



# צל ערים

מצילים את המרחב הציבורי

### הצללה אורבנית: חוויה אקלימית וחזותית

25 אוקטובר, 2015 / ערן קפטן

**מאמר זה נכתב עבור התערוכה צל ערים ופורסם בספר התערוכה הכולל מאמרים אקדמיים נוספים. לפרטים נוספים על הספר ולרכישה לחץ כאן <<**

ד"ר ערן קפטן הוא אדריכל, מנהל ומייסד מחקר ואקו-אדריכלות. בעל תואר שלישי מאוניברסיטת בן גוריון, המחלקה לאדריכלות מדברית, ותואר שני באדריכלות מאוניברסיטת אריזונה, במגמת תכנון אדריכלי לחסכון באנרגיה. מפתח מודל לחישוב הצללה אופטימאלית, אשר שולב בתכנית Ecotect-Autodesk ו-Shaderade (אוניברסיטת הרווארד)

רוב המרחב הציבורי בערי ישראל חשוף לשמש הקיץ הקופחת. בעקבות זאת, תושבי העיר ומבקריה מצמצמים את השהות במרחב הציבורי הפתוח ואף מדירים ממנו את רגליהם לטובת מרכזי קניות ממוזגים. כדי לנצל באופן מיטבי את הסביבה האורבנית בארץ שטופת שמש כארצנו, יש צורך בהצללה רבה באזורי מפתח כגון כיכרות, מדרכות, תחנות אוטובוס ואזורי ישיבה ומפגש בגנים. הצללה איכותית באזורים אלו תתרום רבות לחוויה האורבנית, הן מבחינת האקלים הן מבחינת חזות פני העיר.

תכנון מושכל של הצללה יאפשר שיפור של תחושת הנוחות בכל עונות השנה: באמצעות הצללה נכונה ניתן להפחית את עומס החום ומידת הסגור בעונה החמה, ומנגד, לאפשר חשיפה ניכרת לקרינת השמש ורמה מספקת של תאורה טבעית בעונה הקרה.

הצללה איכותית יכולה גם להעשיר את החוויה החזותית, על ידי יצירת סביבה מגוונת ודינמית, הכוללת שינוי מחזורי בתבניות האור והצל על פי עונות השנה ושעות היום. שימוש בעקרונות התכנון של תאורה טבעית בבניינים גם לצרכי הצללה יכול להניב מרחבים ציבוריים פתוחים ומעניינים, שאינם נופלים בחשיבותם מן המרחבים המקורים.

על מנת לממש את החוויה האורבנית המלואה, על מתכנני ההצללה: להתייחס לאקלים ולחזות גם יחד. התייחסות רק לאחד משני ההיבטים תשפר את המרחב הציבורי, אך לא תביא למימוש הפוטנציאל הגלום בו.

#### השגת נוחות אקלימית במרחב האורבני באמצעות הצללה

##### הפחתת עומס חום

העיקרון החשוב ביותר בתכנון מערכת הצללה הוא צמצום מרבי של מעבר קרינת השמש אל הסביבה המיועדת לפעילות הולכי הרגל ברוב שעות האור של העונה החמה. בפועל, מערכות הצללה רבות כושלות בהצללת סביבת הפעילות, מכיוון שתוכננו להתפרש מעל סביבת הפעילות ובלא התייחסות למיקום השמש, המשתנה לאורך היום והשנה. המפתח לצמצום קרינת השמש באמצעות הצללה הוא הכרת מסלול השמש ברקיע, המשפיע על שינוי מיקום הצל מעונה לעונה ולאורך שעות היממה.

בעונת הקיץ, בשעות הצהריים השמש גבוהה, ולפיכך השטח המוצל אכן ייצא מתחת למערכת ההצללה (בסטיות קלות צפונה, מזרחה או מערבה, על פי השעה). לעומת זאת, בשעות הבוקר ואחר הצהריים בעונת הקיץ (וכן בכל שעות היום בעונת החורף), השטח המוצל ייצא בסטייה ניכרת ממערכת ההצללה, ולכן במקרים רבים השטח המוצל ייצא מחוץ לסביבת הפעילות.

בעבר, תכנון מערכות הצללה הסתמך על שרטוט דו-ממדי וניסוי בדגמים פיזיים (בקנה מידה קטן), שלצורך הכנתם ובדיקתם נדרש מאמץ רב. ואולם כיום, תוכנות ממוחשבות להדמיה תלת-ממדית של מסלול השמש וההצללה מאפשרות לקבל מידע מדויק לתכנון מערכת הצללה אופטימלית.

מערכות הצללה שונות מספקות מגוון רמות ותבניות הצללה: מהצללה מלאה ועד הצללה מעטה, מהצללה נרחבת ועד הצללה מבזרת. חשוב לדעת, שאף על פי שהצללה חלקית (הנוצרת על ידי מערכת הצללה "מחוררת" או בעלת שקיפות חלקית) מעשירה את החלל באיכויות חזותיות, לרוב, ובייחוד באקלים חם, היא לא תאפשר נוחות אקלימית (בייחוד באזורים המיועדים לישיבה או לשהייה ממושכת).

##### הימנעות מהצללת יתר

לעתים תכופות, מערכות הצללה מטילות צל על סביבת הפעילות גם בעונה הקרה, ובכך מונעות את חשיפתה לקרינת השמש, הנדרשת להשגת נוחות אקלימית וחזותית בעונה הקרה. כדי לתת מענה לבעיה זו בסביבה המיועדת לפעילות במשך כל השנה, יש לתכנן מערכת הצללה אופטימלית: מערכת קבועה אשר צורתה הכללית (או לחלופין זווית רפפות ההצללה) מביאה בחשבון שוני בזוויות השמש הדרומיות (גבוהות בקיץ ונמוכות בחורף), כדי לספק את מרב הצל בקיץ ומעט צל בחורף. בעיצוב מערכת הצללה כזו נדרשת פשרה על מנת לתת מענה לדרישות המנוגדות של העונה החמה והקרה, ולפיכך היא תספק פתרון הולם בקיץ ובחורף, אך לא בעונות המעבר. אמנם, בעונות המעבר זוויות השמש זהות, אך באביב קרי יחסית ובסתיו חם יחסית, ולכן הצללה חלקית תצמצם את החשיפה לשמש הרצויה ברוב ימות האביב, אך לא תצל מספיק ברוב ימות הסתיו.

פתרון אחר הוא מערכת הצללה דינמית, המאפשרת הסרה עונתית של מערכת ההצללה או פתיחתה וסגירתה לסירוגין בשעות היום. מערכת זו אידאלית (אף בעונות המעבר) מבחינת אספקת צל מלא כאשר חם וחשיפה לשמש כאשר קר, ואולם לרוב היא יקרה וחשופה לתקלות. הצללה עונתית יכולה להיות מיושמת גם באמצעות צמחייה ועצים נשירים, אשר יכולים לספק הצללה בעונה

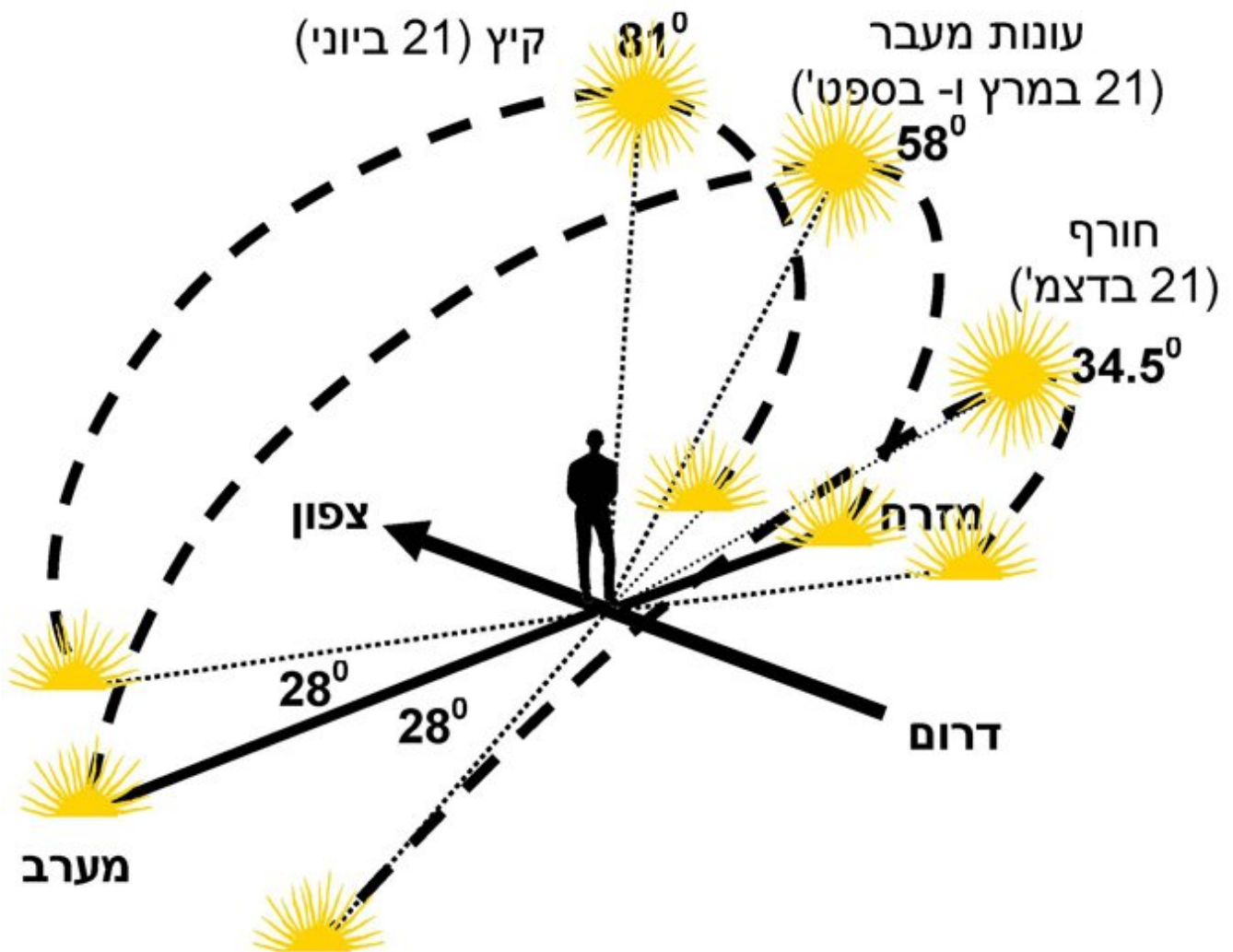
החמה וחשיפה לשמש בעונה הקרה, ובכך לשפר את הנוחות האקלימית בסביבה החיצונית בעונות השונות. ואולם חשוב להביא בחשבון כי מועדי נשירת העלים או התחדשות הסוכך אינם חופפים במדויק למועדים שבהם נדרשת הצללה או חשיפה לשמש. כמו כן, רצוי לשלב בסביבה האורבנית גם צומח ירוק-עד, כדי להבטיח הצללה ניכרת גם בעונות המעבר. אפשר למקם עצים ירוקי-עד באזורים שאינם חשופים לשמש בעונת החורף, כגון בצל בניינים. להצללה באמצעות עצים וצמחייה יתרונות רבים נוספים, כגון הפחתת רוח ואבק, סילוק פחמן דו-חמצני, יצירת תבניות צל מגוונות ודינמיות ועלות נמוכה יחסית. עם זאת, יש להביא בחשבון גם את החסרונות, כגון צריכת מים מוגברת והצורך בתחזוקה.

### מסלול השמש

מסלול השמש ברקיע הוא תוצאה של תנועת כדור הארץ סביב השמש במהלך השנה וסביב עצמו במהלך היום בשילוב נטיית ציר הסיבוב. המסלול משתנה בין קווי רוחב גאוגרפי שונים (לדוגמה, בקו המשווה, בקטבים, בחוגים השונים בחצי הכדור הצפוני והדרומי). ואולם, באזורים השונים בישראל (הממוקמת בין קווי רוחב: חרמון 33 ואילת 29.5) מסלול השמש דומה יחסית.

מסלול השמש ניתן לאפיין סכמתי באמצעות קשתות המחברות את מיקום השמש בעת זריחה, בצהרי היום ובשקיעה, בארבעת הימים הייצוגיים: 21 ביוני (היום הארוך ביותר), 21 במרס או בספטמבר (ימי השוויון) ו-21 בדצמבר (היום הקצר ביותר). מיקום השמש נקבע באמצעות שתי זוויות: אנכית (מעל האופק) ואופקית (ביחס לכיוון הצפון). הזווית האופקית קובעת את כיוון הצל הזווית האנכית קובעת את עומק הצל (ועומק חדירת השמש).

בישראל, הזווית האנכית בצהרי היום נעה בין 34.50 בחורף ל-81 בקיץ (עבור קו רוחב 32 - לדוגמה, תל אביב), כאשר הזווית האופקית בשעה זו היא לכיוון דרום, ומיקומה המדויק תלוי במיקום היום במהלך השנה. הזווית האופקית של הזריחה והשקיעה היא בדיק בכיוון מזרח ומערב רק בימי השוויון, ובשאר ימות השנה הזריחה והשקיעה הן בסטייה צפונה (בקיץ) ודרומה (בחורף); הסטייה המרבית (280) היא ביום הארוך ביותר והקצר ביותר.



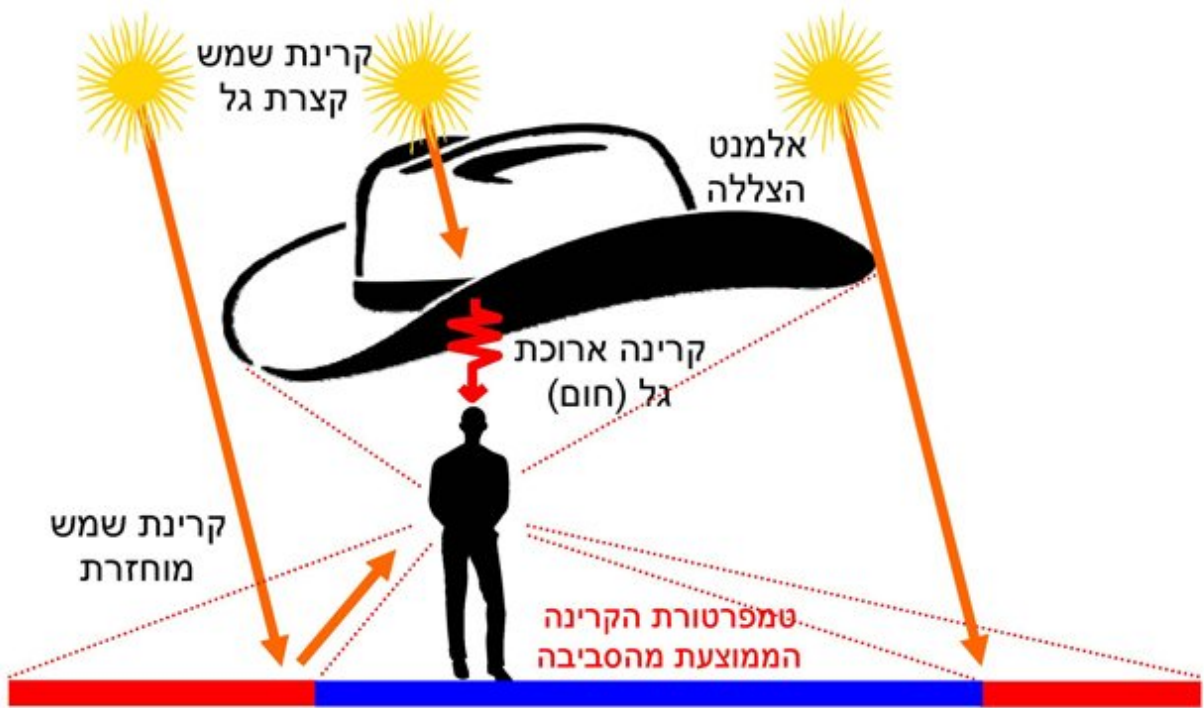
## סכמת מסלול השמש המקומי (בתל אביב)

סכמת מסלול השמש המקומי (תל-אביב)

### היבטים נוספים בהפחתת עומס החום באמצעות הצללה

מלבד צמצום קרינת השמש הישירה, בתכנון ההצללה רצוי להביא בחשבון עוד כמה גורמים המשפיעים על היווצרות עומס חום: קרינת שמש "מפוזרת", המגיעה מהרקיע, וקרינה "מוחזרת", המגיעה מהסביבה (מריצוף בהיר, בך כתמים וכד') עלולות גם הן

לגרום לעומס חום. לפיכך, רצוי שתכנון מערכת ההצללה יצמצם גם את החשיפה לרקיע ולאזורים המועדים להחזר ניכר של קרינת שמש.



## סכמה של היבטים נוספים בהפחתת עומס חום באמצעות הצללה

עומס חום נוסף, אשר מקורו בקרינת השמש, נגרם כאשר קרינת שמש קצרת גל פוגעת במערכת ההצללה ובסביבתה הקרובה וגורמת להתחממות. בעקבות זאת הן פולטות קרינה ארוכת גל ומשחררות חום לאוויר. ניתן להשוות זאת למצב שבו האדם מוגן מהשמש הקופחת אך הוא עומד ליד תנור חימום חשמלי המקרין חום (כגון תנור ספירלה). ניתן לצמצם את עומס החום הזה על ידי שימוש במערכת הצללה בעלת גימור בגוון בהיר. הגוון הבהיר מחזיר את מרבית הקרינה קצרת הגל אל השמים, ובעקבות זאת מערכת ההצללה מתחממת אך מעט. ניתן להפחית את עומס החום גם על ידי מערכת הצללה מחומר מבודד או על ידי חיפוי בחומר מבודד מתחתיה. צמצום קרינה ארוכת גל מהסביבה (מריצוף, קירות וכד') יכול להיעשות גם על ידי שימוש בגימור בגוון בהיר, ואולם במקרה זה, חשוב לוודא שהקרינה המוחזרת מהסביבה לא תפגע באזור ששוהים בו אנשים. פתרון מוצלח לצמצום עומס החום מהסביבה הקרובה (הנובע הן מקרינה ארוכת גל הן מקרינה קצרת גל) הוא שילוב של צמחים בסביבה.

בניגוד למרבית מערכות הצללה, אשר מונעות מעבר קרינת שמש ישירה אך מתחממות מאוד בעצמן, הצללה באמצעות עצים וצמחייה היא בעלת יתרון ייחודי התורם להפחתת עומס החום: הצמחייה עצמה נותרת קרה יחסית, לרוב בטמפרטורת האוויר, ובשל כך אינה מקרינה חום לסביבה. תופעה זו נובעת מאיבוד חום בתהליך התנדפות מים מהעלים ומשחרור מוגבר של חום בשל שטח הפנים הרחב של הצמחים. לפיכך ניתן לכוון הצללה באמצעות צמחייה "הצללה קרה".

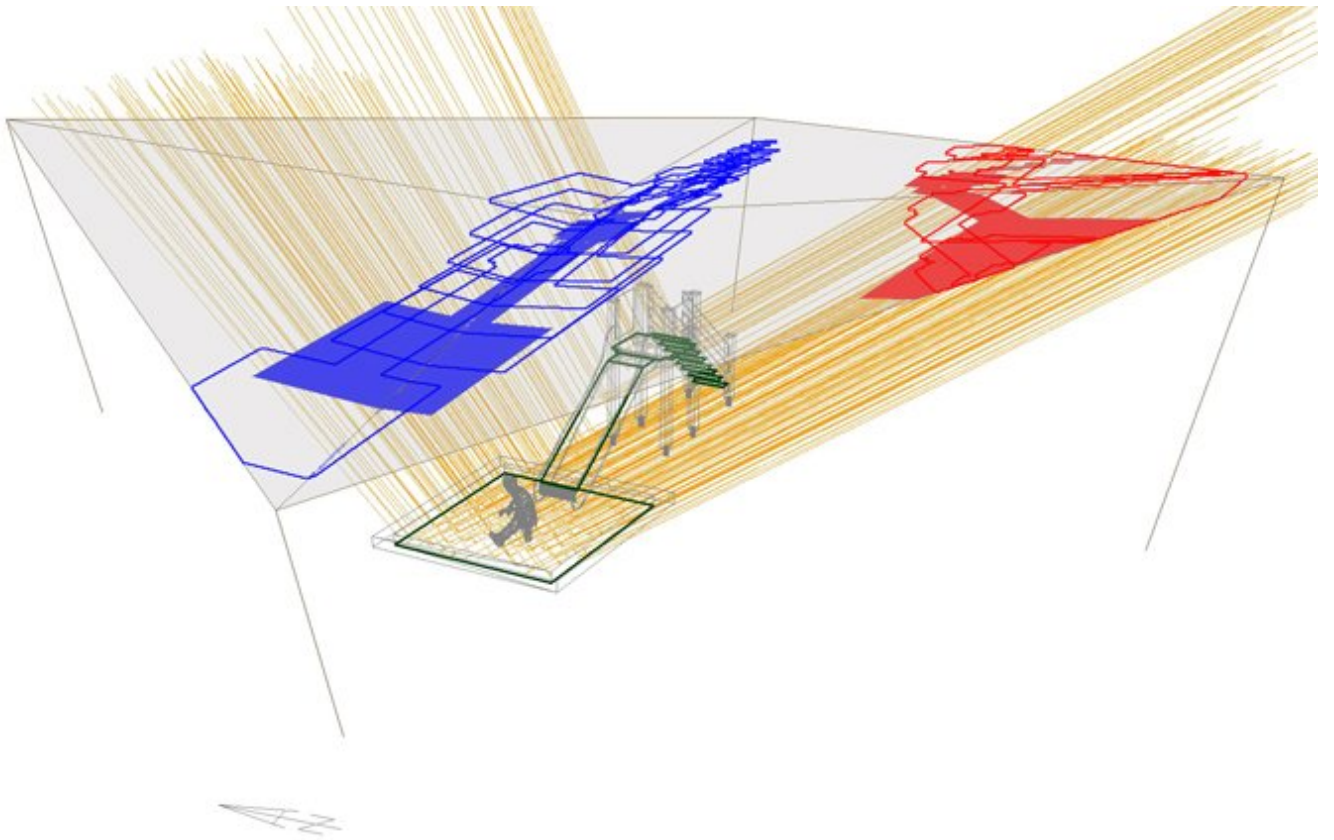
תחושת עומס החום תלויה גם בטמפרטורת האוויר. תכנון שגוי של אמצעי הצללה, הגורם לכליאה של אוויר חם מתחתיו, יכול לגרום לעלייה ניכרת בטמפרטורת האוויר בשל "אפקט חממה". אפקט החממה צפוי להיווצר בייחוד כאשר מערכת ההצללה, מצד אחד, שקופה למחצה (או פולטת חום רב), ומצד אחר, אינה מאפשרת שחרור אוויר חם המצטבר תחתיה. הפתרון לבעיה זו הוא שימוש בהצללה המאפשרת אוורור טבעי או סילוק האוויר החם באמצעים אחרים. כמו כן, מערכת הצללה החוסמת את הרוח ומקטינה את זרימת האוויר הטבעית בסביבת האדם תגרום לצמצום קצב שחרור החום מגוף האדם (והקירור הנלווה לתהליך התנדפות הזיעה), ובכך תגדיל את עומס החום. גם במקרה זה, הפתרון הוא הצללה המאפשרת אוורור טבעי או שילוב של מערכות אוורור מכניות.

### שיטה מתקדמת לחישוב מערכת הצללה אופטימלית

באמצעות הדמיות צל המשולבות בתוכנות תלת-ממד, ניתן לתכנן מערכת הצללה אשר תספק הצללה אופטימלית. ואולם תהליך זה דורש בדיקת חלופות רבות וכן בחירה נכונה של צורת המערכת. השיטה המוצעת להלן מאפשרת תכנון הצללה אופטימלית ללא צורך בבחינת חלופות, באמצעות מיפוי רמת החשיבות של אספקת הצל (או לחלופין רמת החשיבות של מעבר קרינת השמש) מאזוריו השונים של המרחב המיועד למערכת ההצללה (1).

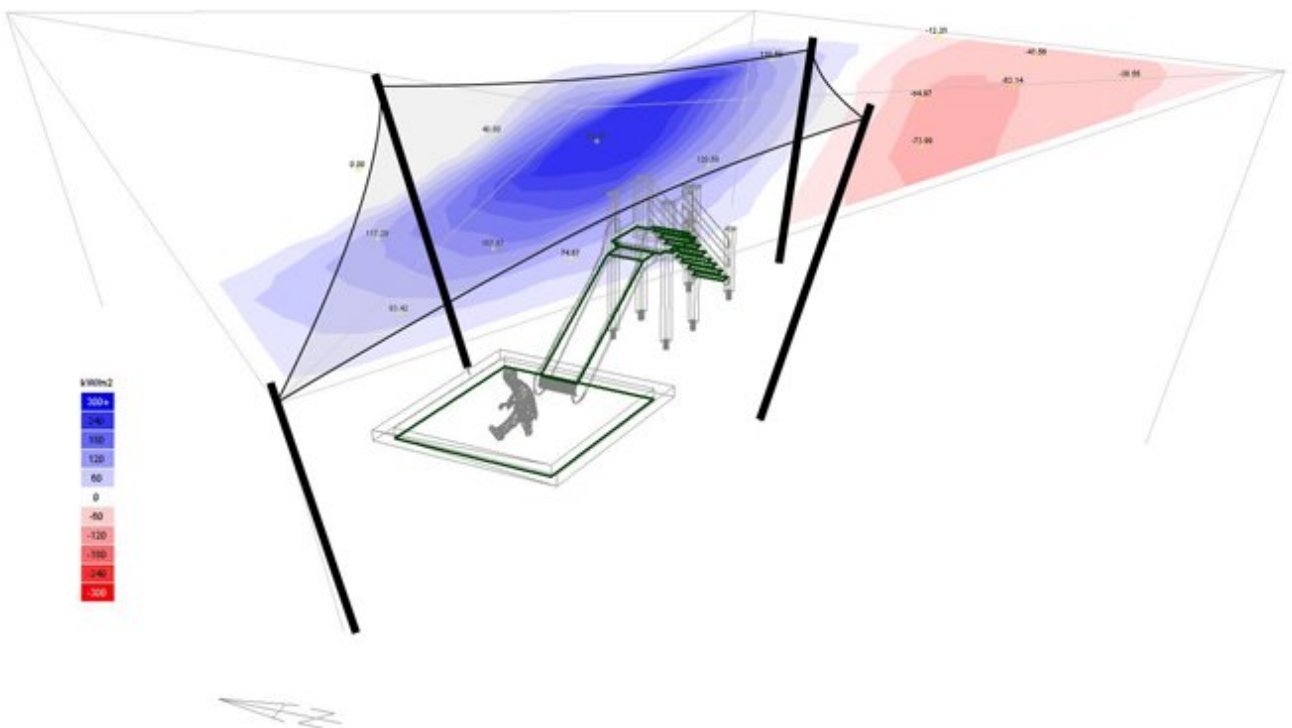
**בשלב הראשון:** מגדירים את אזורי הפעילות הנדרשים להיות מוצלים בקיץ וחשופים בחורף (בין שהאזורים חופפים בין נפרדים), כגון אזור המשחקים (המוצג בסכמה בגוון ירוק), וכן את המרחב המיועד למערכת ההצללה (מוצג באפור בהיר).

**בשלב השני:** במרחב המיועד למערכת ההצללה, מחשבים את האזורים הרלוונטיים להצללת אזורי הפעילות בשעות השונות של העונה החמה. זאת על ידי חישוב "היטלי הצללה חוזרים" מהצל לכיוון השמש (על פי זוויות השמש) ועל גבי המרחב המיועד למערכת ההצללה. רצוי להקנות להיטלים השונים ערכים על פי עוצמת קרינת השמש באותה עת (מוצג בסכמה בגוונים כחולים).



**בשלב השלישי:** עורכים חישוב דומה לחישוב שבשלב השני, אלא שהפעם מוצאים את "ההיטל החוזר" מהאזורים המיועדים להיות חשופים לקרינת שמש בעונה הקרה, ומקנים להיטלים השונים ערכים שליליים (מוצג בסכמה בגוונים אדומים).

**בשלב הרביעי:** בכל נקודה ונקודה מסכמים את ערכי ההיטלים השונים, הן של העונה החמה הן של העונה הקרה (כאשר ערכי העונה הקרה מוחסרים מערכי העונה החמה). המיפוי המתקבל מאפשר לזהות אזורים הנדרשים לספק צל (בכחול) ואזורים הנדרשים לאפשר מעבר קרינת שמש (באדום), וכן לדרג את רמת החשיבות של ההצללה או מעבר הקרינה בתוך אזורים אלו (מוצג באמצעות עצמת הגוון).



**בשלב החמישי:** צורת מערכת ההצללה האופטימלית תכלול אזורים חשופים למתן צל (כחול כהה) רבים ככל האפשר, ואזורים בעלי חשיבות למעבר קרינת שמש (אדום כהה) מעטים ככל האפשר. עיצוב על פי נתונים אלו יניב מערכת הצללה אופטימלית קבועה, בעלת הממדים הקטנים ביותר הנדרשים כדי לספק לאזורי הפעילות צל רב ככל האפשר בעונה החמה וחשיפה רבה ככל האפשר

## שיפור החוויה החזותית במרחב הציבורי באמצעות הצללה

### יצירת סביבה מגוונת

ההצללה מכילה פוטנציאל להעשרת החוויה החזותית על ידי יצירת ניגודיות ברמות האור בסביבה החיצונית: ניגודיות הארה בשדה ראייה בודד וכן ניגודיות הנוצרת על ידי מעבר בין אזורים בעלי רמות אור שונות (מסביבה שטופת אור ועד סביבה חשוכה). אופי מערכת ההצללה יקבע אם הניגודיות תהיה חדה או רכה. הצל יכול להופיע בתבניות שונות, הן אזור מוצל נרחב הן שטחים קטנים של אור וצל, רבים ומבוזרים. מכיוון שמקור האור הטבעי - השמש - הוא דומיננטי, ההצללה יכולה ליצור גם צלליות שהן תבניות מוגדרות של אור או של צל. תבניות אלו יכולות להופיע כהדפס על הקרקע והקירות, או על מערכת ההצללה עצמה, כאשר מביטים דרכה למעלה.

### יצירת סביבה דינמית

שינוי בכיוון הצל ובעומקו על פי מסלול השמש ברקיע יוצר תבניות אור וצל משתנות, שמוסיפות למרחב ממד דינמי. השינויים מחזוריים ומותאמים לעונה ולשעה, ולפיכך מאפשרים חיבור לתחושת הזמן - הן לעונה והן לשעת היום. למעשה, כל מערכת הצללה יוצרת צל שאינו קבוע, ואולם ניתן לתכנן מערכות הצללה המגבירות ומדגישות את החוויה הדינמית ואת החיבור לזמן. הכרת מסלול השמש ושימוש בהדמיות הצללה יכולים לתמוך בתכנון מערכות הצללה שיספקו את החוויה הדינמית הרצויה לאורך כל השנה.

### יצירת המרחב

נוסף על גיוון החוויה החזותית במרחב האורבני, תכנון מושכל של הצללה יכול לשנות מבחינה מהותית את תפיסת המרחב, ואף "ליצור את המרחב". באמצעות הצללה ניתן להשיג תבניות חזותיות של אור וצל שמחזקות את מרכיבי האדריכלות, כגון יצירת הפרדה בין מרחבים שונים או הדגשת מרכיבי אדריכלות ייחודיים. באמצעות ההצללה ניתן גם לחזק את תחושת התלת-ממד, ליצור מיקוד על אזורים נבחרים או על מרכיבים שונים ולהוסיף דינמיות למרחב. כך ניתן להפוך מרחב פשוט למרחב חזותי מגוון, דינמי ומעניין.



פארק רעננה

(1) השיטה פותחה על ידי ערן קפטן, ושולבה באופן חלקי בתכנת Autodesk-Ecotect, אשר עורכת את החישובים הרלוונטיים על גבי גריד וירטואלי. לאחרונה זכתה השיטה בפרס ראשון בקטגוריית עיצוב המוצר בכנס בנייה ירוקה (בניהול בית ונוי, 2013)