

נספח 1. שימוש בגגות ירוקים להפחתת חום עירוני

מסגרת ניתוח והנחות עבודה

חישוב זה מציג ניתוח עלות-תועלת (נע"ת) לבחינת ההיתכנות הכלכלית של התקנת גגות ירוקים כאמצעי לצמצום עומסי חום עירוניים. הניתוח מציג את רכיבי העלות הישירים והעקיפים, התועלות הצפויות כתוצאה מהיישום ולבסוף את הערך הנוכחי הנקי (NPV) ויחס תועלת עלות (BCR), בהתאם לאופק הזמן של הפרויקט. הניתוח בוצע בהשראת מאמרם של Johnson et al. (2021)^[6], בו בוצע נע"ת להערכת ההשפעות הכלכליות של שלוש תשתיות ירוקות עירוניות בברלין: גגות ירוקים, חזיתות ירוקות ונטיעת עצים. לצורך היישום המקומי, הנתונים וההנחות המוצגים במאמר הותאמו לתנאי השוק והאקלים בישראל, באופן המאפשר הפקת תובנות רלוונטיות להיתכנות הכלכלית ולהשלכות היישום בישראל.

לצורך ההדגמה, בוצע ניתוח עבור גגות ירוקים בתל-אביב. ניתן להתאים את הפרמטרים לכל עיר או אזור אחרים לשם בדיקת הכדאיות המקומית.

המודל מבוסס על שטח ייחוס של 1,000 מ"ר, ונועד להמחיש באופן פשוט את השפעת הגג הירוק מבלי להידרש למורכבויות המרחביות הכרוכות בניתוח בקנה מידה של בניין, שכונה, או עיר שלמה. יש לציין כי ככל שהשטח גדל, יעילות ההתקנות צפויה לרדת, בשל תפוקה שולית פוחתת: הגגות הראשונים יותקנו לרוב על הגגות היעילים והמשתלמים ביותר, בעוד שההתקנות המאוחרות יתבצעו על מבנים מורכבים יותר או באזורים בעלי תועלת סביבתית נמוכה יותר.

הנחות העבודה של החישוב

- אופק זמן של 50 שנים.
- כלל העלויות והתועלות מהוונות לפי ריבית היוון בשיעור של 3%.
- העלויות כוללות את ההשקעה הראשונית (בזמן 0) וכן עלויות תחזוקה ותפעול שנתיות.
- התועלות עשויות להיות חד-פעמיות או שנתיות, בהתאם לסוג התועלת.
- שער חליפין של 4 ₪ לאירו ו-3.5 ₪ לדולר.

המודל כולל ניתוח רגישות למספר פרמטרים מרכזיים, ובהם שיעור ריבית ההיוון, גובה ההשקעה הראשונית, שיעור העלייה בערך הנדל"ן, שווי מ"ר נדל"ן, שיעור התמותה העודפת כתוצאה מחשיפה לחום ועלות טיפול במ"ק של מי נגר עירוני.

מקורות מידע עיקריים

הנתונים הדרושים לניתוח נאספו ממספר מקורות:

- מחקרים ומאמרים:
 - מאמרים על הפחתת חום עירוני בברלין [5, 6]
 - מחקרים נוספים משלימים מהספרות האקדמית
- הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה
- הספר הירוק: הערכה ומדידה של עלויות סביבתיות – עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר וגזי חממה
- המדריך לתכנון גגות ירוקים של המועצה הישראלית לבנייה ירוקה
- OECD
- דוחות מרכז טאוב

פירוט התועלות שחושבו בניתוח

לצורך בחינת יחסי העלות-תועלת במודל, נסכמו מספר רכיבי תועלת המשקפים יחד את התועלת הכללית של אמצעי ההסתגלות. חישוב התועלות בוצע באמצעות נוסחאות המפורטות בדוגמאות החישוב. בסמוך לכל נוסחה מפורטים המרכיבים הרלוונטיים לה ודרך החישוב. התועלות כוללות את התועלות המופקות מירידה בתמותה ובתחלואה, לצד תועלות משירותי המערכת האקולוגית של גגות ירוקים. התועלות במודל מחולקות לשני סוגים: תועלות פרטיות, המתקבלות ברמת הפרט, ותועלות ציבוריות, המתקבלות ברמת המדינה או הרשויות המקומיות.

א. תועלות פרטיות (לבעלי הנכסים / הדיירים)

1. הארכת תוחלת חיי הגג
2. עלייה בערך הנכס
3. חסכון באנרגיה לקירור מבנים

ב. תועלות ציבוריות (תועלת לרשות / למדינה / לסביבה)

4. הפחתת עלויות חיצוניות הנובעות משימוש באנרגיית קירור
5. קיבוע פחמן
6. שיפור איכות האוויר העירונית (ספיחת מזהמים)
7. יצירת בתי גידול אורבניים

8. ניהול נגר עירוני

עלויות

כדי להעריך את הכדאיות הכלכלית של המהלך, יש לבחון לצד התועלות גם את עלויות ההקמה והתחזוקה של הגגות הירוקים. עלות ההשקעה הראשונית להקמת גג ירוק מבוססת על נתונים מה"מדריך לתכנון גגות ירוקים" של המועצה הישראלית לבנייה ירוקה^[1], המעריך את העלות ב-600 ₪ למ"ר עבור גג אקסטנסיבי. עלות התחזוקה השנתית, העומדת על 6 ₪ למ"ר, נלקחה מהספרות האקדמית בהתאם למחקר שנערך בברלין^[5, 6].

העלות הכוללת מחושבת באמצעות הכפלת העלויות בשטח הגג הירוק, כך שהסכום המתקבל מייצג את סך עלויות ההשקעה הראשונית והתחזוקה השנתיות הכוללות. לאחר מכן, עלויות התחזוקה מהוונות לאורך תקופה של 50 שנים, ונוספות לעלויות ההשקעה לקבלת הערך הנוכחי הכולל של העלויות.

ערך העלויות הכוללות מחושב על פי הנוסחה הבאה:

עלות השקעה (זמן 0) + שווי מהוון של עלויות תחזוקה/תפעול שנתיות (שנים 1-50)

טבלה 1. עלויות

ערך	יחידת מידה	
600	₪	עלות השקעה למ"ר
6	₪	עלות תחזוקה שנתית למ"ר
1,000	מ"ר	שטח יישום גגות ירוקים
600,000	₪	עלות השקעה ראשונית כוללת
6,000	₪	עלות תחזוקה שנתית
154,379	₪	שווי מהוון של עלות תחזוקה (שנים 1–50)
754,379	₪	שווי מהוון כולל של עלויות (תחזוקה והשקעה)

תועלות

תועלות מהפחתת הטמפרטורה העירונית (הפחתת תמותה ותחלואה)

עומסי חום מהווים גורם סיכון משמעותי לבריאות הציבור, ומובילים לעלייה בשיעורי תמותה ותחלואה עודפים. מחקר שבחן את הקשר בין עלייה בעומס החום לתמותה בתל אביב מצא שעלייה של יחידה אחת במדד "אי

הנוחות" (שכולל טמפרטורה ולחות) גוררת עליה של 3.27% בתמותה^[7]. בהתאמה, ניתן להניח שהפחתת הטמפרטורה העירונית באמצעות תשתיות ירוקות תגרום לירידה בשיעורי התמותה והתחלואה העודפים.

גגות ירוקים תורמים להפחתת טמפרטורת הסביבה העירונית במספר דרכים. ראשית, שכבת הצמחייה שעל הגג סופגת חלק מקרינת השמש ובכך מפחיתה את כמות החום הנאגרת במבנה. בנוסף, תהליך האידוי-דיו (evapotranspiration) של הצמחים משחרר אדי מים לאוויר ומקרר את המרחב שמעל הגג. השילוב בין הצללה, ספיגת קרינה ואידוי לחות מוביל לירידה בטמפרטורת פני השטח של הגג, ולעיתים אף להפחתה מדידה בטמפרטורה האווירית באזור העירוני הסמוך.

לצורך הערכת ההשפעה של גגות ירוקים על הפחתת תמותה ותחלואה כתוצאה מהפחתת הטמפרטורה העירונית, יש לבחון שני נתונים עיקריים הנדרשים כתשומות למודל:

- מספר ימים / שעות שנתי שבהם שורר עומס חום המעלה את הסיכון הבריאותי: על-פי נתוני ה-OECD, בישראל יש בממוצע 140 ימים בשנה עם עומס חום כבד (מעל 32 מעלות UTCI¹).
- שיעור הפחתת עומס החום כתוצאה מיישום גגות ירוקים: במודל נעשה שימוש בנתון של הפחתה בשיעור של 28%, המבוסס על ממצאי הספרות האקדמית. המחקר שעליו נשען הנתון מצא כי התקנת גגות ירוקים הביאה לצמצום משך החשיפה לעומס חום כבד מ-7 שעות ל-5 שעות בלבד (כלומר, הפחתה של שתי שעות השוות ערך ל-2/7 או 28%).

בהתאם לספרות, האוכלוסייה חולקה לשתי קבוצות גיל עיקריות, גילאי 0–75 וגילאי 75 ומעלה. הקבוצה המבוגרת רגישה יותר לעומסי חום ולסיכון לתמותה ותחלואה עודפת כתוצאה ממנו. נוסחת החישוב מיושמת בנפרד לכל קבוצת גיל ולאחר מכן נסכמות התועלות המתקבלות מהן לכדי הערכה כוללת עבור שתי קבוצות הגילאים.

חישוב התועלת מהפחתת תמותה

התועלת מהפחתת התמותה מחושבת על פי הנוסחה הבאה:

$$\text{מקרי מוות שנחסכו} \times \text{שנות חיים שנגרעות לכל מקרה מוות} \times \text{ערך שנת חיים סטטיסטית}$$

¹ UTCI (Universal Thermal Climate Index) הוא מדד בינלאומי המשלב טמפרטורה, לחות, רוח וקרינה כדי להעריך את תחושת העומס התרמי על גוף האדם; למשל, 32 מעלות UTCI משמעה שבנסיבות מזג האוויר הקיימות הגוף מרגיש שהטמפרטורה היא 32°C מבחינת עומס חום פיזיולוגי, וזה כבר נחשב תחילת טווח של עומס חום כבד.

א. חישוב מספר מקרי מוות שנחסכו – מספר מקרי המוות שנחסכו מחושב על פי הנוסחה הבאה:

גודל האוכלוסייה המושפעת מהתקנת גגות ירוקים $\times$ שיעור תמותה בסיסי $\times$ שיעור תמותה עודף בשל עומס חום $\times$ שיעור מהתמותה העודפת שמיוחס לכל קבוצת גיל $\times$ אחוז הפחתת חום יחסית כתוצאה מהקמת הגגות הירוקים

1. גודל האוכלוסייה: מחושב בעזרת שטח היישום של הגגות הירוקים כפול צפיפות האוכלוסייה באזור. על פי נתוני הלמ"ס לשנת 2021, צפיפות האוכלוסייה בשטח המגורים הבנוי בתל-אביב היא 19,842 נפשות לקמ"ר. בהתאם לכך, באזור המחקר, בעל שטח גג ירוק של 1,000 מ"ר, האוכלוסייה שנלקחה בחשבון היא 19.842 נפשות.
2. שיעור התמותה הבסיסי: נקבע על פי נתוני הלמ"ס לשנת 2022, השנה האחרונה לגביה קיימים נתונים סופיים ועומד על 0.54%.
3. מקרי תמותה עודפת כתוצאה מחום: כ-45 מקרי מוות בשנה, בהתאם לנתוני מרכז טאוב
4. שיעור התמותה העודפת: באמצעות חלוקת מספר מקרי התמותה השנתיים מעומסי חום (45) בכלל מקרי התמותה השנתיים (שחושבה על פי שיעור התמותה הבסיסי וגודל האוכלוסייה) נקבע שיעור תמותה עודפת כתוצאה מחשיפה לעומסי חום של 0.083% [3].
5. התפלגות גילאים: מחקר שבוצע עבור המשרד להגנת הסביבה הראה שהתמותה העודפת מחום מתפלגת כך ש-88.5% ממקרי המוות מיוחסים לגילאי 70 ומעלה. על בסיס זה, בוצעה התאמה קלה בנתונים ובמודל נלקחה ההנחה ש-85% ממקרי התמותה העודפים מחום מיוחסים לקבוצת הגיל של 75 ומעלה, בעוד רק 15% מהמקרים מיוחסים לקבוצת הגיל עד 75.

ב. חישוב שנות חיים שנגרעו לכל מקרה – מוות חישוב ממוצע מספר שנות החיים שאבדו כתוצאה מתמותה מעומסי חום בכל קבוצת גיל מתבסס על שני פרמטרים:

1. תוחלת חיים לפי שנתון: לכל גיל בתוך קבוצת הגיל קיימת תוחלת חיים שונה. למשל, אדם בן 65 צפוי לחיות שנים נוספות רבות יותר מאשר אדם בן 69.
2. התפלגות האוכלוסייה בתוך קבוצת הגיל: מספר האנשים החיים בכל גיל שונה, ולכן יש להתחשב במשקל היחסי של כל שנתון באוכלוסייה.

בהתאם לכך, חושב ממוצע משוקלל המבטא את מספר שנות החיים שאבדו בממוצע בכל קבוצת גיל, באמצעות שלושה שלבים עיקריים:

1. לכל שנתון, חושבה המכפלה של מספר שנות החיים שנותרו במספר האנשים בשנתון.
2. חושב הסכום הכולל של שנות החיים שנותרו עבור כל קבוצת גיל (75–0, +75).
3. הסכום הכולל חולק במספר האנשים בכל קבוצת גיל, לקבלת הממוצע המשוקלל של שנות החיים שאבדו.

התוצאה משקפת את מספר שנות החיים שאבדו, בממוצע, לכל אדם שנפטר בכל אחת מקבוצות הגיל.

א. ערך שנת חיים סטטיסטית – הערך הסטטיסטי של חיי אדם (VSL – Value of a Statistical Life) הוא אומדן כספי המבוסס על נכונות הציבור לשלם עבור הפחתת סיכוני תמותה – כלומר, כמה אנשים מוכנים להשקיע כדי לצמצם במעט את הסיכוי למות. מתוך אומדן זה נגזר ערך שנת חיים סטטיסטית (VSLY – Value of a Statistical Life Year) המחושב באמצעות חלוקת ה-VSL בתוחלת החיים הממוצעת באוכלוסייה.

ב. חישוב בפועל

טבלה 2. תועלת מהפחתת תמותה

ערך		יחידת מידה	
	0.54%	%	אחוז תמותה שנתי ממוצע
	177,159	שנה	ערך שנת חיים סטטיסטית
	0.083%	%	תמותה עודפת בימי חום
	28%	%	הפחתת חום
	19.84	נפשות	כמות אוכלוסיה באזור המחקר
גיל 75+	גיל 75–0		
85.00%	15.00%	%	אחוז של קבוצת הגיל מסך התמותה
0.000021166	0.000003735	נפשות	מספר מקרי מוות שנחסכו בכל קבוצה
8.04	53.51	שנים	שנות חיים שנגרעו בשל תמותה מוקדמת
30.16	35.41	שנה	תועלת שנתית בשל הפחתת תמותה עודפת
65.57		שנה	שווי תועלת שנתית מהפחתת תמותה בכל הגילאים
1,687		שנה	שווי מהוון של תועלת שנתית (שנים 1–50)

חישוב התועלת מהפחתת תחלואה

עלות התחלואה נאמדת באמצעות מספר רכיבים כלכליים, בהם עלויות אשפוז, הוצאות על שירותי חירום (כגון אמבולנסים) והפסדי פרודוקטיביות הנובעים מאובדן ימי עבודה במהלך תקופת המחלה. במודל הנוכחי נבחנה

עלות האשפוז בלבד, ונאמדו התועלות הנובעות מהפחתת מספר האשפוזים השנתי כתוצאה מירידה בטמפרטורה העירונית.

שיטת החישוב – התועלת מהפחתת מספר האשפוזים מחושבת לכל אחת מקבוצות הגילאים על פי הנוסחה הבאה:

אוכלוסייה בקבוצת גיל $\times$ שיעור אשפוז שנתי בסיסי $\times$ שיעור עלייה בתחלואה כתוצאה מחום $\times$ (ימי חום שנחסכו \ 365) $\times$ עלות לאשפוז

שיעור האשפוז הבסיסי לגילאי 0–75 מבוסס על נתוני ה-OECD, המצביעים על 15,227 אשפוזים לכל 100,000 תושבים (כ-15%), ועבור גילאי 75 ומעלה נלקח בחשבון שיעור אשפוז בסיסי גבוה יותר של 50%, בהתאם לנתוני משרד הבריאות האמריקאי (NIH) בנוגע לדפוסי אשפוז של אוכלוסייה מבוגרת. השפעת הגגות הירוקים על הפחתת ימי עומס החום מחושבת על בסיס מכפלת שיעור הפחתת עומס החום (28%) במספר ימי עומס החום השנתי בישראל (140 ימים בממוצע).

לאחר ביצוע החישוב עבור כל אחת מקבוצות הגיל, נסכמות התועלות המתקבלות משתי קבוצות הגילאים לכדי תועלת שנתית כוללת, אשר מהווה לאורך תקופה של 50 שנים.

עלות האשפוז היומית חושבה על פי מחירון משרד הבריאות לשירותים אמבולטוריים ולשירותי אשפוז^[2], ועלות זו הוכפלה ב-5.2 ימי אשפוז בממוצע, נתון שנלקח מדוח של מרכז טאוב^[3].

חישוב בפועל

טבלה 3. תועלת מהפחתת תחלואה

ערך		יחידת מידה	
	140	ימים	מספר ימי עומס חום בשנה
	28%	%	הפחתת חום באחוזים
	39.2	ימים	הפחתת ימי עומס חום
	19.842	נפשות	כמות אוכלוסיה באזור המחקר
גיל 75–0	גיל +76		
4.55%	95.45%	%	אחוז מסך האוכלוסיה
0.90	18.94	נפשות	כמות אוכלוסיה בכל קבוצת גיל
50%	15%	%	אחוז תחלואה שנתית ממוצע מסך האוכלוסיה
15%	10%	% עליה	עלייה באשפוזים עודפים בימי חום
3,928	3,928	ש"ח	עלות אשפוז יומית

מסך אשפוז ממוצע	ש"ח	5.2	5.2
עלות אשפוז ממוצעת	ש"ח	20,426	20,426
תועלת שנתית מהפחתת תחלואה	ש"ח	623	148
שווי מהוון של תועלת שנתית מהפחתת תחלואה (שנים 1-50)	ש"ח	16,035	3,818
סך שווי מהוון לכל האוכלוסיה כתוצאה מהפחתת תחלואה	ש"ח	19,853	

תועלת משירותי המערכת האקולוגית

נוסף על הפחתת חום עירוני, גגות ירוקים מספקים שירותים שונים למערכת האקולוגית ובכך מוסיפים תועלות כלכליות פרטיות וציבוריות.

הארכת חיי הגג

הגגות הירוקים תורמים להארכת חיי הגג בעזרת יצירת שכבת מגן שמפחיתה חשיפה ישירה של הממברנה לקרינת UV. שכבה זו מגנה מתנודות טמפרטורה חדות בין יום ולילה ובין עונות, מייצבת את רמת הלחות ומונעת פגיעות מכניות כמו ברד או דריכה. כל אלו מצמצמים תהליכי התבלות וסדיקה שמקצרים את חיי הגג.

שיטת החישוב – אורך החיים של גג רגיל בישראל נאמד בכ-10 שנים, עד לשיפוץ כללי של הגג. לעומת זאת, אורך חיי גג ירוק יכול להגיע ל-50 שנים. לכן, בשנים 10, 20, 30 ו-40 נלקחה בחשבון תועלת המתקבלת מהחיסכון בצורך בשיפוץ הגג. בכל אחת מהשנים הללו נרשמת תועלת בגובה עלות השיפוץ שנחסכת (למ"ר × שטח הגג), והתועלות מהוונות לזמן 0 בהתאם לריבית ההיוון במודל. במאמר של Hammerle ^[4] עלות החלפת/שיפוץ הגג הוערכה ב-62 אירו למ"ר, סכום שהומר ל-248 ₪.

חישוב בפועל

טבלה 4. תועלת מהארכת חיי הגג

ערך	יחידת מידה	
248	ש"מ	חסכון למ"ר בשל ביטול הצורך בשיפוץ גג אחת ל-10 שנים
1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
248,000	ש"מ	חסכון כולל בשל ביטול הצורך בשיפוץ גג אחת ל-10 שנים (שנים 10, 20, 30, ו-40)
184,535	ש"מ	שווי מהוון של התועלת בשל ביטול הצורך בשיפוץ הגג בשנה ה-10
137,312	ש"מ	שווי מהוון של התועלת בשל ביטול הצורך בשיפוץ הגג בשנה ה-20
102,173	ש"מ	שווי מהוון של התועלת בשל ביטול הצורך בשיפוץ הגג בשנה ה-30
76,026	ש"מ	שווי מהוון של התועלת בשל ביטול הצורך בשיפוץ הגג בשנה ה-40
500,046	ש"מ	שווי מהוון של חסכון בשיפוץ הגג

עלייה בערך הנכס-

גג ירוק תורם לעליית ערך הנכס משום שהוא מפחית עלויות תפעול ותחזוקה כגון חיסכון באנרגיה והארכת חיי הגג, מוסיף יתרונות סביבתיים ואסתטיים כגון שיפור איכות האוויר, בידוד רעשים ונוף ירוק, ומספק שטח שימושי נוסף ויתרונות רגולטוריים.

שיטת החישוב – הערך הכלכלי של תועלת זו מחושב על פי הנוסחה הבאה:

מחיר בסיס למ"ר × שיעור עליית ערך למ"ר × שטח גג ירוק

- החישוב מניח שהערך מתקבל בצורה מיידיית (זמן 0).
- עליית ערך הנכס רלוונטית אך ורק לקומות הנהנות מקירור, ולכן מוצגת תועלת עבור הקומה העליונה בלבד.
- מאחר שחלק מהתועלות (כגון חיסכון באנרגיה והארכת חיי הגג) כבר נכללות בחישובים נפרדים, הן מנוכות מחישוב זה כדי למנוע ספירה כפולה של תועלות.
- שיעור עליית ערך: הספרות האקדמאית הבינלאומית מציינת טווח רחב (2-16%) של שיעור עלייה בערך הנדל"ן כתוצאה מהתקנת גגות ירוקים. במודל זה נלקחת הנחה שמרנית של 2% עלייה – הקצה התחתון של הטווח המדווח במחקרים. זאת בהתבסס על כך שהשוק הישראלי עוד מתפתח מבחינת בנייה ירוקה, ובשווקים מתפתחים שבהם התודעה לבנייה ירוקה נמוכה יחסית, הפרמיום הירוק נוטה להיות בקצה התחתון של הטווח.

א. חישוב בפועל

טבלה 5. עליית ערך הנכס

ערך	יחידת מידה	
-----	------------	--

מחיר שוק ממוצע למ"ר	₪ למ"ר	54,000
שיעור עליית ערך הנכס כתוצאה מהתקנת גג ירוק	%	2.0%
עליית ערך למ"ר של גג ירוק	₪	1,080
שטח גגות ירוקים	מ"ר	1,000
עליית ערך הנכס באזור המחקר *	₪	1,080,000
הפחתת תועלות בספירה כפולה – חסכון באנרגיה	₪	64,004
הפחתת תועלות בספירה כפולה – הארכת חיי הגג	₪	500,046
עליית ערך הנכס (נטו)	₪	515,951

* במקרה זה ההנחה היא לעליית ערך מיידית, ולכן הערך הוא כבר מהוון.

חסכון באנרגיה לקירור

א. שיטת החישוב – הגג הירוק פועל כמעטפת בידוד נוספת למבנה, המפחיתה משמעותית את מעבר החום בין פנים המבנה לסביבתו. ההבדל בערכי ההתנגדות התרמית בין גג רגיל לגג ירוק גורם להקטנת שטף החום דרך הגג, וכתוצאה מכך להורדת הטמפרטורה הפנימית בבניין. ירידה זו בצורך בקירור חללים פנימיים מתורגמת לחיסכון בצריכת האנרגיה.

החיסכון השנתי באנרגיית קירור (קוט"ש למ"ר לשנה) מחושב על פי הנוסחה:

$$CDD \times \Delta U \times \text{שעות ביום}$$

כאשר:

- **CDD (Cooling Degree Days)** הוא מדד הביקוש לקירור לאורך השנה
- **ΔU** הוא ההפרש בהולכת החום (Thermal Transmittance) בין גג רגיל לגג ירוק
- **שעות ביום** מייצגות את פרק הזמן היומי שבו נדרש קירור

CDD (Cooling Degree Days) הוא מדד המבטא את הביקוש לקירור לאורך השנה. הוא מחושב כסכום ההפרשים בין הטמפרטורה היומית הממוצעת לטמפרטורת בסיס מסוימת (שמעליה נדרש קירור). בימים שבהם הממוצע היומי נמוך מטמפרטורת הבסיס, ערך המדד הוא אפס. כאשר מכפילים את התוצאה למ"ר בשטח הגגות הירוקים, מתקבל סך החיסכון השנתי באנרגיה לכלל השטח (בקוט"ש). החיסכון האנרגטי הכמותי מומר לחיסכון כספי באמצעות הכפלה במחיר החשמל המקומי נטו (ללא מע"מ), לפי נתוני חברת החשמל לשנת 2025.

החסכון הכספי מחושב על פי הנוסחה הבאה:

$$CDD \times 24 \times \text{שטח גג ירוק} \times \text{עלות נטו קוט"ש}$$

ב. חישוב בפועל

טבלה 6. תועלת מחסכון בעלויות קירור

ערך	יחידת מידה	
735	יום × מעלות צלזיוס	מספר "ימי קירור" (Cooling Degree Days)
0.50	ואט / מ"ר × K	מקדם הולכת חום – גג רגיל (U_{CONV})
0.24	ואט / מ"ר × K	מקדם הולכת חום – גג ירוק (U_{GR})
0.26	ואט / מ"ר × K	הפרש בהולכת חום ($U_{GR} - U_{CONV}$)
4.59	קוּוּט"ש למ"ר	חיסכון אנרגטי שנתי למ"ר
0.640	ש"קוט"ש	מחיר חשמל – כולל מע"מ
18%	%	שיעור מע"מ
0.542	ש"קוט"ש	מחיר חשמל – ללא מע"מ *
2.49	ש"ק	חסכון כלכלי למ"ר של גג ירוק
1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
2,488	ש"ק	תועלת שנתית מחסכון באנרגיה לקירור
64,004	ש"ק	שווי מהוון של התועלת מחסכון באנרגיה (שנים 1-50)

* **בניתוח זה המע"מ אינו נחוץ לצורך חישוב התועלת המשקית ולכן יש לחשב את המחיר נטו ללא המע"מ.**

חסכון בעלויות חיצוניות הנגרמות כתוצאה מקירור

הגגות הירוקים מביאים לירידה בטמפרטורת הסביבה ובכך מצמצמים את הצורך בקירור וחוסכים בצריכת אנרגיה. החיסכון בצריכת חשמל מביא לירידה בפליטות מזהמים וגזי חממה, ובכך מפחית את העלויות החיצוניות הכרוכות בייצור חשמל ממקורות פוסילים. הפחתה זו תורמת לצמצום הנזקים הבריאותיים והסביבתיים הנובעים משימוש באנרגיה מזהמת.

שיטת החישוב – לצורך חישוב התועלת הכלכלית של הפחתת העלויות החיצוניות, נעשה שימוש בכמות אנרגיית הקירור שנחסכה. בשונה מחישוב החיסכון הפרטי שבו חושב החיסכון בעזרת עלות החשמל ליחידת אנרגיה, כאן מוכפל החיסכון בעלות הנזק שנמנע ליחידת אנרגיה (קוט"ש), כלומר הערך הכלכלי של הפחתת פליטות מזהמות.

עלות הנזק שנמנע במודל היא 9 אגורות לקוט"ש, זאת בהתאם למופיע בדו"ח של המועצה הלאומית לכלכלה משנת 2013 (מעודכן לערכי 2024).

החסכון מחושב על פי הנוסחה הבאה:

חיסכון אנרגטי (קוט"ש/מ"ר) × עלות נזק שנמנע (ש"קוט"ש) × שטח גג ירוק (מ"ר)

א. חישוב בפועל

טבלה 7. הפחתת עלויות חיצוניות כתוצאה מחסכון בקירור

ערך	יחידת מידה	
4.59	קוט"ש למ"ר	חיסכון אנרגטי שנתי למ"ר
1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
4,586	קוט"ש	חיסכון אנרגטי שנתי
0.09	ש"ל לקוט"ש	עלות חיצונית לייצור 1 קוט"ש ממקורות פוסיליים
412.8	ש"ל	עלויות חיצוניות שנתיות שנמנעו
10,621	ש"ל	שווי מהוון של חסכון בעלויות חיצוניות (שנים 1–50)

קיבוע פחמן

גגות ירוקים תורמים להפחתת ריכוזי גזי חממה באטמוספירה באמצעות קיבוע פחמן דו-חמצני (פד"ח) בתהליך פוטוסינתזה. הצמחים הגדלים על גגות ירוקים קולטים פד"ח במהלך גדילתם ובכך מסייעים לבלימת שינוי האקלים ברמה העירונית והגלובלית. זוהי תועלת סביבתית-חברתית, המהווה חלק בלתי נפרד משירותי המערכת האקולוגית שמספקים שטחים ירוקים עירוניים.

שיטת החישוב – לצורך הכימות הכלכלי של תועלת זו, החישוב נעזר בשני פרמטרים מרכזיים:

- קיבולת הקיבוע השנתית של גג ירוק – כמות (גרם או ק"ג) פחמן הנספג בממוצע למ"ר גג ירוק בשנה. נתון זה נלקח מהספרות האקדמית.
- המחיר החברתי של פחמן – מונח כלכלי שמייצג את עלות הנזק החברתי המצטברת הנגרמת מפליטה של טון נוסף של פד"ח (כולל השפעות על בריאות, חקלאות, תשתיות ואקלים). נתון זה נלקח מתוך "הספר הירוק" של המשרד להגנת הסביבה, אשר מעריך עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר וגזי חממה.

תועלת קיבוע הפחמן חושבה על פי הנוסחה הבאה:

קיבולת ספיחת פחמן שנתית (טון/מ"ר) × שטח גג ירוק (מ"ר) × מחיר חברתי של פחמן (ש"ל/טון)

התועלת השנתית מהוונות לתקופה של 50 שנה לחישוב הערך הנוכחי.

- חישוב בפועל

טבלה 8. תועלת מקיבוע פחמן

ערך	יחידת מידה	
168	גרם/מ"ר/שנה	קצב קיבוע פחמן (C) למ"ר גג
1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
0.168	טון	סה"כ קיבוע פחמן (C) לשנה
3.67		ערך להמרת פחמן לפד"ח

המרה לפד"ח (CO ₂) - סה"כ קיבוע לשנה	טון	0.617
ערך של טון פד"ח	₪ לטון	210
ערך כספי שנתי מקיבוע פד"ח	₪	129.5
שווי מהוון לתועלת מספיחת פחמן (שנים 1–50)	₪	3,331

שיפור באיכות האוויר (ספיחת מזהמים)

גגות ירוקים תורמים לשיפור איכות האוויר במרחב העירוני באמצעות ספיחה של מזהמים אטמוספריים אל פני הצמחייה והמצע. תהליך זה מפחית את ריכוז המזהמים באוויר ונחשב לתועלת ציבורית התורמת לבריאות הציבור ולצמצום עלויות חיצוניות הנובעות מתחלואה, ימי אשפוז, ירידה בפריון העבודה ונזקים סביבתיים.

א. שיטת החישוב – לצורך חישוב התועלת הכלכלית מהפחתת זיהום אוויר, נלקחו בחשבון ארבעה מזהמים עיקריים שגגות ירוקים סופחים:

1. תחמוצות חנקן (NO₂).
2. אוזון או חומרים אורגניים נדיפים (O₃/NMVOC).
3. תחמוצות גופרית (SO₂).
4. חומר חלקיקי נשימתי גס (PM₁₀).

עבור כל אחד מהמזהמים, מחושב היקף הספיחה השנתי באמצעות הכפלת ערך הספיחה למ"ר גג ירוק בשטח הגג הכולל. המספר שהתקבל מוכפל בערך הכספי של הנזק הנמנע לחברה מכל טון של מזהם, בהתאם לנתוני הספר הירוק של המשרד להגנת הסביבה.

עבור כל מזהם, חושבה התועלת לפי הנוסחה הבאה:

קיבולת ספיחה שנתי לכל מזהם (טון/מ"ר) × שטח גג ירוק (מ"ר) × עלות חיצונית למזהם (₪/טון)

לאחר ביצוע החישובים עבור כלל המזהמים, נסכמות התועלות השנתיות לכל אחד מהם, והסכום הכולל מהוון לתקופה של 50 שנה, לשם קבלת הערך הנוכחי של התועלת המצטברת.

ב. חישוב בפועל

טבלה 9. תועלת מספיחת מזהמים שונים

ס"ח	PM ₁₀	SO ₂	O ₃ (NMVOC)	NO ₂	יחידת מידה	
	1.19	0.595	4.42	2.23	גרם/מ"ר/שנה	ספיחה שנתית
	1,000	1,000	1,000	1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
	1,190	595	4,420	2,230	גרם/שנה	ס"ח ספיחה שנתית
	0.00119	0.000595	0.00442	0.00223	טון/שנה	ס"ח ספיחה שנתית
	206,729	116,323	9,833	161,047	ש	שווי כלכלי – ש לטון
717.8	246.0	69.2	43.5	359.1	ש	תועלת שנתית מספיחת מזהמים
18,469					ש	שווי מהוון של התועלת (שנים 1–50)

יצירת בתי גידול

התועלת הכלכלית של בתי גידול בגגות ירוקים נובעת משירותי מערכת אקולוגית (מאביקים, ויסות טבעי), עליית ערך נדל"ן ומיתוג ירוק, וכן מתועלות חברתיות וחינוכיות.

א. שיטת החישוב – החישוב של תועלת אקולוגית מבתי גידול חדשים שנוצרים באמצעות גגות ירוקים מתבסס על גישת "עלות התחליף", כלומר, העלות הנדרשת ליצירת שטח טבעי דומה בדרך מלאכותית. בהתאם לגישה זו, גג ירוק המספק תנאים בסיסיים לקיום אורגניזמים (כגון ציפורים, חרקים וצמחים) נחשב כבעל ערך אקולוגי גם אם איכות בית הגידול בו נמוכה מזו של שטח טבעי פתוח. החישוב מתבצע באמצעות הכפלת שטח הגג הירוק בעלות מוערכת של יצירת בית גידול שווה ערך (הנקבע על פי מחקרים קודמים בתחום שיקום קרקע טבעית). מאחר ואיכות בית הגידול בגגות ירוקים נחשבת לנמוכה יחסית לעומת בתי גידול בטבע, מיושם מקדם התאמה של 15% המשקף את הפער האיכותי בין הגג הירוק לבית גידול טבעי.

תועלת זו חושבה על פי הנוסחה הבאה:

שטח גגות ירוקים × ערך שיקום ליחידת שטח × מקדם התאמה איכותית

מאחר שהערכת התועלת מבוססת על עלות חד-פעמית של יצירת בית גידול חלופי, היא נחשבת תועלת מיידית, ולכן אינה מהווה לאורך זמן (כלומר, מתקבלת כערך נוכחי).

ב. חישוב בפועל

טבלה 10. תועלת מיצירת בתי גידול

ערך	יחידת מידה	
221	ש"מ	עלות שיקום בית גידול למ"ר
15%	%	שיעור תועלת מבתי גידול – גג ירוק ביחס לקרקע טבעית
33.1	ש"מ	ערך יצירת בתי גידול למ"ר של גגות ירוקים
1,000	מ"ר	שטח גגות ירוקים
33,144	ש"מ	ערך כולל – יצירת בתי גידול בגגות ירוקים

הפחתת נגר עירוני

גג ירוק מפחית נגר עירוני עילי בכך שהוא סופג ומאחסן חלק משמעותי ממי הגשמים, מאט את קצב הזרימה למערכת הניקוז ובכך מפחית עומסים על תשתיות, מצמצם את הסיכון להצפות ונזקים, וחוסך עלויות ציבוריות.

א. שיטת החישוב – כמות המשקעים השנתית חושבה על בסיס ממוצע רב-שנתי של 583 מ"מ בתל אביב (לפי נתוני הלמ"ס לשנים 1981–2010), שהומר ל-0.583 מ"ק מי גשמים למ"ר לשנה. כמות זו הוכפלה בשיעור הפחתת הנגר המיוחס לגג ירוק, 58%, על פי ממוצע מספר מחקרים מצפון אמריקה שבחנו את שיעור הפחתת הנגר העירוני ליחידת שטח גג ירוק. התוצאה הוכפלה בשטח הגג הירוק הכולל, לצורך חישוב כמות הנגר המופחתת השנתית.

הנוסחה לחישוב התועלת היא:

כמות גשם שנתית למ"ר (מ"ק למ"ר) × אחוז הפחתת נגר בגגות ירוקים × שטח גג ירוק (מ"ר) × עלות הטיפול במי נגר (ש"מ/מ"ק)

ישנו קושי במציאת נתונים לגבי עלות טיפול במי נגר עירוני. לצורך המודל נלקחה הנחה של 10 דולר למ"ק של מי נגר (עלות זו הומרה ל-35 ש"ח), אולם לטובת חישובים עתידיים רצוי לבצע וידוא עם מומחים בתחום ולקבל הערכת עלות אמינה.

ב. חישוב בפועל

טבלה 11. תועלת מהפחתת נגר עירוני

ערך	יחידת מידה	
0.583	מטר	כמות גשמים שנתית ממוצעת
58%	%	אחוז הפחתת נגר מגגות ירוקים
0.583	מ"ק	כמות גשם למ"ר
0.335	מ"ק למ"ר	כמות גשם מטופלת ע"י מ"ר של גג ירוק
1000.0	מ"ר	שטח גג ירוק
335.3	מ"ק	כמות מי נגר מטופלים ע"י 1,000 מ"ר גג ירוק

עלות הטיפול במי נגר	ש"מ/מ"ק	35
תועלת שנתית מניהול נגר (שנים 1–50)	ש"מ	11,736
שווי מהוון של התועלת מניהול נגר עירוני	ש"מ	301,972

חישוב ערך נוכחי נקי ויחס תועלת-עלות

לצורך חישוב הערך הנוכחי הנקי (NPV) ויחס התועלת-עלות (BCR) נסכמו תחילה כלל התועלות המהוונות. מהסכום שהתקבל הופחת הערך המהוון של כלל העלויות, כפי שמוצג בטבלה להלן.

מניתוח הנתונים עולה כי ה-NPV חיובי, כלומר סך התועלות המצטבר עולה על סך העלויות, וה-BCR קרוב ל-2, נתון המשקף כדאיות כלכלית מובהקת ליישום גגות ירוקים בהיקף הנבחר. ממצאים אלו מצביעים על כך שהשקעה בגגות ירוקים אינה רק סביבתית ובריאותית, אלא גם השקעה כלכלית, ומהווה חלופה יעילה וחסכונית להשקעה עירונית ארוכת טווח.

טבלה 12. ערך נוכחי נקי ויחס תועלת-עלות

עלויות			
שווי מהוון כולל של עלויות תחזוקה והשקעה (ש"מ)			
754,379			
ערך נוכחי של תועלות מהפחתת חום עירוני	סוג תועלת	ערך (ש"מ)	% מסך התועלת
הפחתת תמותה עודפת	חברתית	1,687	0.11%
הפחתת תחלואה עודפת	חברתית	19,853	1.35%
סה"כ תועלות מהפחתת חום 21,540			
1.5%			
ערך נוכחי של תועלות משירותי מערכת אקולוגית:			
3. הארכת חיי הגג	פרטית	500,046	34.04%
2. עליית ערך הנכס (נטו)	פרטית	515,951	35.12%
3. חסכון באנרגיה – קירור	פרטית	64,004	4.36%
4. חסכון בעלויות חיצוניות (אנרגיית קירור)	חברתית	10,621	0.72%
5. קיבוע פחמן	חברתית	3,331	0.23%
6. שיפור באיכות האוויר (ספיחת מזהמים)	חברתית	18,469	1.26%
7. יצירת בתי גידול	חברתית	33,144	2.26%
8. הפחתת נגר עילי	חברתית	301,972	20.56%
סה"כ תועלות משירותי מערכת אקולוגית 1,447,537			
98.5%			
1,469,077			
100.0%			
סה"כ ערך נוכחי של תועלות			

ערך נוכחי נקי (NPV) יחס תועלת לעלות (BCR)		714,698	1.95
תועלות פרטיות מול חברתיות:			
ערך (₪)		% מסך התועלת	
1,080,000		73.5%	
389,077		26.5%	
1,469,077		100.0%	
סה"כ תועלות			

ניתוחי רגישות

ניתוחי רגישות בוצעו למשתנים העיקריים: ריבית ההיוון, עלות השקעה ראשונית למ"ר של גג ירוק, שיעור עליית ערך הנדל"ן, שווי שוק למ"ר נדל"ן, שיעור התמותה העודפת מחום, ועלות טיפול במי נגר עירוני. כמו כן נכלל ניתוח רגישות דו ממדי המתייחס הן לעלות ההשקעה בגגות ירוקים למול שיעור עליית ערך הנדל"ן.

בטבלאות הבאות מוצגים ערכי ה-NPV ויחס התועלת-עלות (BCR) עבור תרחישים שונים של כל אחד מהמשתנים. מהטבלאות עולה כי המשתנים בעלי ההשפעה המהותית ביותר על כדאיות המהלך הם עלות הקמת הגגות הירוקים מצד אחד, והשפעתם על ערך הנדל"ן מצד שני. לעומת זאת, השפעת יתר המשתנים שנבחנו על התוצאה הכלכלית היא שולית יחסית.

הערך שחושב במודל מודגש (Bold). כמו כן, בניתוחי הרגישות בעלי ההשפעה המשמעותית חושבו נקודות האיזון בהן ה-NPV של הפרויקט עומד על 0. נקודות האיזון מסומנות באדום במקומות הרלוונטיים בטבלאות 12-19.

טבלה 13. ניתוח רגישות לשיעור ריבית ההיוון²

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
שיעור ריבית ההיוון	1%	2%	3%	4%	5%
820,187	759,301	714,698	681,425	656,152	
יחס תועלת לעלות - BCR					
שיעור ריבית ההיוון	1%	2%	3%	4%	5%
1.98	1.96	1.95	1.93	1.92	

טבלה 14. ניתוח רגישות לעלות השקעה למ"ר של גג ירוק

² עליית ערך הנכס, המהווה חלק גדול מהתועלות, מתקבלת מיידיית ואינה מושפעת מהיוון, בעוד שהתזרימים העתידיים שליליים (עלויות תחזוקה גבוהות מהתועלות). לכן ככל שהריבית יורדת, ערך התזרימים השליליים גדל והרווחיות יורדת.

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
עלות השקעה למ"ר (ש"ח)	400	500	600	700	1,315
	914,698	814,698	714,698	614,698	0
יחס תועלת לעלות - BCR					
עלות השקעה למ"ר (ש"ח)	400	500	600	700	1,315
	2.65	2.24	1.95	1.72	1.00

טבלה 15. ניתוח רגישות לשיעור עליית ערך הנדל"ן

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
שיעור עליית ערך הנדל"ן	5%	3%	2%	1.5%	0.0%
	2,334,698	1,254,698	714,698	444,698	198,748
יחס תועלת לעלות - BCR					
שיעור עליית ערך הנדל"ן	5%	3%	2%	1.5%	0.0%
	4.09	2.66	1.95	1.59	1.26

טבלה 16. ניתוח רגישות לשווי מ"ר נדל"ן בתל אביב

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
שווי נדל"ן (ש"ח למ"ר)	75,000	60,000	54,000	30,000	0
	1,134,698	834,698	714,698	234,698	198,748
יחס תועלת לעלות - BCR					
שווי נדל"ן (ש"ח למ"ר)	75,000	60,000	54,000	30,000	0
	2.50	2.11	1.95	1.31	1.26

טבלה 17. ניתוח רגישות לשיעור תמורתה עודפת מחום³

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
שיעור תמורתה עודפת מחום	5.0%	1.6%	0.91%	0.083%	0.00%
	814,643	745,533	731,508	714,698	713,011
יחס תועלת לעלות - BCR					
שיעור תמורתה עודפת מחום	5.0%	1.6%	0.91%	0.083%	0.00%
	2.08	1.99	1.97	1.95	1.95

טבלה 18. ניתוח רגישות לעלות טיפול מי נגר עירוני

³ מכיוון שהנתון הנמצא בספרות לגבי שיעור התמורתה מעומס חום עבור ישראל נמוך באופן משמעותי מהנתונים הגלובליים (0.083% לעומת 0.91%-1.6% במחקרים אחרים) ניתוח הרגישות משווה בין שיעור התמורתה העודפת מחום בישראל לבין שיעורים גלובליים, וכמו כן לשיעור התמורתה העודפת מחום בגרמניה, העומדת על כ-5%.

ערך נוכחי נקי - NPV (₪)					
עלות טיפול מי נגר (ש"ח למ"ק)	50	35	20	10	1
844,115	714,698	585,282	499,004	421,355	
יחס תועלת לעלות - BCR					
עלות טיפול מי נגר (ש"ח למ"ק)	50	35	20	10	1
2.12	1.95	1.78	1.66	1.56	

טבלה 19. ניתוח רגישות דו ממדי – עלות התקנה לעומת שיעור עליית ערך הנדל"ן

עלות התקנה (₪ למ"ר)						NPV
1,315	700	600	500	400		שיעור עליית ערך הנדל"ן
-515,951	98,748	198,748	298,748	398,748	0.0%	
-515,951	98,748	198,748	298,748	398,748	1.0%	
-270,000	344,698	444,698	544,698	644,698	1.5%	
0	614,698	714,698	814,698	914,698	2.0%	
540,000	1,154,698	1,254,698	1,354,698	1,454,698	3.0%	
עלות התקנה (₪ למ"ר)						BCR
1,315	700	600	500	400		שיעור עליית ערך הנדל"ן
0.65	1.12	1.26	1.46	1.72	0.0%	
0.65	1.12	1.26	1.46	1.72	1.0%	
0.82	1.40	1.59	1.83	2.16	1.5%	
1.00	1.72	1.95	2.24	2.65	2.0%	
1.37	2.35	2.66	3.07	3.62	3.0%	

מקורות

[1] פלד א. 2022. מדריך לתכנון גגות ירוקים. דו"ח מוגש למשרד הבינוי והשיכון והמועצה הישראלית לבנייה ירוקה.

[2] משרד הבריאות. 2024. מחירן לשירותים אמבולטוריים ולשירותי אשפוז. ירושלים: משרד הבריאות.

[3] צ'רניחובסקי ד וכפיר ר. 2019. מערכת האשפוז הכללי בישראל: תמונת מצב. נייר מדיניות מס' 03.2019, מוגש למרכז טאוב לחקר המדיניות החברתית בישראל.

[4] Hämmerle F. 2010. [Die Wirtschaftlichkeit von Gründächern aus Sicht des Bauherrn. Eine Kosten-Nutzen-Analyse](#). Viewed 22 Aug 2013.

- [5] Johnson D, and Geisendorf S. 2019. [Are Neighborhood-level SUDS worth it? An assessment of the economic value of sustainable urban drainage system scenarios using cost-benefit analyses](#). *Ecological Economics* **158**: 205–194.
- [6] Johnson D, Exl J, and Geisendorf S. 2021. [The potential of stormwater management in addressing the urban heat island effect: An economic valuation](#). *Sustainability* **13**(16): 8685.
- [7] Peretz C, Biggeri A, Alpert P, and Baccini M. 2012. [The effect of heat stress on daily mortality in Tel Aviv, Israel](#). In: Fernando HJS, Klaic ZB, and McCulley JL (Eds). *National Security and Human Health Implications of Climate Change*. Dordrecht: Springer Netherlands.