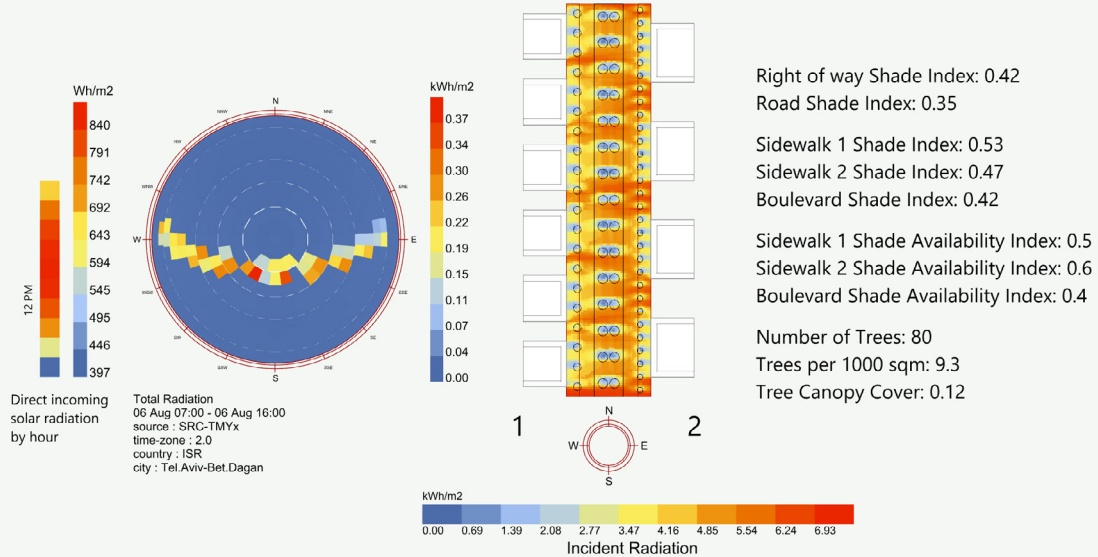
- גובה קומת גג בכל צד של הרחוב
- מספר שורות העצים בכל מדרכה או בשדרה המרכזית
- מיקום כל שורת עצים ביחס לאבן השפה
- מין העץ בכל אחת משורות העצים (מתוך רשימה מוגדרת מראש)
- מרווחי הנטיעה בין העצים בכל שורת עצים
- עומק גגון הצללה מעל קומת המסד בכל צד של הרחוב

לקבלת הקוד ניתן לפנות לאור אלכסנדרוביץ', oraleks@technion.ac.il.



איור 25: מידול תרחישי תכנון שונים באמצעות הקוד הפרמטרי Kikayon.

125



איור 26: מסך התוצאות של Kikayon, המציג מבט על של הרחוב הממודל, תבנית פריסת הצל במפלס הרחוב וערכים מספריים שחושבו עבור כל אחד מהמדדים הכמותיים.



על המחברים

ד"ר אור אלכסנדרוביץ'

אדריכל וחבר סגל בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון, ראש המעבדה לנתוני עתק במחקר אדריכלי (מעבדת BDAR).

נעמה שפירא

חוקרת מדיניות סביבה ואנרגיה במוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.

מישל קלארק לוינסון

בוגרת תואר שני במחלקה למדעי הסביבה, גאואינפורמטיקה ותכנון ערים באוניברסיטת בן-גוריון בנגב ועוזרת מחקר בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון.

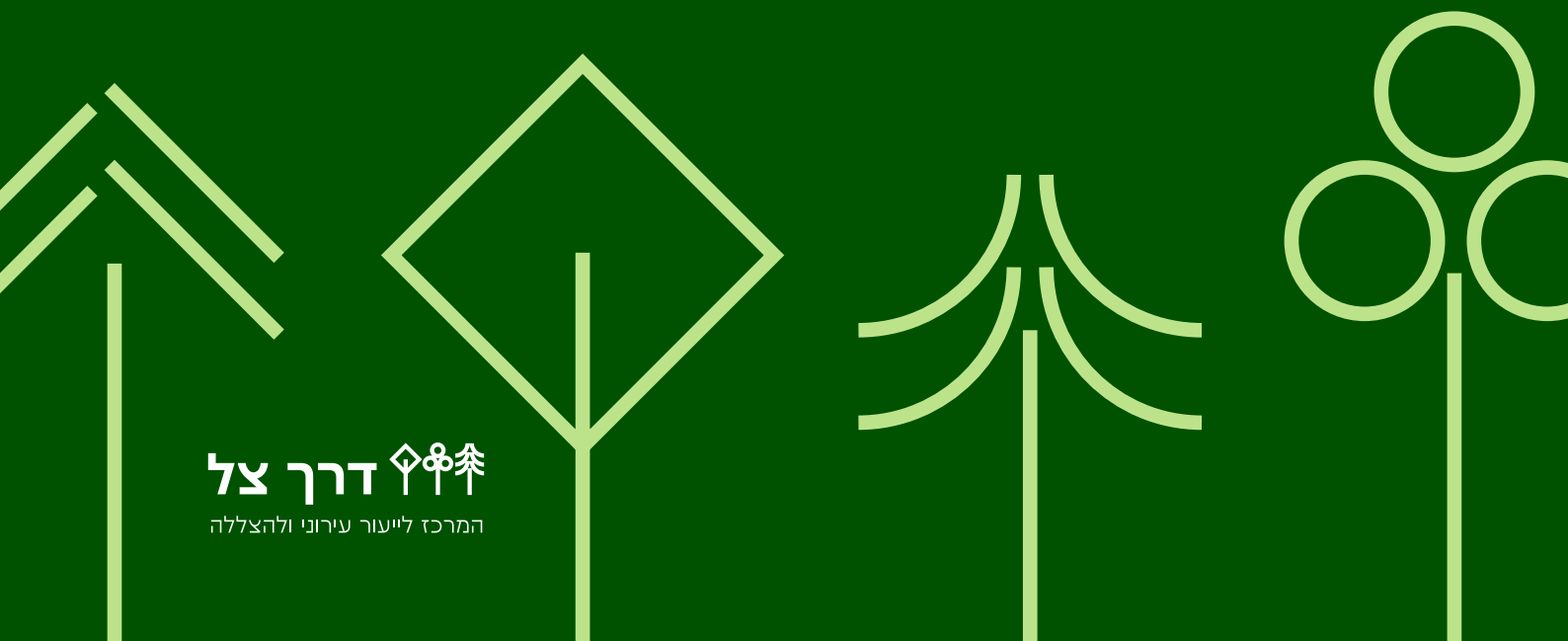
אדר' נוף שחר צור

עמית מחקר חבר ומרצה במסלול לאדריכלות נוף בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון, מתכנן, יזם וחוקר בתחום היער העירוני.

פרופ' דויד פרלמוטר

אדריכל וחבר סגל במחלקה למדעי הסביבה, גאואינפורמטיקה ותכנון ערים באוניברסיטת בן-גוריון בנגב.





המרכז לייעור עירוני ולהצללה

דרוך צל